

eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

ARQUITECTURA TOMO II Ecoeficiente



EDITORES

RUFINO JAVIER HERNÁNDEZ MINGUILLÓN

OLATZ IRULEGI GARMENDIA

MARÍA ARANJUELO FERNÁNDEZ-MIRANDA



Arquitectura Ecoeficiente



Arquitectura Ecoeficiente

TOMO II

EDITORES

RUFINO JAVIER HERNÁNDEZ MINGUILLÓN

OLATZ IRULEGI GARMENDIA

MARÍA ARANJUELO FERNÁNDEZ-MIRANDA



Editores

RUFINO JAVIER HERNÁNDEZ MINGUILLÓN
OLATZ IRULEGI GARMENDIA
MARÍA ARANJUELO FERNÁNDEZ-MIRANDA

Diseño

MARÍA ARANJUELO FERNÁNDEZ-MIRANDA



Fotografía en portada de Eirik Johnson

Comité Científico

RUFINO JAVIER HERNÁNDEZ MINGUILLÓN
MATHEOS SANTAMOURIS
EDUARDO DE OLIVEIRA FERNANDES
FCO. JAVIER REY MARTINEZ
JOSÉ MARÍA P. SALA LIZARRAGA
LUÍS ALFONSO DEL PORTILLO VALDÉS
ANA GARCIA ROMERO
ELOY VELASCO GOMEZ
RUTH VEGA CLEMENTE
ISABELA VELÁZQUEZ VALORIA
ÁLVARO SOTO AGUIRRE
ENRIQUE GRANADA ALVAREZ
JOSE MARIA GONZALEZ BARROSO
JOAN LLUIS ZAMORA I MESTRE
SERVANDO ÁLVAREZ DOMÍNGUEZ
RAFAEL SALMERÓN LISSÉN
OLATZ IRULEGI GARMENDIA
MARÍA ARANJUELO FERNÁNDEZ-MIRANDA

Todos los capítulos de este libro han superado una evaluación externa llevada a cabo por al menos dos especialistas del prestigioso comité científico mediante el sistema de revisión por pares ciego

Edita

© SERVICIO EDITORIAL DE LA UNIVERSIDAD DEL PAÍS VASCO | EUSKAL HERRIKO UNIBERTSITATEKO ARGITALPEN ZERBITZUA
I.S.B.N. 978-84-1319-071-6

erman ta zabal zaazu



Universidad del País Vasco Euskal Herriko Unibertsitatea

ARKITEKTURA SAILA
DEPARTAMENTO DE ARQUITECTURA

Plaza de Oñati 2
20018 San Sebastián
T. + 34 943 018 406

© Citar como: Hernández_Minguillón, R., Irulegi, O., Aranjuelo_Fernández-Miranda, M. (Eds.). (2019). *Arquitectura Ecoeficiente* (Tomo II, 210 págs.). San Sebastián, España. Servicio Editorial de la UPV/ EHU

ARQUITECTURA ECOEFICIENTE TOMO II

2019



Arquitectura Ecoeficiente

TOMO II

Con este nuevo Tomo Arquitectura Ecoeficiente pretende consolidarse como referente bibliográfico tanto para estudiantes como profesionales interesados en la Sostenibilidad y la Eficiencia Energética en Arquitectura, Ingeniería y Urbanismo.

El Tomo II completa los contenidos académico-científicos publicados en Arquitectura Ecoeficiente Tomo I (2012) por el Servicio Editorial de la UPV/EHU que también puede descargarse en:

<http://web-argitalpena.adm.ehu.es>

Prólogo

Han pasado muchos años entre el primer tomo de esta colección y el segundo, pero ha merecido la pena esperar.

En la misma línea y con el mismo objetivo que la primera publicación, en esta nueva edición de Arquitectura Ecoeficiente se tocan brillantemente temas variados sobre eficiencia energética y sostenibilidad que muestran el carácter poliédrico de estas disciplinas.

La sostenibilidad y su relación con la ecología y la biodiversidad, con la arquitectura bioclimática y con las instalaciones eficientes, no es una opción hoy en día, es un compromiso de todos y una obligación moral. La arquitectura es un diente importante en ese engranaje que nos puede dirigir a un futuro viable o al abismo. Los edificios han sido y siguen siendo grandes consumidores directos de recursos, energía, agua, materiales, alimentos, y consumidores indirectos de otros recursos contaminantes, como los vinculados al transporte.

En mi opinión en la arquitectura, que es materialidad, hoy en día el mayor problema se encuentra en los materiales, como recurso, como energía gris necesaria para su gestión y como contaminante, y en el agua, que sin agotarse, pero también sin crearse, reduce su disponibilidad con el aumento preocupante de la población mundial.

Los materiales que se usan en la construcción no son sostenibles, salvo la notable excepción de la madera y los materiales de origen vegetal o animal, porque se agotan, sin posibilidad de vuelta atrás. La energía embebida en los materiales en general y en alguno en particular, a lo largo de su ciclo de vida es tan elevada que supera en cien veces el consumo de energía para el acondicionamiento de un edificio razonablemente bien diseñado. Es necesario replantearse cómo, cuáles, cuándo, dónde, usamos los materiales de construcción para revertir esta tendencia.

Para el agua nos quedan las opciones de reducir los consumos en los edificios, recoger agua de lluvia y tratar las aguas grises, pero sin olvidar el consumo que hacemos de agua en la fabricación de materiales y en su puesta en obra.

Los alimentos son otra entrada de energía al edificio, es la energía que hace funcionar parte de las máquinas que habitan los edificios, no las calderas, ni las televisiones, sino los seres humanos. Y esa cuantía se torna en significativa cuando tenemos en cuenta la empleada en el transporte de alimentos desde puntos alejados del punto de consumo. Las ciudades y las construcciones dentro de ellas deben recuperar esa vocación de autosuficiencia empezando a cultivar sus propios recursos y acercándolos al consumidor.

El transporte es el otro gran consumidor de energía que debe contabilizarse al edificio. Los ocupantes de un inmueble se tienen que desplazar a trabajar, comprar alimentos, llevar a sus hijos al colegio o a lugares de ocio, consumiendo una energía que tiene que ver con la distancia entre esos puntos. Es cierto que no es algo perfectamente controlable pero nunca se podrá hablar de un edificio ecoeficiente cuyos ocupantes gasten en el transporte cuatro o cinco veces más que en acondicionarlo.

Y parece que me olvido del problema de la energía consumida por el edificio, la necesaria para calentarlo, enfriarlo y ventilarlo, producir agua caliente sanitaria o dar suministro eléctrico a equipos, electrodomésticos y cualquier otro dispositivo. No, no me olvido, pero siendo potencialmente un grave problema es el que hoy en día somos capaces de resolver con mayor facilidad, porque tenemos conocimientos, tecnología y recursos renovables como para cubrir la demanda, que en el futuro lógicamente deberemos seguir reduciendo, haciendo a los edificios autosuficientes, de energía cero o de energía positiva.

El problema de la sostenibilidad y la ecoeficiencia es poliédrico, como se ve, y este libro también lo es, al abordar temas amplios y variados desde perspectivas distintas, lo que implica las visiones diferentes necesarias para resolver los problemas que tenemos. De no hacerlo así seguiremos el camino de la “sexta extinción” que señala esa falta de equilibrio entre las necesidades de las especies, en este caso la humana, y los recursos que consumimos a un ritmo muy superior a la capacidad de la Tierra para reponerlos. Sigamos las líneas que marcan estos magníficos textos, con instalaciones eficientes generadoras de energía, como los cogeneradores o las superficies radiantes, el uso de recursos renovables como la biomasa y abundemos en la rehabilitación de nuestras ciudades para consumir menos materiales.

Disfruten, aprendan y apliquen las enseñanzas de este libro.

Fco. Javier Neila González
Catedrático de la Universidad Politécnica de Madrid, E.T.S. de Arquitectura

Indice

| | |
|---|-----------|
| <i>Listado de Autores</i> | vi |
| 1 La Cogeneración en los Edificios | 1 |
| <i>Cogeneration in Buildings</i> | |
| JOSE MARIA SALA LIZARRAGA ADRIAN SALA OHARRIZ | |
| Introducción | 2 |
| Sistemas de Calefacción y Refrigeración de Distrito | 6 |
| La Microgeneración en los edificios | 8 |
| La Trigeneración en los edificios | 13 |
| Viabilidad de la Cogeneración en los edificios | 14 |
| Conclusiones | 15 |
| 2 La Biomasa como Energía Térmica Renovable | 19 |
| <i>Biomass as Thermal Renewable Energy</i> | |
| ENRIQUE GRANADA ALVAREZ RAQUEL PEREZ OROZCO JACOBO PORTEIRO DAVID PATIÑO | |
| Introducción | 19 |
| Aspectos Teóricos básicos para el Cálculo | 24 |
| Análisis del recurso Biomasa | 31 |
| Generación Térmica en Edificación. Calderas | 37 |
| Caso Práctico | 44 |
| Conclusiones | 48 |
| 3 Márgenes y Adaptaciones. Factores Variables para la Adecuación Energética de los Edificios | 52 |
| <i>Limits and Adaptations. Variable Factors for the Energy Performance Adaptation of Buildings</i> | |
| MARGARITA DE LUXÁN GARCIA DEDIEGO GLORIA GOMEZ MUÑOZ | |
| Introducción | 52 |
| Modelos de comprensión de la Naturaleza en sus Relaciones Ecológicas | 53 |
| Variaciones que dependen de Decisiones Políticas y Normativas | 55 |
| Variaciones en la composición del Mercado Energético | 55 |
| Variaciones por Efecto Rebote | 56 |
| Variaciones en los Precios de la Energía | 57 |
| Variaciones en el Clima | 58 |
| Variaciones en los Modelos de Confort | 59 |
| Variaciones en el Consumo Energético de los Edificios | 61 |
| Variaciones en la Población | 63 |
| Conclusiones | 63 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4 | Acondicionamiento por superficies radiantes | 66 |
| | <i>Radiant Surfaces Systems</i> | |
| | VICTOR ECHARRI IRIBARREN RAMON SANCHEZ RIBECHINI | |
| | Introducción | 66 |
| | Fundamentos Físicos de la Climatización por Superficies Radiantes | 67 |
| | Sistemas Hidrónicos de Tubo Capilar | 70 |
| | Paneles Radiantes y Paneles a Convección | 74 |
| | Confort Térmico | 76 |
| | Ahorros Energéticos frente a otros Sistemas de Climatización | 76 |
| | Utilización de Energía Solar y Geotérmica. Sistemas de Absorción, de Energía Química y Adsorción | 79 |
| | Proyectos | 88 |
| | Conclusiones | 95 |
| 5 | Premisas para un Proyecto de Arquitectura y Urbanismo más Ecoeficiente | 98 |
| | <i>Premises for a more Eco-Efficient Design in Architecture and Urbanism</i> | |
| | FERNANDO BAJO MARTINEZ DE MURGUIA | |
| | Introducción | 98 |
| | El Enfoque de CAVI-AR, Calidad de Vida en Arquitectura vs. Buena Vida | 99 |
| | Lo que parece claro es que hoy día se trata de dar más por menos | 100 |
| | Ante un nuevo Paradigma | 100 |
| | El Urbanismo Sostenible como marco de la Arquitectura Ecoeficiente. Casos de Estudio | 100 |
| | Conclusiones | 111 |
| 6 | Visión Económica de la Rehabilitación Energética de Vivienda Colectiva | 114 |
| | <i>A Collective Housing Energy Renovation Financial Vision</i> | |
| | EMILIO MIGUEL MITRE RAQUEL DIEZ ABARCA | |
| | Introducción | 114 |
| | Problemática | 116 |
| | Referentes de Éxito | 116 |
| | El Diálogo Económico como Aspecto Imprescindible | 117 |
| | Propuesta de “Visualizador” Económico sobre un caso concreto de Rehabilitación Energética de Vivienda Colectiva | 118 |
| | Conclusiones | 139 |
| 7 | Protocolo Gráfico EEE de Sostenibilidad y Eficiencia Energética en Arquitectura y Urbanismo | 142 |
| | <i>The Environmental and Energy Efficiency Graphical Protocol in Architecture & Urbanism</i> | |
| | MARIA ARANJUELO FERNANDEZ-MIRANDA | |
| | Introducción | 142 |
| | Concepto: Protocolo Gráfico EEE de Sostenibilidad | 144 |
| | ¿Por qué el Protocolo Gráfico EEE de Sostenibilidad? | 145 |
| | Principios y Requisitos para el desarrollo del Protocolo Gráfico EEE de Sostenibilidad | 146 |
| | Desarrollo y Metodología para su aplicación | 147 |
| | Ventajas de la aplicación del Protocolo Gráfico EEE de Sostenibilidad | 164 |



| | |
|--|------------|
| Conclusiones | 165 |
| 8 Rehabilitación Energética | 170 |
| <i>Energy Renovation</i> | |
| HELENA GRANADOS MENENDEZ | |
| Introducción | 170 |
| El Diagnóstico Energético | 172 |
| Las Escalas y el Entorno. Tipo Urbano, Edificatorio y Constructivo | 178 |
| Balance Energético y Actuaciones en la Envolvente Térmica | 189 |
| Casos Prácticos | 198 |
| Conclusiones | 202 |
| Agradecimientos | |

Listado de Autores

José M^a P. Sala Lizarraga | Adrián Sala Ohárriz

LA COGENERACION EN LOS EDIFICIOS

CAPITULO 1

José M^a P. Sala Lizarraga es Dr. Ingeniero Industrial y Dr. en Ciencias Físicas. Desde 1983 ocupa la Cátedra de Termodinámica y Fisicoquímica de la Escuela de Ingeniería de Bilbao (Universidad del País Vasco). Su actividad investigadora se ha desarrollado en el campo de la eficiencia energética de procesos industriales y edificios, con aplicación de la termoeconomía y el análisis exergético y en el del modelado y simulación de equipos e instalaciones energéticas. Durante ocho años simultaneó su actividad académica con la de Director Técnico de una empresa de ingeniería dedicada a estudios y proyectos de instalaciones energéticas. Es el coordinador del Área Térmica del Laboratorio de Control de Calidad en la Edificación del Gobierno Vasco. Ha escrito seis libros sobre Termodinámica y Transmisión de Calor y uno sobre Cogeneración y ha publicado ciento seis artículos en revistas nacionales e internacionales, siendo autor de tres patentes de carácter nacional.

Adrián Sala Ohárriz es Ingeniero en Organización Industrial y Máster en Logística Integral. Tiene también el certificado CPIM. Desde 2004 trabaja en el área de Operaciones de Accenture, habiendo intervenido en numerosos proyectos cuyo objetivo es el desarrollo y la optimización de los procesos de negocio. Ha publicado 1 artículo en revista internacional y ha participado en varios Congresos internacionales.

Enrique Granada Álvarez | Raquel Pérez Orozco | Jacobo Porteiro | David Patiño

LA BIOMASA COMO ENERGIA TERMICA RENOVABLE

CAPITULO 2

Enrique Granada Alvarez es Dr. Ingeniero Industrial y titular de Universidad en la Escuela de Ingeniería Industrial de la Universidad de Vigo. Como investigador disfruta del reconocimiento de tres tramos de investigación (CNEAI) siendo autor y coautor de 68 trabajos en publicaciones científicas indexadas en listados internacionales de referencia en el ámbito de la ingeniería -Science Citation Index, Journal Citation Report y similares. Por lo que respecta a la participación en proyectos competitivos de investigación el solicitante ha participado en 6 proyectos europeos, 7 proyectos nacionales (IP de 3 de ellos). Es miembro fundador y en activo del Grupo de Investigación de Tecnología Energética (GTE) de la Universidad de Vigo con reconocimiento de grupo de referencia competitiva.

Raquel Pérez Orozco es estudiante de doctorado en el programa de Eficiencia Energética y Sostenibilidad en la Ingeniería y la Arquitectura, siendo Ingeniera de Minas y Graduada en Ingeniería de la Energía por la Universidad de Vigo. Forma parte del Grupo de Tecnología Energética (GTE) de la Universidad de Vigo, centrando su investigación en el estudio de los procesos de combustión de biomasa y el desarrollo de tecnologías de reducción de emisiones.

Jacobo Porteiro es Doctor Ingeniero Industrial por la Universidad de Vigo, ha desarrollado su actividad en esta Universidad desde el 2001. En la actualidad es Profesor Titular de Universidad en el área de Máquinas y Motores Térmicos, acreditado a Catedrático. Entre el año 2012 y 2018 ha sido Director del Departamento de Ingeniería Mecánica Máquinas y Motores Térmicos y Fluidos y en la actualidad es Director del Área de Sostenibilidad, adjunto a la Vicerrectoría de Planificación de la Universidad de Vigo. Es coautor de más de 70 artículos científicos JCR y de más de 70 ponencias en Congresos Internacionales centrados en diferentes aspectos de la eficiencia energética, los motores térmicos y especialmente la combustión de biomasa y su modelado CFD. Desde el año 2014 es el representante de España en el Comité de Combustión de la IEA el cual ha presidido durante el año 2017.

David Patiño Vilas es Ingeniero Técnico Industrial en Mecánica (UVigo 2003). Ingeniero Industrial (UVigo 2006). Doctor por la Universidad de Vigo en 2009. Profesor Titular de Universidad desde 2014. Su actividad docente se centra principalmente en la Ingeniería Térmica y los Motores Térmicos. Sus intereses de investigación son la combustión de biomasa y otros sistemas de generación térmica de baja potencia así como la reducción de emisiones contaminantes en los mismos. Es coautor de más de 40 artículos JCR, más de 40 contribuciones a congresos nacionales e internacionales y participante en más de 20 proyectos de investigación subvencionados y/o en colaboración con empresa. Censor de revistas JCR (ATE, Fuel, Energy and Fuels...) y evaluador experto ANEP desde 2013. Disfruta de 2 sexenios de Investigación y actualmente es coordinador del Grado de Ingeniería de la Energía, coordinador del máster en Prevención de Riesgos Laborales y subdirector de Infraestructuras de la Escuela de Ingeniería de Minas y Energía.

Margarita de Luxán García de Diego | Gloria Gómez Muñoz

MARGENES Y ADAPTACIONES. FACTORES VARIABLES PARA LA ADECUACION ENERGETICA CAPITULO 3

Margarita de Luxán García de Diego es Dra. Arquitecta, Catedrática Emérita de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad Politécnica de Madrid. Ha dirigido el Seminario de Arquitectura Integrada en su Medio Ambiente, y ha sido miembro del Grupo de Investigación en Arquitectura Urbanismo y Sostenibilidad de la UPM.

Directora de 42 Proyectos de Investigación, Estudios y Trabajos sobre Arquitectura y Medio Ambiente, para Ministerios y Comunidades Autónomas. 3 Sexenios de Investigación reconocidos. Directora de 12 Tesis Doctorales leídas. 33 Artículos publicados en Revistas Profesionales reconocidas. 57 Ponencias y Comunicaciones en Congresos Internacionales, 16 de ellas como Ponente Invitada. 1 patente. Autora de 12 Libros y Publicaciones de Recomendaciones para adecuación energética y Edificaciones Bioclimáticas. Arquitecta Autora de Proyectos y construcciones de 76 Edificios y 5 Conjuntos Bioclimáticos, y de Rehabilitación Energética en distintos climas de la Península Ibérica y de las Islas Canarias, con sistemas de climatización pasivos y activos: viviendas aisladas, agrupadas, en bloque, conjuntos urbanos, edificios de enseñanza y oficinas, por encargo de entidades públicas y privadas. Ha tenido numerosos premios en concursos destacados nacionales e internacionales de edificios bioclimáticos y conjuntos urbanos, con directrices de integración medioambiental y de eficiencia energética.

Gloria Gómez Muñoz es Dra. Arquitecta por la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) desde junio de 2014 en el Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas de la ETSAM. Desde 2014 y en la actualidad está cursando el Grado en Ciencias Ambientales por la Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED). Ha realizado diversos cursos de especialización profesional y ha participado en más de 30 congresos nacionales e internacionales.

Desde 2003 trabaja en el Consejo Superior de los Colegios de Arquitectos de España, institución que representa de manera unitaria la profesión de arquitecto en el ámbito estatal e internacional. Desde allí ha participado en numerosos proyectos y actividades. En la actualidad coordina el área técnica, encargada de la coordinación de todos los aspectos técnicos y normativos que afectan a la edificación y el área cultural, que realiza actividades de difusión de la arquitectura y el urbanismo, como las Bienales de Arquitectura, realizadas en colaboración con el Ministerio de Fomento. Compagina esta actividad con la práctica profesional, desarrollada desde el año 1999, fecha en que fundó su propio estudio de arquitectura y en el que participa en la actualidad como arquitecta socia-fundadora. Ha colaborado en equipos multidisciplinares para el desarrollo de más de 30 proyectos de edificación donde pone en práctica las cuestiones especificadas en las líneas de investigación.

Víctor Echarri Iribarren | Ramón Sánchez Ribechini

CLIMATIZACION POR SUPERFICIES RADIANTES

CAPITULO 4

Víctor Echarri Iribarren es Dr. Arquitecto, profesor titular de Acondicionamiento y Servicios, y Director del Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la Universidad de Alicante. Máster en Facilities Management por la University of Strathclyde, Glasgow. Investigador en los campos de: Eficiencia Energética de edificios e impactos ambientales, además de soluciones de innovación en la aplicación de materiales cerámicos en Arquitectura. Dirige la Cátedra Cerámica de la UA (ASCER). Responsable del Grupo de Investigación “Tecnología y Sostenibilidad en Arquitectura” de la UA. Director del Programa de Doctorado “Arquitectura, Ciudad, Obra Civil y su Construcción”, de la UA. Es autor de más de 30 artículos técnicos y monografías y 4 patentes. Ha participado en más de 15 proyectos de investigación nacionales e internacionales. Ha realizado diversos proyectos de arquitectura siendo redactor de proyectos de ejecución y dirección de obras, algunos de los cuales han sido publicados.

Ramón Sánchez Ribechini es Ingeniero Industrial, Máster en Ingeniería Biomédica y Máster en Dirección de Proyectos por la Universidad Pública de Navarra. Ha desarrollado su actividad profesional ligado al mundo de la ingeniería y las instalaciones en campos de personal, riqueza, conocimientos, información, equipamiento, energía, materiales y procesos, con la finalidad de obtener productos o servicios útiles a la sociedad y con alta consideración al medio ambiente. Ha participado en la gestión y el desarrollo de proyectos en todas sus fases, desde la idea hasta la recepción definitiva de éste, aportando a todos ellos nuevas competencias, metodologías y recursos teóricos y prácticos. Su capacitación en Ingeniería Biomédica aporta nuevas dimensiones, como el bienestar térmico y la salubridad en el espacio interior, a su actividad principal como responsable de BeKa Klima Spain, centrando sus desarrollos en la climatización radiante capilar. Ha realizado colaboraciones con Universidades para el estudio, investigación y desarrollo técnico de soluciones radiantes capilares, centradas en eficacia, confort, flexibilidad, ahorro y salud.

Fernando Bajo Martínez de Murguía

PREMISAS PARA UN PROYECTO DE ARQUITECTURA Y URBANISMO MAS ECOEFICIENTE

CAPITULO 5

Fernando Bajo Martínez de Murguía es Doctor Arquitecto, Premio Extraordinario de Fin de carrera y Nacional de Estudios de arquitectura. Beca “La Caixa-Fulbright” para la continuación de estudios de arquitectura en los Estados Unidos. También es titulado superior en la rama de inglés por la Escuela Oficial de Idiomas de Zaragoza y Máster en Proyectos Arquitectónicos en el Instituto de Arquitectura del Sur de California SCI-Arc (Los Angeles CA).

Ha desarrollado su labor docente como profesor ayudante en la Escuela Superior de Arquitectura de Navarra, Departamento de Teoría de la Arquitectura y Humanidades, TA en el Instituto de Arquitectura del Sur de California en Los Angeles, SCI-Arc, y actualmente como Profesor Titular de Proyectos del Departamento de Arquitectura de la Escuela Superior de Arquitectura de Donostia-San Sebastián UPV-EHU.

Ha sido Director de Taller en el III Seminario Internacional de arquitectura de Montevideo, Universidad de la República del Uruguay, y profesor visitante en la misma universidad latinoamericana y en North Carolina State University USA. Habiendo también participado y liderado diversos proyectos de investigación de ámbito nacional e internacional. También es miembro del consejo asesor de Política Territorial del Gobierno Vasco. Del mismo modo publica regularmente su obra construida, así como diversos artículos académicos en diferentes revistas tanto nacionales como internacionales. Su experiencia profesional ha pasado por la administración en dos ocasiones, compaginando en la actualidad la labor docente y la práctica particular independiente.

Emilio Miguel Mitre | Raquel Díez Abarca

VISION ECONOMICA DE LA REHABILITACION ENERGETICA DE VIVIENDA COLECTIVA

CAPITULO 6

Emilio Miguel Mitre es Arquitecto, Máster en Planeamiento Medioambiental, Fulbright fellow, consultor energético y ambiental y coordinador de proyectos nacionales e internacionales. Ha realizado numerosos proyectos y edificios sostenibles premiados, desde el estudio ALIA, Arquitectura, Energía y Medio ambiente s.l., en particular en el marco de las World SB (Sustainable Building) Conferencias de 2002 Oslo, 2005 Tokio, 2008 Melbourne y 2011 Helsinki. Muy activo en transmisión de conocimiento de la sostenibilidad, con una considerable producción de artículos, conferencias, y cursos en programas educativos. Premio de Honor de Castilla y León de proyección internacional en Edificación Sostenible. Miembro fundador de GBCe y Director de Relaciones Internacionales desde 2008. Trabaja fundamentalmente en los siguientes ámbitos: Interacción con WorldGBC y participación en el Steering Committee y la Policy y Education Taskforces de la red europea de GBCs en representación de GBCe. Representación e GBCe en los foros internacionales. Coordinación mundial en representación de UNEP-SBCI, CIB, iiSBE y FIDIC del ciclo 2011-2014 de SB (ahora SBE) Conferencias, y representante Internacional de WSB14 Barcelona, organizada por GBCe. Promoción de la idea, desarrollo del proyecto y Coordinación internacional de la Acción de Coordinación y Apoyo BUILD UPON, proyecto Europeo Horizonte 2020, de 2014 a 2017. Colaboración con el Grupo de Trabajo de Rehabilitación GTR. Representación de GBCe en la campaña Renovate Europe. Proceso continuo de desarrollo de ideas innovadoras de proyectos, y elaboración de propuestas, fundamentalmente dentro del marco Horizon2020. Coordinador en España del proyecto Europeo Horizonte 2020 EeMap sobre hipotecas verdes. Participación en el proyecto MAKING-CITY liderado por CARTIF.

Raquel Díez Abarca es Arquitecta, Máster en Arquitectura y Desarrollo Sostenible por la Escuela Politécnica Federal de Lausanne (EPFL) y la Universidad Católica de Louvain (UCL), con el premio al mejor trabajo de investigación. Consultora en arquitectura bioclimática, ecodiseño, rehabilitación de edificios y eficiencia energética. Desde 2011 trabaja en GBCe en los siguientes ámbitos: Desarrollo de proyectos y elaboración de propuestas, principalmente en los programas de fondos europeos, sobre todo focalizado en Horizon 2020. En este ámbito desarrollo de Acción de Coordinación y Apoyo BUILD UPON, proyecto Europeo Horizonte 2020, de 2014 a 2017, como coordinadora adjunta. Participación en el proyecto

MAKING-CITY liderado por CARTIF, financiado también por el programa Horizon 2020. Desarrollo y revisión de herramientas para la certificación y ayuda al diseño sostenible VERDE. Impartición de formación en sostenibilidad, especialmente en el uso de las herramientas VERDE. Participación en jornadas sobre el estado del sector de la construcción en España y evaluación de la sostenibilidad de edificios. Coordinación en GBCe del proyecto Advancing Net Zero, liderado por World Green Building Council.

María Aranjuelo Fernández-Miranda

PROTOCOLO GRAFICO DE SOSTENIBILIDAD Y EFICIENCIA ENERGÉTICA EN ARQUITECTURA CAPITULO 7

María Aranjuelo Fernández-Miranda es Dra. Arquitecto. Máster en Sostenibilidad y Eficiencia Energética en Transporte, Industria, Edificación y Urbanismo en la UPV/EHU. Postgrado en Infografía en Arquitectura en la UPM. Ha sido Profesora en el Illinois Institute of Technology College of Architecture (Chicago, IL, USA) donde finalizó su Doctorado Internacional. Desde 2004 ha trabajado como arquitecto en estudios internacionales como Skidmore, Owings & Merrill LLP y Rafael de La-Hoz Arquitectos. Forma parte del Grupo de investigación CAVIAR -Calidad de Vida en Arquitectura- en la Universidad del País Vasco donde dirige la publicación Arquitectura Ecoeficiente. Es fundadora y directora de SARCH Sustainability & Architecture. Adora la ciudad pero le encanta la naturaleza. Su pasión son la Arquitectura, el Arte, la Naturaleza y la Sostenibilidad.

Helena Granados Menéndez

REHABILITACION ENERGÉTICA

CAPITULO 8

Helena Granados Menéndez es arquitecta, formada en la ETSAM de la Universidad Politécnica de Madrid. Desde el año 1991 su línea principal de trabajo se centra en la eficiencia energética en la edificación y el urbanismo y en la gestión medioambiental de los recursos y los residuos en la construcción, combinando tareas de consultoría, investigación y docencia para diferentes entidades. Ha trabajado como experta externa e investigadora para diferentes instituciones, participando en proyectos de investigación de escala transnacional, así como en comités de trabajo en el ámbito normativo relacionados con la eficiencia energética, la certificación energética y la gestión de RCD para diferentes ministerios y administraciones regionales y locales. Desde el año 2001 actúa como experta externa para la Comisión Europea y otros organismos internacionales, desarrollando tareas de evaluación y seguimiento de programas y proyectos relacionados con los citados campos, con especial incidencia en la regeneración urbana y la rehabilitación energética del entorno construido. Es autora única de varios libros en el campo de la eficiencia energética y el medio ambiente en la arquitectura y el urbanismo, y coautora en diferentes libros técnicos y manuales de Diseño dentro de proyectos europeos relativos a la eficiencia energética. Actúa como docente en las áreas de eficiencia energética en la edificación y el urbanismo y gestión de residuos de la construcción en diferentes masters universitarios y ha impartido más de 100 cursos monográficos para la formación de técnicos en dichas áreas.

La cogeneración en los edificios

La cogeneración en los edificios

Adrian Sala Oharriz ^a, José María P. Sala Lizarraga ^{b*}

^a Ingeniero. Gerente de Accenture, Bilbao, ^b Dr. Ing. Industrial y Dr. en Ciencias Físicas, Catedrático de Termodinámica Aplicada de la E.T.S.I. de Bilbao

Resumen

Tras hacer una presentación del concepto de cogeneración se pone de manifiesto el interés que, por el tipo de demandas energéticas, tiene la cogeneración en los edificios, tanto del sector servicios como residencial y las consiguientes ventajas que la cogeneración puede reportar, presentándose unos datos sobre potencias instaladas en ambos sectores, servicios y residencial. Se hace después un resumen de los principales parámetros energéticos que caracterizan a las plantas de cogeneración, destacando que es el rendimiento eléctrico equivalente el parámetro energético más importante, en cuanto que en él está basada la legislación española para evaluar si una planta de cogeneración puede o no ser inscrita en el Régimen Especial. Tras un breve resumen de la legislación europea y nacional sobre la cogeneración a lo largo de estos últimos años, se presenta un desglose de las ventajas y posibles inconvenientes que una planta de cogeneración puede reportar, tanto desde el punto de vista del inversor en cogeneración como bajo una perspectiva nacional.

A continuación, se inicia en el capítulo una segunda fase más tecnológica, comenzando por los sistemas de calefacción y refrigeración de distrito, describiéndose sus características más relevantes y las tecnologías utilizadas. Se hace un repaso a las tecnologías asociadas a la microcogeneración, como son los micromotores de combustión interna, las microturbinas y los motores Stirling, presentándose finalmente las características más relevantes de las pilas de combustible, la gran alternativa tecnológica del futuro inmediato. A continuación, se pone de manifiesto el interés de las plantas de trigeneración y se señalan las características más sobresalientes de los frigoríficos de absorción. Por último y para finalizar el capítulo, se describe la forma de abordar un estudio la viabilidad de un proyecto de cogeneración en edificios. Se presentan los métodos convencionales de dimensionamiento de los equipos principales frente a métodos más sofisticados, basados en la programación lineal entera y se hace una descripción de las etapas en un estudio de viabilidad, señalándose la conveniencia de realizar un estudio de sensibilidad.

Palabras clave: Cogeneración, Edificios, Microcogeneración, Trigeneración, Eficiencia Energética

Abstract

Once the concept of cogeneration is introduced, the high interest cogeneration can have in the residential and service sectors is remarked, given the characteristics of the energy demands in buildings with the consequent advantages cogeneration can report and some data on installed power in the residential and service sectors are provided. Then a summary of the main energy parameters that characterize a cogeneration plant are displayed, noting that the electrical equivalent efficiency is the most important parameter in the sense that the registration or not of a plant in the Spanish Special Regime is based on the value this parameter takes. After a brief overview on the European and Spanish legislation on cogeneration over recent years, a breakdown of advantages and disadvantages cogeneration can bring is put into consideration, both from the point of view of the investor and under a national perspective.

Then the chapter enters into a more technological phase, beginning with a description of the technologies and the most important features of district heating and cooling systems. Coming up next, a review of the technologies associated to microcogeneration appears, such as internal combustion micromotors, gas microturbines and Stirling engines, indicating the most relevant features of the fuel cells as the great promising alternative for the immediate future. The interest of trigeneration plants is showed as well as the most prominent features of the absorption refrigerators. To end the chapter, the way to address feasibility studies of cogeneration plants in buildings is described. Conventional methods of sizing the major equipment are considered along with more sophisticated ones based on integer linear programming. A portrayal of the steps in a feasibility study is displayed, noting the desirability of conducting a sensitivity study.

Keywords: Cogeneration, Buildings, Microcogeneration, Trigeneration, Energy Efficiency

* josemariapedro.sala@ehu.es

Citar como: Sala Oharriz, A., Sala Lizarraga, J. M. P. (2019). La cogeneración en los edificios. En R. Hernández_Minguillón, O. Irulegi, M. Aranjuelo_Fernández-Miranda (Eds.), *Arquitectura Ecoeficiente* (Tomo II, pp. 1 – 18). San Sebastián, España. Servicio Editorial de la UPV/EHU

1. Introducción

1.1. Concepto de cogeneración

La cogeneración se puede definir como la producción secuencial de electricidad y energía térmica (muchas veces se le denomina calor) útil a partir del mismo combustible. Frente a la situación convencional en la que la electricidad es comprada de la red y la energía térmica útil es generada en las propias instalaciones mediante calderas u otros equipos térmicos, la cogeneración implica la generación simultánea de ambos productos, electricidad y energía térmica útil.

Los sistemas de cogeneración tienen en cuenta el concepto termodinámico de calidad de la energía (exergía). Tomando a la energía mecánica como energía de referencia, si bien la energía eléctrica es totalmente transformable en trabajo, no ocurre lo mismo con la energía térmica, siendo así que cuanto mayor sea su temperatura (nivel térmico) más fácil es su transformación en energía mecánica. El uso de un combustible fósil permite obtener temperaturas superiores a 1.000°C y es un mal uso de su calidad energética generar exclusivamente vapor (a temperaturas del orden de 200°C) o agua caliente (a 80 °C). Los sistemas de cogeneración utilizan el combustible para generación de energía eléctrica y simultáneamente calor útil al usuario (en forma de vapor, agua caliente, o incluso agua fría).

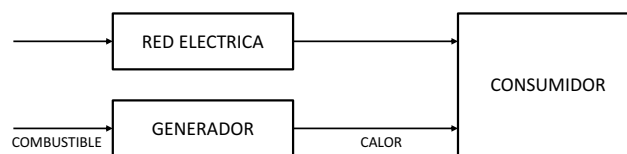
Cuando en una fábrica, hotel, urbanización, bloque de viviendas o vivienda unifamiliar se decide instalar una planta de cogeneración, se continuará conectado a la red eléctrica. Debido a las fluctuaciones de la demanda, habrá momentos en que la producción eléctrica será menor que esa demanda, en cuyo caso el déficit se importará de la red, mientras que si la producción resulta mayor que la demanda el excedente se revierte a la red. De hecho, dependiendo de las condiciones económicas y las posibles restricciones existentes, podría ser interesante vender a la red toda la electricidad generada (en España esta situación no está permitida) y seguir comprando la electricidad consumida, como un cliente que no tuviera cogeneración.

Respecto a la demanda térmica, si ésta fuera mayor que la producción de la cogeneración, será necesario utilizar un sistema auxiliar complementario, tal como una caldera auxiliar, etc. Si la demanda térmica disminuye se puede, o bien regular la potencia de la planta, o utilizar un sistema de almacenamiento de energía, que va a permitir dimensionar de forma más adecuada la planta e incluso producir la electricidad en las horas en que su venta suponga un mayor beneficio.

En la Fig. 1 se presenta un esquema que muestra la diferencia entre una situación sin cogeneración (convencional) y cuando se ha instalado una planta de cogeneración.

Los fundamentos de la cogeneración pueden consultarse en la amplia bibliografía existente, entre las que destacamos las obras de Polimeros [1], Marecky [2], Sala [3], Horlock [4] y Petchers [5].

SISTEMA CONVENCIONAL



COGENERACIÓN

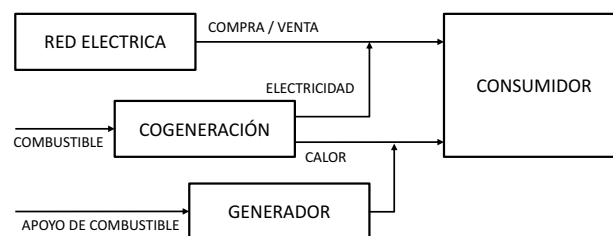


Fig. 1. Comparativa entre la situación sin y con cogeneración (elaboración propia).

La cogeneración puede aportar importantes ahorros energéticos y beneficios económicos, al mismo tiempo que reduce el impacto ambiental. En nuestro país esto ha sido comprobado fehacientemente en las últimas décadas en el sector industrial, donde su incorporación en numerosas grandes y medianas empresas ha logrado una disminución considerable del consumo energético por unidad de producto.

1.2. La cogeneración en los edificios

Los edificios del sector residencial y terciario (oficinas, hoteles, hospitales, escuelas, centros deportivos, centros comerciales) demandan energía final en forma de electricidad y energía térmica. La demanda eléctrica es debida al consumo en iluminación, ascensores, bombeo de agua, electrodomésticos, climatización, etc. en tanto que la demanda térmica es para calefacción, agua caliente sanitaria (ACS), refrigeración, climatización de piscinas, etc.

El sector de la edificación es un gran consumidor de recursos energéticos. En Europa, los edificios son responsables del 40% del consumo de energía final (del cual el 26,7 % corresponde a los hogares) y del 50% de las emisiones de CO₂ a la atmósfera, Parlamento Europeo 2013 0. En España esos porcentajes son algo menores, de manera que en el año 2015 los edificios representaron el 29,8 % de la energía final consumida, siendo el sector residencial responsable del 18,6 % y el sector servicios (escuelas, hospitales, comercios, oficinas y restaurantes) del restante 11,2 %, IDAE 2013 **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

El aumento del confort en los edificios y la expansión continua de las ciudades durante los últimos años ha hecho que aumente de forma notable el consumo de energía del sector residencial. A nivel mundial la tendencia actual se dirige hacia un incremento de los consumos de manera muy alarmante. De acuerdo con el *International Energy Outlook*

2016, para el sector de la edificación se prevé un incremento medio anual entre 2012 y 2040 del 1,5 %, con un crecimiento del 2,1% para los países que no forman parte de la OCDE, que es casi tres veces el crecimiento previsto para los países de la OCDE. Por razones de seguridad en el abastecimiento y de economía en el suministro energético, estos datos ponen de manifiesto la necesidad de dotar al sector de los edificios de sistemas energéticos eficientes.

En las conclusiones de algunos proyectos europeos, como CHOSE (2001) [8], TRIGEMED (2003) [9] y SUMMERHEAT (2009) [10], se destaca que sólo se ha desarrollado una mínima parte del potencial de la cogeneración en el sector residencial-comercial de la UE, quedando todavía un gran mercado por explotar.

Una revisión de los datos sobre el estado de la cogeneración en España (IDAE, 2011) [11] revela que la cogeneración está poco extendida en el sector servicios: i) 108 instalaciones frente a un total de 693 (<16%), ii) con una potencia eléctrica instalada de 627 MW frente a un total de 6125 MW (~10%), y iii) con una producción eléctrica anual de 3460 GWh frente a un total de 31515 GWh (~11%). El estudio del IDAE de 2004 señalaba un potencial tecnológico para el sector residencial y terciario de 6.414 MWe, con un grado de penetración de solamente el 3 %, lo que indica claramente que prácticamente está todo por hacer.

La cogeneración aporta un rendimiento energético elevado en la utilización del combustible consumido, del que se derivan un beneficio económico y un menor impacto ambiental. Además, los sistemas de cogeneración pueden proporcionar los servicios energéticos más demandados en los edificios: electricidad, ACS, calefacción y refrigeración (acoplando enfriadoras de absorción). Por otro lado, el gas natural es el combustible consumido mayoritariamente.

Así pues, las demandas de electricidad, calor y frío de los edificios representan una oportunidad para los sistemas de cogeneración capaces de producir estos productos de forma eficiente y económica. La magnitud de la demanda de energía térmica de los edificios varía mes a mes a lo largo del año y hora a hora a lo largo del día, debido a su carácter estacional (calefacción en los meses fríos y refrigeración durante los meses cálidos) y al régimen de utilización que imponen sus usuarios.

En el caso de España, la demanda de energía térmica de los edificios de los sectores residencial y comercial presenta dos características singulares: (i) bajo número de horas anuales de requerimiento de calor y frío, y (ii) reducidos períodos de tiempo de máximas demandas de calor y frío. Estas singularidades representan un desafío de cara al diseño del sistema de cogeneración, es decir, de cara a definir la planta cuyo coste total (inversión y operación) a lo largo de su ciclo de vida útil sea menor que el de otras alternativas de suministro

Además de los aspectos comentados, hay cuatro buenos argumentos para favorecer la participación de la cogeneración en el suministro de servicios energéticos a los edificios y distritos urbanos en España: i) disponibilidad de los combustibles empleados (gas natural principalmente),

ii) demanda de sus productos, iii) baja penetración actual, y iv) como se comentará más adelante, un apoyo político que se traduce en unas Directivas europeas, que tienen posteriormente su transposición en la legislación de los estados miembros.

En definitiva, la cogeneración puede aportar sistemas de alta eficiencia que ahorran energía primaria, contribuyendo a mejorar la intensidad energética, el grado de autoabastecimiento y la seguridad de suministro.

1.3. Parámetros energéticos

A continuación, vamos a definir una serie de parámetros que nos permiten caracterizar el comportamiento energético de una planta de cogeneración. Supongamos que el sistema de cogeneración es una caja negra, tal y como se representa en la Fig. 2, que consumiendo F unidades de energía de combustible (poder calorífico inferior) produce simultáneamente W unidades de trabajo y Q unidades de energía térmica útil. Definimos los siguientes parámetros energéticos:

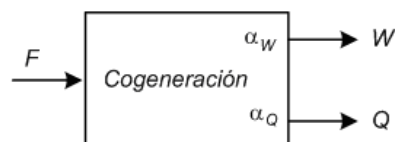


Fig. 2. Planta de cogeneración (M.A. Lozano, Universidad de Zaragoza).

- rendimiento eléctrico $\alpha_W \equiv W/F$
- rendimiento térmico $\alpha_Q \equiv Q/F$
- rendimiento global $\eta \equiv (W + Q) / F$
- relación calor-electricidad $\beta \equiv Q / W$

Por lo tanto, para caracterizar completamente la planta desde un punto de vista energético, es necesario conocer 3 variables independientes de entre las 7 (F , W , Q , α_W , α_Q , β , η).

Otro tipo de parámetros energéticos expresan la ventaja comparativa de la cogeneración sobre los sistemas convencionales de generación de calor útil y electricidad. Para definirlos, consideremos un sistema convencional, ver Fig. 3, que produce las mismas cantidades de electricidad y energía térmica que la planta de cogeneración a la que antes nos hemos referido.

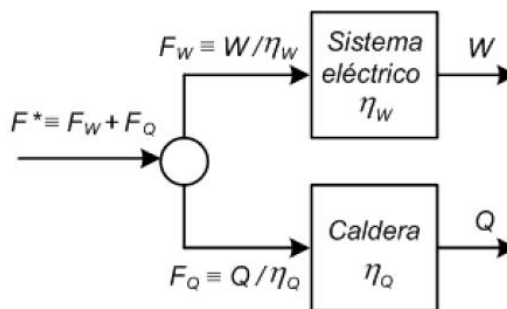


Fig. 3. Sistema convencional (M.A. Lozano, Universidad de Zaragoza).

Supóngase que se ha de suministrar W y Q para satisfacer las demandas del consumidor. Éste debe decidir entre instalar un sistema de cogeneración o proceder de modo convencional comprando energía eléctrica a la compañía distribuidora (que se supone la ha producido con rendimiento η_W) e instalando una caldera de rendimiento η_Q para producir la energía térmica. El *ahorro de energía primaria* que implica la cogeneración será:

$$\Delta F \equiv F^* - F = \frac{W}{\eta_W} + \frac{Q}{\eta_Q} - F \quad [E. 1]$$

Relacionado con este concepto, se define el *índice de ahorro de energía primaria IAF (Fuel Energy Saving Ratio)*, como el ahorro de combustible por unidad de energía requerida en el modo convencional de aprovisionamiento. Expresado en tanto por ciento este índice se conoce como *PES (Percentage Energy Saving)*

$$IAF \equiv \frac{\Delta F}{F^*} = 1 - \frac{F}{\frac{W}{\eta_W} + \frac{Q}{\eta_Q}} = 1 - \frac{1}{\frac{\alpha_W}{\eta_W} + \frac{\alpha_Q}{\eta_Q}} \quad [E. 2]$$

El último parámetro que vamos a considerar es el *rendimiento eléctrico equivalente (REE)*, cuya definición proviene de utilizar un criterio particular a la hora de repartir el consumo de combustible entre los dos productos del sistema de cogeneración. Concretando, una caldera convencional de rendimiento η_Q consumiría el combustible $F_Q = Q/\eta_Q$ para producir el calor útil Q , por lo que el consumo de combustible atribuible a la electricidad producida en la planta de cogeneración podemos considerar que es:

$$F_{eqW} = F - F_Q \quad [E. 3]$$

Así, el rendimiento eléctrico equivalente se define como:

$$REE \equiv \frac{W}{F_{eqW}} = \frac{W}{F - Q/\eta_Q} = \frac{\alpha_W}{1 - \alpha_Q/\eta_Q} \quad [E. 4]$$

Los valores de W , F y Q son valores anuales y, por tanto, igualmente los rendimientos son anuales. Obsérvese cómo los parámetros *IAF* y *REE* ponen especial énfasis en averiguar si los sistemas de cogeneración transforman con mayor eficiencia la energía consumida en productos útiles (energía térmica y electricidad) que los sistemas convencionales.

De acuerdo con la legislación vigente, para ser considerado cogenerador y poder inscribir la planta en el Régimen Especial y tener por lo tanto los derechos y obligaciones correspondientes, entre ellos el derecho a vender la electricidad cogenerada a la red, es necesario que el *REE* sea superior a un valor mínimo. En la Tabla 1 se recogen los valores mínimos del Real Decreto 661/2007.

Tabla 1
Valores mínimos del REE

| Tecnología y combustible | REE Mínimo | REE Mínimo $P \leq 1MW$ |
|---------------------------------------|------------|----------------------------|
| Motores térmicos. Combustible líquido | 56,0% | 50,4 % |
| Motores térmicos. Gas natural y GLP | 55,0% | 49,5 % |
| Turbinas. Gas natural y GLPs | 59,0% | 53,1 % |

Como puede apreciarse en la Tabla, para instalaciones con potencia eléctrica $P \leq 1MW$ el valor del REE_{min} exigido es un 10 % inferior. Para la verificación del cumplimiento del REE se deben instalar equipos de medida locales y totalizadores para cada uno de los parámetros implicados (W , F , Q).

Finalmente, la disminución de emisiones de CO_2 es un criterio ambiental que puede calcularse directamente a partir del ahorro de combustible, en el caso de que éste sea el mismo para cogeneración que para la producción convencional. En caso de que los combustibles sean diferentes, la disminución de emisiones de CO_2 será:

$$\Delta CO_2 \equiv cF_W \frac{W}{\eta_W} + cF_Q \frac{Q}{\eta_Q} - c_F F \quad [E. 5]$$

donde:

- cF_i es la emisión de CO_2 por unidad de energía en el combustible i .

1.4. Breve resumen de la legislación sobre la cogeneración

En España por primera vez se hizo referencia a la cogeneración en la *Ley 82/1980 sobre Conservación de la Energía*, promulgándose posteriormente el *Real Decreto 907/1982 de Fomento de la Autogeneración Eléctrica*. La *Ley 40/1994 de Ordenación del Sistema Eléctrico (LOSEN)* incluyó el Régimen Especial en el Sistema Integrado, estableció que los productores podrían incorporar su potencia excedentaria al sistema eléctrico y fijó una potencia máxima para las plantas de cogeneración de 100 MVA.

La *Ley 54/1997 del Sector Eléctrico* reguló el futuro marco de libre mercado y marcó las condiciones para el periodo de transición. En lo que respecta al Régimen Especial fijó la potencia máxima para las plantas de cogeneración en 50 MW, introduciendo el concepto de prima de venta y estableciendo un porcentaje de autoconsumo.

A través de las *Directivas 2002/91/CE sobre eficiencia energética en los edificios* (DiarioUE-1, 2003), *2004/8/CE sobre fomento de la cogeneración* (Diario UE-52, 2004), *2006/32/CE sobre eficiencia del uso final de la energía y los servicios energéticos* y *2012/27/UE relativa a la eficiencia energética*, la Unión Europea reconoce que la cogeneración es una tecnología estratégica que contribuye a garantizar el suministro energético y disminuye la dependencia energética, y por ello recomienda su empleo en edificios con superficie total mayor de 1000 m².

En España se promulgó el *Real Decreto Ley 7/2006*, que modificó la *Ley 54/1996* y por el que se eliminó la obligatoriedad de autoconsumo, posibilitando incorporar al sistema toda la electricidad neta producida y anunciando un nuevo marco económico para desarrollar la cogeneración.

Este nuevo marco se concretó en el *Real Decreto 616/2007*, por el que se incorporó al derecho español la *Directiva 2004/8/CE*. En las Disposiciones Generales del Cap. I se presentan una serie de definiciones, entre ellas la microcogeneración, de potencia menor a 50 kW y la cogeneración de pequeña escala, aquella de potencia inferior a 1MW.

En el Cap. II se definió la cogeneración de alta eficiencia como aquella para la que el PES es superior al 10%, salvo para las unidades de microcogeneración y cogeneración a pequeña escala para las que se exigió únicamente que el PES fuera positivo. En una serie de Anexos se establecieron las tecnologías de cogeneración consideradas y se definió el método de determinación de la eficiencia del proceso de cogeneración.

Así mismo, se promulgó el *Real Decreto 661/2007 sobre fomento de la cogeneración* (BOE-114, 2007), por la necesidad de regular ciertos aspectos técnicos para contribuir al crecimiento de la cogeneración, y la necesidad de modificar el esquema retributivo desligándolo de la Tarifa Media o de Referencia. Se establecieron unos objetivos de potencia instalada de referencia, coincidentes con los del PER 2005-10 y con la EAEE y se mantuvo un sistema económico análogo al del *Real Decreto 436/2004*. Este Decreto es complementado por el *RD 314/2006 Código Técnico de la Edificación* (BOE-74, 2006), y el *RD 47/2007 sobre certificación energética de edificios* (BOE-27, 2007).

Posteriormente se aprobaron una serie de Leyes y Decretos, como el *Real Decreto 222/2008*, que integró la garantía de potencia a la prima de modo retroactivo, el *Real Decreto 1578/2008*, que favorecía la economía de plantas de cogeneración con programas de trabajo cortos, las *Guías Técnicas* para la medida del calor útil y el PES del año, el *Real Decreto-ley 6/2009* por el que se aprobó el bono social, etc.

Más recientemente se publicó el *Real Decreto 1565/2010* (BOE 19-11-2011), por el que se regularon y modificaron determinados aspectos relativos a la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial. Especialmente perjudicial para el desarrollo de la cogeneración fue el *Real Decreto-ley 1/2012*, de 27 de enero, por el que se procedió a la suspensión de los procedimientos de preasignación de retribución y a la

supresión de los incentivos económicos para nuevas instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de cogeneración, fuentes de energía renovables y residuos.

Tras la aprobación de la *Ley 24/2013 del Sector Eléctrico*, en el BOE de 10 de junio de 2014 se publicó el *Real Decreto 413/2014* por el que se regula el régimen jurídico y económico de la cogeneración. En su Título II se establecen los derechos y obligaciones de las instalaciones de cogeneración, en el Título III su participación en el mercado eléctrico y en su Título IV el régimen retributivo específico. En definitiva, mucha regulación cambiante y compleja en pocos años.

1.5. Ventajas e inconvenientes de la cogeneración

La problemática energética que afecta a los países de la UE y a España en particular se puede resumir en los siguientes puntos, extraídos del Libro Verde editado por la Comisión Europea: 1) la UE es extremadamente dependiente de los suministros externos de energía; 2) las emisiones de gases de efecto invernadero están aumentando, haciendo difícil hacer frente a los desafíos del cambio climático y a los compromisos del Protocolo de Kyoto; y 3) la UE tiene una capacidad muy limitada para influir en las condiciones de suministro energético.

Ante esta situación, además de la promoción de la electricidad a partir de las energías renovables, se consideran otros sistemas que diversifiquen y hagan más estable la producción, como es la cogeneración. Dado que los ciclos combinados son las centrales de referencia para la nueva potencia a instalar en base a energía fósil, las plantas de cogeneración deben tener unos rendimientos equivalentes superiores a los de esas centrales, produciéndose entonces ahorros de energía y evitándose además pérdidas en el transporte y distribución. Efectivamente, esta producción distribuida, cercana a los centros de consumo, contribuye adicionalmente a reducir o anular las pérdidas de transporte y distribución de electricidad y evita inversiones en estos subsistemas.

Asimismo, las plantas de cogeneración aportan en su conjunto una gran disponibilidad y garantía de potencia al sistema, lo que redundará en la calidad del suministro, sin provocar efectos negativos derivados de sus emplazamientos.

En síntesis, los beneficios asociados al desarrollo de la cogeneración y que son los que motivan la promoción de la misma son, Cogen España 2002 [12]:

- Aumento de la garantía de potencia en el conjunto del sistema eléctrico durante los periodos en que más se precisa.
- Ahorros en la balanza de pagos, por reducción de las importaciones de combustibles derivados del petróleo o gas natural, debido a su mayor eficiencia.
- Reducción de pérdidas de transporte y distribución y ahorro de inversiones en el sistema eléctrico de cada país miembro.

- Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y contribución a alcanzar los objetivos del Protocolo Kyoto.
- Aumento de competitividad dentro del sector eléctrico y de gas, al incrementar el número de operadores del mercado y al desarrollarse nuevas industrias (pequeñas y medianas) para el soporte de la cogeneración.
- Incremento de las actividades de investigación y desarrollo de nuevos procesos, equipos y sistemas que permitan incrementar la eficiencia energética global.
- Mejora de la competitividad de los usuarios de cogeneración, al disponer de energía a precios más competitivos.

Desde el punto de vista del cogenerador, es evidente que solamente se acometerá la inversión cuando ésta sea rentable, es decir, cuando la reducción en la factura energética rentabilice la inversión requerida. Es claro que la rentabilidad de la cogeneración es tanto más elevada cuanto mayor sea el diferencial de precios entre la electricidad y el combustible, generalmente el gas natural. Por ello, uno de los inconvenientes asociados es la política de precios energéticos y el riesgo que ello conlleva, así como el cambio de la normativa reguladora. Por otra parte, la cogeneración implica un mayor consumo de combustible a nivel local (se genera también electricidad) con el consiguiente aumento de la contaminación local.

2. Sistemas de calefacción y refrigeración de distrito

Una red centralizada de climatización o de distrito (DH&C) tiene como objetivo proveer distintos edificios o centros de consumo con toda la energía térmica demandada (calefacción y/o refrigeración) para su climatización, generando esta energía en una instalación centralizada, la central de producción. Los edificios se conectan con la central mediante una serie de redes de distribución de fluidos térmicos, controladas y reguladas desde la central, Fogelholm y col 2008 [13].

Un aspecto importante de estas redes es la posibilidad de utilizar sistemas de almacenamiento de energía térmica (TES), tanto de calor como de frío. La utilidad de los TES es doble: por un lado, permiten disminuir la potencia instalada y al mismo tiempo posibilitan un funcionamiento continuo de los equipos, en régimen de rendimiento óptimo, sin variaciones repentinas de carga. Este hecho implica unos consumos más ajustados, una eficiencia media más alta y una vida útil de los equipos más larga. La dificultad estriba en que, con frecuencia, el almacenamiento requiere de grandes volúmenes que deben ubicarse dentro del entorno urbano, ya de por sí con muchas restricciones de espacio disponible para infraestructuras de servicios, Campos 2011 [14]. De ahí el interés en la utilización de los materiales de cambio de fase (PCM), con una densidad de energía mucho más elevada y capaces de ceder el calor a una temperatura constante.

Los sistemas DH&C constan de una *central generadora*, que generalmente es una planta de cogeneración, ya que la

combinación de la cogeneración con la calefacción de distrito es altamente eficiente. No obstante, dependiendo de las fuentes de energía locales, podemos incluso encontrarnos instalaciones basadas en energías menos convencionales y en algunos casos renovables, como la biomasa o la geotérmica, plantas convencionales apoyadas por energía solar, plantas que aprovechan calores residuales, bombas de calor con calderas convencionales, etc.

Una vez generada, la energía térmica es distribuida a los consumidores mediante una *red de tuberías* aisladas, red que consta de tuberías de ida y de retorno. En la Fig. 4 se muestra un esquema de un DH&C. El fluido caloportador utilizado suele ser agua o vapor. La ventaja del vapor es que, además de para aplicaciones de calefacción, puede tener usos industriales por su alta temperatura. Como desventaja, el vapor presenta mayores pérdidas de calor en el transporte, precisamente por su alta temperatura.

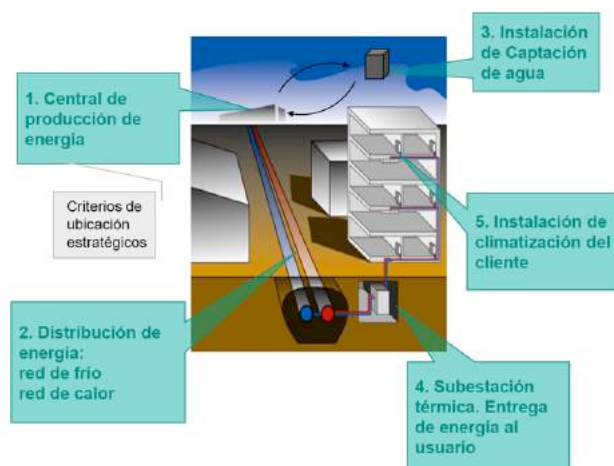


Fig. 4. Esquema de una instalación de calefacción de distrito (districlima, octubre 2008).

El *sistema de bombeo* del fluido caloportador por la red de distribución está diseñado para vencer las pérdidas de carga, tanto en las tuberías de ida como de retorno, para aportar así el fluido a la subestación del cliente en unas condiciones de presión aptas para el servicio.

La red principal de distribución, ver Fig. 5, se conecta con los sistemas de calefacción y agua caliente sanitaria de los usuarios a través de intercambiadores de calor o directamente; es lo que se conoce como sistemas directos e indirectos. Los sistemas directos operan con temperaturas de ida de 85 a 65 °C y de retorno de 68 a 34 °C, mientras que los indirectos operan a mayores temperaturas, entre 140 y 75 °C.



Fig. 5. Tuberías de distribución (districlima mayo 2009).

Existe habitualmente un centro de *control y monitorización*. El control de la temperatura y de la presión en cada momento asegura que el sistema responde a la demanda de los consumidores. Para ello se colocan en puntos estratégicos del sistema equipos medidores y transmisores de dichas variables.

La *subestación*, o estación contadora, es un sistema colocado en el lado del consumidor, normalmente en el sótano o planta baja del edificio del abonado, Fig. 6. Modifica el estado de la energía térmica para que se adapte a los requerimientos del consumidor, y debe satisfacer un equilibrio entre la demanda del consumidor y el calor generado por la empresa suministradora, IEA 2000 [15].



Fig. 6. Subestación de un sistema de calefacción de distrito (districlima mayo 2009).

Las instalaciones de calefacción de distrito, ligadas por lo general a centrales termoeléctricas, han tenido mucha presencia en países del Norte, Centro y Este de Europa, y en otros países como Rusia, China y Estados Unidos, donde

han demostrado su valía energética, económica y ambiental (EHP, 2009).

El proyecto ECOHEATCOOL (2006) estudió 32 países (EU-27 + Croacia, Turquía, Islandia, Noruega y Suiza) y concluyó que en Europa existe todavía un gran mercado potencial para la calefacción y refrigeración de distrito.

En el marco del proyecto europeo SUMMERHEAT (2009) se realizaron estudios en ciudades de diferentes países (Alemania, Austria, Dinamarca, Francia, Polonia y República Checa) sobre la posibilidad de implementar instalaciones de refrigeración con enfriadoras de absorción, que utilizan el calor residual de las plantas de cogeneración como fuente energética. Se concluyó que era interesante implementar sistemas de refrigeración de distrito que empleen enfriadoras de absorción accionadas con el calor residual de las plantas de cogeneración.

En lo que respecta a España, en ciertos lugares y/o edificios se da una baja demanda de calefacción anual. En otros, la ausencia de demanda de frío durante los meses del verano perjudica la rentabilidad de los proyectos de cogeneración y calefacción de distrito, pues la baja potencia instalada y/o un factor de utilización reducido ralentiza el tiempo de recuperación de la inversión. Ocurre, sin embargo, que la tendencia a consumos más elevados de aire acondicionado en el sector de los edificios viene provocando un incremento significativo de la demanda de electricidad en verano.

De acuerdo con ADHAC (Asociación de Redes de Calor y Frío) en el año 2016 en España había un total de 330 redes, de las que 306 estaban censadas, con una potencia instalada de 1.219 MW. De esta potencia el 73% es para calefacción y el 27% para frío. Del total de redes, la mayor parte de las mismas (225) utilizan energías renovables, principalmente biomasa (218), siguiéndole en número el gas natural (41). Si lo miramos por potencia instalada, el porcentaje mayor corresponde al gas natural (47,4 %) seguido de renovables (31,4 %), después electricidad (18,8 %) y finalmente gasóleo (2,4 %). La potencia instalada se distribuye de la siguiente manera: un 13% en la industria, 35% en el sector residencial y 52% en el sector servicios.

El número mayor de redes se encuentra en Cataluña (91), seguida de Castilla y León (43), estando el resto distribuido por las diferentes Comunidades Autónomas. El conjunto de estas redes, que suman 550 km y abastecen a 4.030 edificios, permiten lograr una reducción de emisiones de CO₂ de 180.000 t/año. Algunas instalaciones significativas son las siguientes:

- Molins de Rei (Barcelona): 2,25 MW de calor (IDAE, 2007).
- Cuellar (Segovia): 6 MW de calor (IDAE, 2007).
- Sant Pere de Torelló (Barcelona): 6 MW de calor (IDAE, 2007).
- ExpoZaragoza (Zaragoza): 15/20 MW de calor/frío (DISTRICLIMA, 2012).
- Central Tanger (Barcelona): 13,4/6,7 MW de calor/frío (DISTRICLIMA, 2012).
- Central Forum (Barcelona): 20/15,5 MW de calor/frío (DISTRICLIMA, 2012).

3. La microgeneración en los edificios

La penetración de la cogeneración en el sector residencial y mediano y pequeño terciario se puede realizar con sistemas individuales, sistemas semi-centralizados o sistemas altamente centralizados. Las instalaciones de micro cogeneración utilizan diversas tecnologías y cada una de ellas tiene una serie de ventajas e inconvenientes. Vamos a presentar una relación de las tecnologías más importantes y actualmente más usadas, haciendo un resumen de sus características más sobresalientes.

3.1. Micromotores de combustión interna

Los motores alternativos son una tecnología perfectamente conocida y asentada debido a su extensiva implantación en el sector del transporte. Como una derivación de ellos surgieron los motores para aplicaciones estacionarias, ya sea como grupos de emergencia, principalmente con motores diésel, o como motores en aplicaciones de cogeneración industrial. En éstas los grandes motores (decenas de MWe) son de gasóleo o fuelóleo, mientras que los de menores potencias (por debajo de unos 10 MWe) son principalmente de gas natural u otros combustibles ligeros. En la actualidad, existen motores alternativos de gas natural de pequeño tamaño (desde unos 5 kWe) adecuados para aplicaciones de cogeneración en el sector residencial, que son conocidos como *micromotores*.

Un motor alternativo dispone de hasta cuatro fuentes de calor recuperable: gases de escape, agua de refrigeración del motor, agua de refrigeración del aceite y agua de refrigeración del turbocompresor (motores sobrealimentados). En los motores pequeños normalmente no se dispone de la última, si bien pueden aprovecharse otras fuentes de calor, como la refrigeración del alternador, Pulkravek 2004 [16].

Los micromotores alternativos de gas natural son la opción más adecuada para sistemas de cogeneración en el sector residencial, ya que tienen un bajo coste de adquisición y son fáciles de instalar y mantener, tienen una alta fiabilidad y eficiencia y un bajo nivel de emisiones. Los motores pequeños se comercializan normalmente en unidades encabinadas con todas las fuentes de calor integradas, de modo que el calor disponible se entrega en forma de una única corriente de agua caliente hasta 110 °C. En la Fig. 7 se presenta dos imágenes de un micromotor.



Fig. 7. Imágenes de un micromotor (cortesía de ALTARE).

Los micromotores disipan calor a través del circuito de agua de refrigeración y de los gases de escape. Mediante sendos intercambiadores de calor se recupera la energía de ambas fuentes de calor, para finalmente producir agua caliente que pueda ser usada para calefacción y producción de ACS, ver esquema de la Fig. 8.

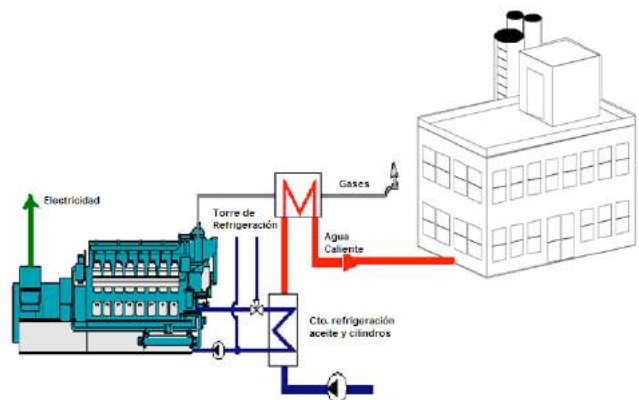


Fig. 8. Esquema del circuito de refrigeración de calor de un micromotor (elaboración propia).

Aunque conceptualmente el sistema no difiere mucho del basado en turbinas de gas, existen sin embargo diferencias importantes. Con los motores alternativos se obtienen rendimientos eléctricos más elevados, pero el aprovechamiento de la energía térmica presenta una mayor dificultad, ya que presenta un nivel térmico muy inferior, y además se encuentra más repartida (gases de escape y circuitos de refrigeración del motor), catálogos de Caterpillar [17].

En la Tabla 2 se muestran los datos más relevantes de diferentes micromotores con potencias que van desde 5,4 kWe hasta los 30 kWe. La vida media de estos motores oscila alrededor de las 80.000 horas (unos 10 años).

A modo de ejemplo, en la Fig. 9 se presenta el esquema de principio de una instalación de microcogeneración desarrollado por la empresa *Altare* para un edificio de 130 viviendas en Madrid. La demanda térmica es de 193 MWh/año de ACS y de 490 MWh/año de calefacción. Se

trata de una instalación centralizada a dos tubos con un motor de 12 kWe y 27 kWt y con depósito de 3.000 l, operando 5.700 h/año.

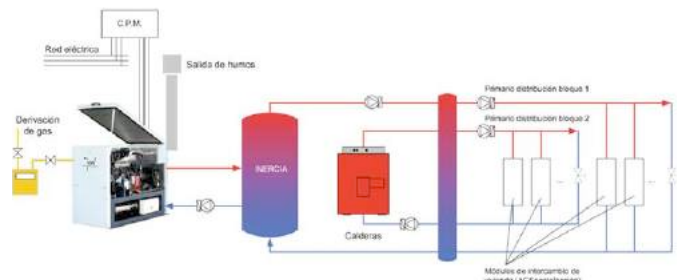


Fig. 9. Esquema de una instalación de cogeneración con micromotor. (cortesía de ALTARE)

Tabla 2

Prestaciones de algunos micromotores

| Módulo | DACHS | KWE 12 G | KWE 20 G | KWE 30 G |
|---------------------------|------------|--------------|--------------|--------------|
| Motor | SACHS 1cil | Ford L4 | Ford L4 | Ford V6 |
| Potencia eléctrica (kW) | 5,5 | 12 | 20 | 30 |
| Potencia térmica (kW) | 12,5 | 27 | 41 | 68 |
| Consumo (kW) | 20,5 | 43 | 68 | 106 |
| Rendimiento eléctrico | 26,8% | 27,9 % | 29,4 % | 28,3 % |
| Rendimiento térmico | 61,0% | 62,8 % | 60,3 % | 64,2 % |
| Rendimiento global | 87,8% | 90,7 % | 89,7 % | 92,5 % |
| Dimensiones (LxAxAI, cm) | 106x72x100 | 145x75x120 | 150x81x125 | 164x86x134 |
| Peso (kg) | 530 | 700 | 870 | 1.160 |
| Emisiones | <TA-Luft | <1/2 TA-Luft | <1/2 TA-Luft | <1/2 TA-Luft |
| Nivel Sonoro (dB(A) a 1m) | 54-56 | 55 | 54 | 53 |

3.2. Microturbinas de gas

Las microturbinas existen desde los años 60, cuando en los aviones comerciales se sustituyeron los motores alternativos por turbinas (más fiables y menos pesadas) para generar la energía auxiliar necesaria para arrancar las turbinas de propulsión y otros servicios, como tener luz cuando están detenidos en mitad del aeropuerto.

Las microturbinas de gas son motores de combustión interna, basadas en el mismo principio que las turbinas convencionales, pero simplificando los elementos mecánicos. En este sentido, solamente disponen de una pieza móvil en toda la máquina, el eje, con ausencia total de aceites lubricantes y agua de refrigeración. Los cojinetes sobre los que se soporta el eje son de aire y el régimen de funcionamiento es entre 45.000 y 100.000 rpm.

Como hemos dicho, el modo de funcionamiento de la microturbina no difiere mucho del de una turbina convencional. La diferencia principal se encuentra en el hecho de tener un *regenerador*, un intercambiador de calor interno que precalienta el aire antes de entrar en la cámara de combustión mediante los gases de salida de la cámara. La incorporación del regenerador permite mejorar el

rendimiento eléctrico de forma notable. Además, las microturbinas se caracterizan por la ausencia de reductor para conectarse al alternador.

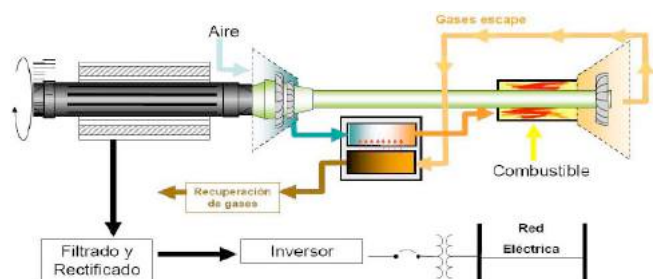


Fig. 10. Esquema de una microturbina y sus componentes eléctricos. (catálogos de CAPSTONE).

Debido a ello, las microturbinas generan energía alterna a frecuencia variable, que es convertida a corriente continua y mediante un inversor, parecido al que incorporan los sistemas fotovoltaicos, se convierte a corriente alterna trifásica 400 V y 50 Hz, que exigen las

aplicaciones en baja tensión, ver el esquema de la Fig. 10. Finalmente, los gases de escape salen de la microturbina a 300 °C aproximadamente, lo que permite una recuperación térmica útil para la producción de ACS, calefacción y frío.

El uso de las microturbinas ofrece un gran número de ventajas, en comparación con otras tecnologías de producción de energía eléctrica a pequeña escala, Jurado 2005 [18]. Las razones principales son:

- Menor número de partes móviles, únicamente el eje de la microturbina. Ello implica un bajo mantenimiento y, además, no hay consumo de aceite lubricante.
- Reducido peso y dimensiones. Así, estableciendo una comparación con los motores alternativos, una microturbina de 40 kW tiene un peso de unos 700 kg, frente a los 2000 kg de un motor alternativo. Las dimensiones externas son similares en ambos casos.
- Energía térmica recuperable en los gases de escape. A diferencia de los motores alternativos, las turbinas de gas concentran el calor residual en una sola corriente a alta temperatura, con lo que se simplifica la instalación de recuperación de calor.

Las microturbinas de gas son equipos altamente fiables y eficaces para la producción de electricidad y calor en modo cogeneración, e igualmente para la climatización de edificios que tengan servicios de climatización centralizados como hospitales, hoteles, escuelas, clubes deportivos, mercados, etc. En la Fig. 11 se aprecia el compresor, cámara de combustión, expansor y generador eléctrico de una microturbina.



Fig. 11. Microturbina de gas (catálogos de CAPSTONE).

En los edificios de oficinas, en hospitales, etc. hay habitualmente calderas de agua caliente para calefacción y ACS, una instalación eléctrica con su conexión a la red y un equipo de emergencia para cubrir los fallos de suministro eléctrico. Normalmente, estos equipos de emergencia son motores alternativos de ciclo diésel. Pues bien, las microturbinas pueden utilizarse como sistemas de emergencia, soportando las cargas críticas cuando se produce un fallo en el suministro eléctrico. En ese caso eliminamos la inversión en el generador de emergencia, por lo que los resultados económicos aún serán mejores.

Por último, comentar que los gases de escape de las microturbinas de gas son de alta calidad, dado que se encuentran a alta temperatura y libres de aceites. Ello los convierte en un sistema ideal para combinar con equipos de

refrigeración por absorción de alta eficiencia (doble efecto, ciclos GAX, etc.) para la producción de frío y, también, para aplicaciones en los invernaderos de horticultura, en los que es necesario un suministro de calor y de CO₂, con un bajo nivel de hidrocarburos. La eficiencia de estos sistemas puede ser muy elevada y, por lo tanto, muy atractiva para los casos en que, además de la demanda eléctrica, hay una demanda en climatización importante.

Así pues, una de las soluciones tecnológicas más apropiadas para garantizar el suministro energético es la micro-trigeneración con turbinas de gas, que ofrece la posibilidad de generar de forma simultánea la electricidad, el calor y el frío necesarios para la correcta climatización de un edificio durante todo el año, con un ahorro energético importante y con garantía de suministro.

3.3. Motores Stirling

Son motores alternativos de combustión externa y de ciclo cerrado. A diferencia de los motores alternativos de combustión interna, el fluido motor no es el combustible y comburente, sino un gas (helio o hidrógeno) confinado en un recinto hermético; tienen menos piezas móviles y ninguna válvula, balancines, inyectores de combustible o sistemas de encendido por chispa, por lo que requieren menos mantenimiento y la emisión de contaminantes es baja, Walker 1980 [19].

El principio de funcionamiento es el trabajo realizado por la expansión y contracción de un gas al ser obligado a seguir un ciclo, de enfriamiento al ponerse en contacto con un foco frío, con lo cual se contrae, y de calentamiento, cuando se pone en contacto con un foco caliente, donde se expande. En la Fig. 12 se presenta un motor Stirling de tipo beta.

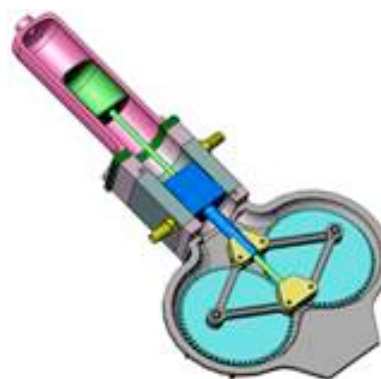


Fig. 12. Esquema de un motor Stirling (catálogos de REMEHA).

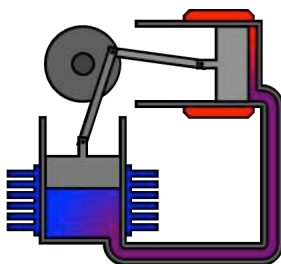
Su ciclo de trabajo está constituido por dos transformaciones isócoras (calentamiento y enfriamiento a volumen constante) y dos isotermas (compresión y expansión a temperatura constante). Existe un elemento adicional al motor, llamado *regenerador*, que es un intercambiador de calor interno que tiene la función de absorber y ceder calor en las evoluciones a volumen constante del ciclo. El regenerador consiste en un medio poroso con conductividad térmica despreciable, que

contiene un fluido. El regenerador divide al motor en dos zonas: una caliente y otra fría. El fluido se desplaza de la zona caliente a la fría durante los diversos ciclos de trabajo, atravesando el regenerador.

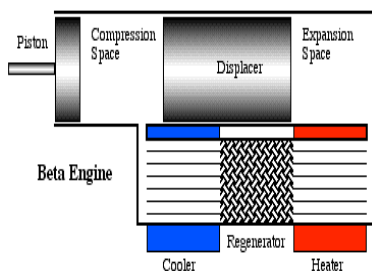
Este motor continúa en investigación debido a la versatilidad de fuentes de energía utilizables para su funcionamiento, ya que, al necesitar solamente una fuente de calor externa al cilindro, es posible usar una gran variedad de fuentes energéticas (energía solar térmica, todo tipo de combustibles incluida la biomasa, energía geotérmica, etcétera).

Se han realizado grandes avances en la gama más baja de potencias (capacidad entre 0,2 kWe y 9 kWe), y son especialmente adecuados para el sector doméstico, por la relación entre su producción eléctrica y térmica, ya que suele ser del orden de 1/6. El tipo de motor Stirling más importante es el alfa, que tiene dos pistones de potencia, mientras que los de tipo beta y gamma tienen un pistón y un desplazador. La siguiente Fig. 13 muestra las diferencias en el diseño de estas tres variantes de motores.

a) Alfa



b) beta



c) gamma

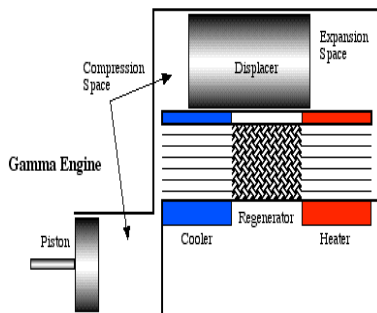


Fig. 13. Tipos de motores Stirling (catálogos de REMEHA).

3.4. Pilas de combustible

Las pilas de combustible o células de combustible (fuel cells) son convertidores de energía que transforman directamente la energía química de un combustible en energía eléctrica, a través de procesos electroquímicos y por tanto, sin la presencia de reacciones de combustión. Su funcionamiento es similar al de las baterías, pero mientras éstas son dispositivos almacenadores de energía, las pilas son convertidores, es decir, producen la electricidad a partir del reabastecimiento continuo de los reactivos, que son el combustible y el oxígeno, Otero de Becerra 2010 [20]. Además, mientras en una batería los electrodos cambian según como esté de cargada o descargada, en una pila los electrodos son relativamente estables.

En la siguiente Fig. 14 se representa el principio de funcionamiento de una pila de combustible. Los reactivos típicos utilizados son hidrógeno por el lado del ánodo y oxígeno por el del cátodo. El hidrógeno que llega al ánodo se disocia en protones y electrones. Los protones son conducidos a través del electrolito al ánodo, en tanto que los electrones están forzados a viajar a través de un circuito externo. En el cátodo las moléculas de oxígeno reaccionan con los protones y los electrones para formar agua. En este caso el único residuo de la pila es agua líquida o vapor de agua.

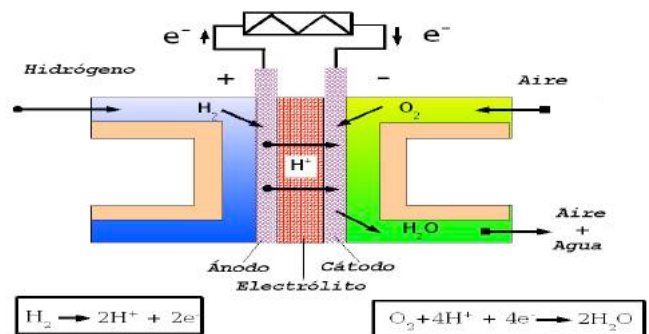


Fig. 14. Principio de funcionamiento de una pila de combustible (elaboración propia).

Las pilas se clasifican atendiendo al tipo de electrolito empleado. Así en las pilas de electrolito polimérico, también llamadas de *membrana intercambiadora de protones*, una membrana polimérica conductora de protones (el electrolito) separa el lado del ánodo del cátodo. Ese electrolito puede ser también *ácido fosfórico*, *carbonatos fundidos* u *óxido sólidos*.

En la Tabla 3 se muestran las propiedades más relevantes de estos diferentes tipos de pilas. En cuanto a los electrodos, se hacen generalmente de nanotubos de níquel o carbono y están cubiertas de un catalizador, como platino o paladio, para conseguir así una mayor eficiencia.

Además de lo que hemos descrito hasta este momento, que es lo que podríamos denominar el corazón de la pila, las pilas de combustible incorporan una serie de sistemas complejos para desarrollar diversas funciones. Así, el sistema de tratamiento del combustible (el combustible

generalmente utilizado es gas natural, por lo que es necesario un reformador para obtener hidrógeno), el de acondicionamiento de la electricidad producida (se genera corriente continua que tiene que ser convertida en alterna a 50 Hz), el sistema de gestión del aire, del agua y el de la energía térmica, tanto para la utilización interna de la pila, como calor residual para su aprovechamiento como sistema de cogeneración. En la Fig. 15 se muestra un esquema de esos diferentes sistemas que integran la pila.

Al no existir combustión, el rendimiento de las pilas no está limitado por el factor de Carnot, por lo que teóricamente puede alcanzar valores muy altos. Ahora ese rendimiento máximo viene limitado por la disminución del potencial de Gibbs de los productos respecto a los reactivos. Normalmente, el rendimiento que se alcanza en esta conversión de energía química del combustible en energía eléctrica es del orden del 50 %. En aplicaciones de cogeneración el rendimiento puede ser menor, porque la mayoría de la energía no convertida en electricidad se utiliza como calor útil, alcanzándose rendimientos globales alrededor del 80%.

Las pilas de combustible de ácido fosfórico (PAFC *Phosphoric-Acid Fuel Cells*) abarcan el segmento más grande de aplicaciones de cogeneración en todo el mundo y pueden proporcionar rendimientos globales cercanos al 80% (45-50% eléctrico + el resto calor útil). El mayor fabricante de células de combustible de PAFC es UTC Power. También se utilizan pilas de combustible de carbonato fundido (MCFC *Molten Carbonate Fuel Cell*) con fines idénticos, y existen prototipos de pilas de óxido sólido (SOFC *Solid-Oxide Fuel Cell*).

Las pilas de combustible ofrecen una serie de ventajas importantes, como son: su alta eficiencia energética, bajo nivel de contaminación medioambiental, su carácter modular, flexibilidad de operación, la posibilidad de admisión de diversos combustibles, funcionamiento silencioso, su fiabilidad y la sencillez de instalación, Como inconvenientes más importantes se deben destacar su gran sensibilidad hacia los venenos catalíticos y su alto coste, Weidlich 1997 [21].

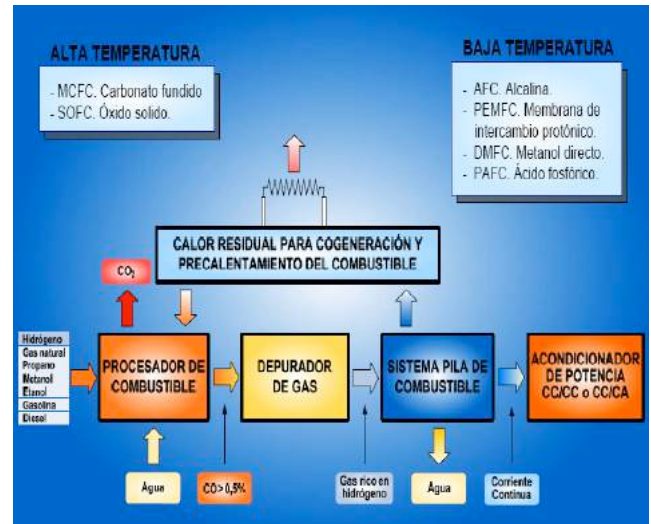


Fig. 15. Esquema de los diferentes sistemas que integran la pila (elaboración propia).

En la Fig. 16 se ve una imagen de una pila de combustible de fabricación alemana de 1,5 kW eléctricos y 3 kW térmicos, que se puede integrar, por ejemplo, con una caldera de otros 15 kW.



Fig. 16. Pila de combustible de 1,5 kW_e (catálogo de Vaillant GmbH).

Tabla 3
Tipos de pilas de combustible

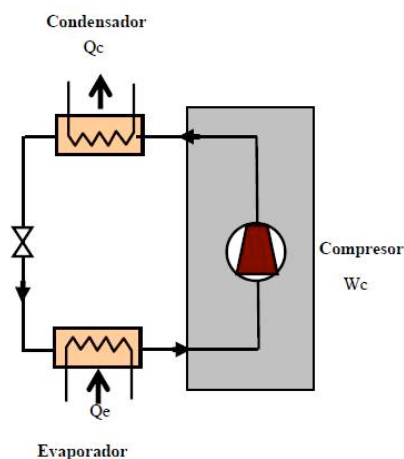
| TIPOS DE PILAS | Siglas | Temperatura | Combustible | Oxidante | Ion Portador |
|---------------------|--------|-------------|---------------------------------------|------------------------|------------------------------|
| Polímero Catiónico | PEFC | 80 °C | H ₂ puro | Aire sin CO | H ⁺ |
| Ácido Fosfórico | PAFC | 200 °C | H ₂ | Aire sin CO | H ⁺ |
| Carbonatos fundidos | MCFC | 650 °C | CH ₄ , H ₂ , CO | Aire + CO ₂ | CO ₃ ⁼ |
| Óxido Sólido | SOFC | 950 °C | CH ₄ , H ₂ , CO | Aire | O ⁼ |

4. La trigeneración en los edificios

Los sistemas de trigeneración, entre los que se incluyen los de microtrigeneración, generan electricidad, calor y frío. La generación de frío para climatización permite alargar el período de operación de los equipos de cogeneración, al no ser coincidentes las demandas de frío y calor. Por ello, la conversión del calor residual en frío, realizada mediante máquinas de absorción, es una excelente solución para la cogeneración en los sectores terciario y residencial, Serra y col. 2009[22].

Los ciclos de absorción se basan en la capacidad que tienen algunas sustancias para absorber, en fase líquida, vapores de otras sustancias. El ciclo termodinámico de absorción, llamado de Carré, es similar a un ciclo inverso de Rankine, con la diferencia de sustituir el compresor mecánico por un compresor químico. Para hacer más fácil la compresión del ciclo de simple efecto se presenta en el siguiente esquema, ver Fig. 17, la similitud entre ambos.

a) Frigorífico de compresión



b) Frigorífico de absorción

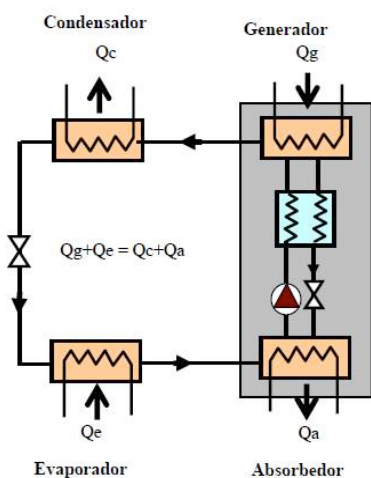


Fig. 17. Frigorífico de compresión frente al frigorífico de absorción (elaboración propia).

El proceso de absorción se lleva a cabo en el *absorbedor*, en el que entra el fluido refrigerante procedente del evaporador y la solución de transporte concentrada procedente del generador, necesiándose extraer calor por ser el proceso de absorción exotérmico. La solución diluida resultante se bombea hasta el *generador*, donde se aporta calor para volver a separar el refrigerante de la solución. A continuación, el refrigerante se dirige al condensador para continuar el ciclo, ASHRAE 2008 [23].

La solución de transporte, antes de ir concentrada al absorbedor, se hace pasar por un regenerador, al que aporta calor que se aprovecha para calentar la solución diluida procedente de la bomba y con destino al generador, con el consiguiente aprovechamiento energético y mejora del COP.

El trabajo mecánico consumido por el ciclo se limita al accionamiento eléctrico de la bomba, que es muy pequeño en comparación con el consumido por un compresor en el ciclo convencional. La principal energía consumida es el calor que se debe aportar en el generador para separar al refrigerante de la solución.

Los dos pares refrigerante-absorbente más usados son la combinación de bromuro de litio-agua ($\text{BrLi-H}_2\text{O}$), para producir frío a temperatura de hasta $+6^\circ\text{C}$, y amoníaco-agua ($\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$) para temperaturas negativas de hasta -50°C . El fluido citado en primer lugar es el refrigerante, mientras que el otro es el absorbente.

Los sistemas de absorción presentan una serie de ventajas sustanciales, como son:

- Sustitución de consumos de energía eléctrica, de elevado coste, por energía térmica, lo que permite un mayor dimensionamiento de la planta de cogeneración.
- Aumento del número de horas de funcionamiento con alta eficiencia energética.
- Aumento de la versatilidad, puesto que es posible generar, además de electricidad y calor, frío.
- No utilización de CFCs, lo que las convierte en posibles sustitutos de las máquinas de compresión basadas en este tipo de fluidos refrigerantes.

Las máquinas basadas en BrLi son las utilizadas habitualmente para la climatización de edificios. Para generación de agua fría del orden de $5\text{-}7^\circ\text{C}$, las máquinas de simple efecto permiten conseguir COPs de aproximadamente 0,7.

Por último, debemos citar que, además de las máquinas de absorción, existen otro tipo de máquinas que se utilizan en las instalaciones de trigeneración, basadas en el fenómeno de la adsorción/desorción. El término *adsorción* se deriva de un proceso general denominado *sorción*, que describe la transferencia periódica de energía en dos subprocesos, en los cuales un medio sólido adsorbente bajo transferencia de energía ‘adsorbe’ una materia en estado gaseoso. El efecto contrario, o sea, la separación de la materia gaseosa del cuerpo sólido mediante entrega de calor a dicho cuerpo, se denomina ‘desorción’, Wang y col 2010 [24].

Fue en el año 1986 cuando se desarrolló el refrigerador por adsorción, de la firma japonesa Nishiyodo Kuchou Manufacturing Company. Desde entonces se han venido empelando en un amplio abanico de usos en Japón, Europa y América, existiendo centenares de referencias.

5. Viabilidad de la cogeneración en los edificios

El punto de partida, para cualquier proyecto de cogeneración, es la realización de un estudio de viabilidad lo suficientemente riguroso, con la finalidad de determinar qué tipo de instalación y cuál es la potencia instalada que mejor se adapta al centro consumidor, y si es o no rentable dicha instalación. Este estudio suele constar de las siguientes fases:

- Análisis de la situación actual.
- Previsión de la demanda.
- Evaluación energética.
- Evaluación económica.
- Evaluación de la rentabilidad y sensibilidad.

El potencial de la cogeneración en el sector de la edificación es, como hemos dicho en el apartado 1.1, muy elevado y se trata de un sector prácticamente sin explotar. No obstante, la rentabilidad de estos proyectos suele ser menor a la de las aplicaciones industriales. Por ello, es muy importante definir la mejor solución en cada caso.

La problemática de la cogeneración en los edificios se presenta como consecuencia de que la demanda térmica es muy variable, es difícil de determinar con precisión y, además, las potencias de los equipos requeridos son pequeñas, desde luego mucho menores a las de los equipos en aplicaciones industriales.

La alta variabilidad de la demanda térmica se soluciona, al menos en parte, mediante el empleo de sistemas de almacenamiento térmico, que permiten cubrir los huecos entre producción y demanda, así como también haciendo funcionar los equipos a carga parcial. Las dificultades en la predicción de la demanda se pueden resolver mediante el empleo de sistemas de control que permitan programar la producción en base a diversas lecturas externas, o mediante el empleo de algoritmos predictivos. Por último, los valores pequeños de las demandas se pueden resolver intentando centralizar la producción para varios edificios y si no es posible, recurriendo a las soluciones modulares de microgeneración.

En la realización del estudio de viabilidad se nos pueden presentar tres posibles situaciones:

- Que el edificio exista y se tenga información de consumos y demandas (sería la situación ideal).
- Que el edificio esté en proyecto, en cuyo caso será necesario realizar las simulaciones, mediante software de simulación energética tal como *Trnsys*, *EnergyPlus*, etc. para evaluar las demandas térmicas que tendrá en la fase de uso.

- Que el edificio exista, pero la información que se tenga sobre las demandas sea limitada y haya que completarla con simulaciones y/o medidas in situ.

Los datos de las demandas térmicas (calefacción, ACS, refrigeración) se pueden presentar, bien mediante la curva cronológica de demanda (CCD) o mediante la curva monótona de demanda (CMD). La CCD proporciona los valores de la demanda cronológicamente, mientras que la CMD ordena los valores de la demanda de mayor a menor y permite aplicar métodos rápidos de dimensionamiento.

Una vez conocidas las demandas se pasa a la fase esencial del estudio, que es la de diseño de la planta. En esta fase habrá que definir las tecnologías posibles (microturbinas, micromotores, motores Stirling, etc.), la configuración de la planta (número de unidades, sistema de almacenamiento térmico, equipo auxiliar, etc.), así como la estrategia operativa, esto es, el modo de funcionamiento e interacción entre los equipos.

En el diseño de sistemas energéticos, y en particular en el diseño de sistemas de cogeneración y trigeneración para edificios del sector residencial-comercial, intervienen los siguientes factores, Ramos 2012 [25]:

- La demanda de energía eléctrica y térmica del centro consumidor.
- La disponibilidad y garantía de suministro de los combustibles, para asegurar el funcionamiento de los equipos consumidores durante su vida útil prevista.
- Las tarifas y precios de los combustibles y electricidad, aplicables en la región geográfica donde se emplazará la instalación.
- La disponibilidad comercial de equipos de distintas tecnologías. La elección del tipo de tecnologías (de producción de electricidad, calor y frío) está supeditada a la disponibilidad de los recursos energéticos que consumen.
- El coste de inversión de los equipos, teniendo en cuenta que las economías de escala favorecen la inversión en equipos de mayor tamaño.
- Las características técnicas y diversos parámetros, como su eficiencia eléctrica, la temperatura de las fuentes de calor recuperable, ratio calor/electricidad, etc. La eficiencia eléctrica y la ratio calor/electricidad determinan los beneficios económicos que se derivan de su operación.
- El marco legal que regula el funcionamiento de las instalaciones de cogeneración en el mercado eléctrico. Cada región o país dispone de normativas legales que regulan la venta de los excedentes de electricidad en el mercado. En España las instalaciones de cogeneración se acogen a las obligaciones y beneficios del Régimen Especial de producción de energía eléctrica. También debe considerarse la legislación ambiental sobre límites de emisión aplicables a las instalaciones que consumen combustibles fósiles.
- La estrategia global de operación, que está condicionada por: (i) las características técnicas de los equipos; (ii) los perfiles de la demanda de calor, frío y

electricidad del consumidor; (iii) los precios del combustible y de la electricidad; y (iv) la posibilidad de intercambiar energía (comprar y/o vender electricidad) con el mercado.

El dimensionamiento de la planta de cogeneración se realiza en base a la demanda térmica, teniendo presente que la cogeneración funcionará como complemento al método de producción térmica convencional. En los métodos convencionales de diseño, la curva monótona de demanda térmica proporciona información útil para (i) elegir la capacidad a instalar y (ii) calcular la tasa de cobertura, el factor de utilización y el grado de aprovechamiento del calor cogenerado.

El diseño debe procurar un elevado *factor de utilización* de la capacidad instalada de los módulos de cogeneración, para favorecer así su amortización. Este factor se define como el cociente entre la producción anual real y la producción anual máxima teórica; es decir, la producción anual a carga nominal durante las 8.760 horas del año.

También conviene alcanzar una alta *tasa de cobertura* (referida a la fracción de la demanda energética del usuario atendida con la electricidad y el calor cogenerados). Un método simple muy difundido es el que maximiza la tasa de cobertura, es decir, la potencia térmica del equipo será aquella que hace máxima el área del rectángulo dentro de la CMD, ver Fig.18.

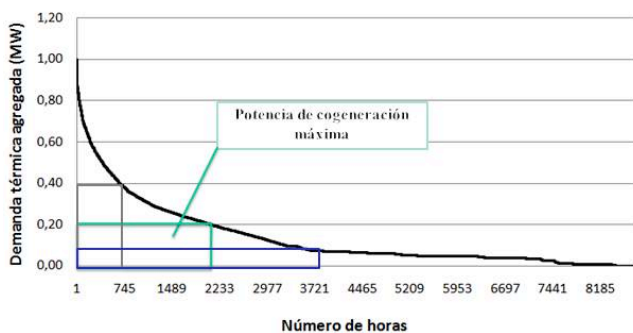


Fig. 18. Curva monótona de demanda (elaboración propia).

Desafortunadamente, en sistemas con demanda variable, como en los edificios, no es posible maximizar simultáneamente la tasa de cobertura y el factor de utilización, ya que al mejorar uno de ellos queda perjudicado el otro, lo que dificulta encontrar el diseño óptimo (Lozano, 1998).

Además de estos métodos convencionales de diseño hay otros más sofisticados, basados en métodos de optimización como la programación lineal entera (PLE). El proceso de síntesis y diseño de los sistemas de cogeneración se desarrolla del siguiente modo, Nembauer y Wosley 1999 [24]:

- En primer lugar, se propone una superestructura energética constituida por las tecnologías (candidatas) que competirán entre sí en el plano técnico

(prestaciones energéticas) y económico (costes de inversión y operación). De este conjunto de tecnologías se elige aquella combinación cuyo coste total sea mínimo. En este paso queda también determinada la potencia aproximada a instalar de cada tecnología.

- A continuación, se define el tamaño (potencia nominal) y el número de equipos a instalar de cada tecnología seleccionada. En esta etapa se puede decidir entre: fraccionar la potencia instalada entre varios equipos o bien instalar un único equipo. Los equipos instalados, si son varios, pueden ser de diferente modelo o del mismo. Nuevamente, del conjunto de alternativas (configuraciones de equipos) se seleccionará aquella cuyo coste total sea mínimo.
- Finalmente, una vez determinada la configuración de los equipos, se formulan los modos de operación factibles para el sistema de cogeneración, y de entre ellos se elige aquel con el mínimo coste. El programa de operación óptima se resuelve para cada intervalo de tiempo con que se describe la operación anual.

Para evaluar el coste de operación hay que tener presente el coste de combustible de la planta de cogeneración y del sistema complementario, los ingresos por venta de la electricidad cogenerada, así como los costes de mantenimiento de la nueva planta. Así mismo, habrá que tener en cuenta los costes de los seguros y costes financieros.

Una vez evaluada la inversión y los ahorros económicos esperados, se hará un análisis de rentabilidad. Para ello normalmente se calculan los flujos de caja generados a lo largo de la vida útil de la planta (aproximadamente unos 15-20 años). A partir de estos flujos de caja se obtienen los índices de rentabilidad más habitualmente utilizados, como la tasa interna de retorno (TIR), el valor actualizado neto (VAN) o el tiempo de retorno actualizado (PB).

Como etapa final, suele ser habitual realizar un análisis de sensibilidad. Este tipo de análisis sirve para identificar los riesgos de un proyecto. De esta forma, se puede reconocer el grado de sensibilidad de la economía de un proyecto frente a cambios de diversos parámetros. En este punto se suelen definir escenarios "worst case" y "best case". En el primer caso los parámetros suelen variar bajo un contexto muy pesimista y en el segundo, bajo supuestos extremadamente optimistas. Ambas valoraciones abren un abanico de posibilidades dentro de las cuales se desarrollará el proyecto.

6. Conclusiones

El sector de los edificios es un gran consumidor de materiales y de recursos energéticos y su funcionamiento demanda energía final, en forma fundamentalmente de electricidad y energía térmica a baja temperatura. Estos son precisamente los productos de las plantas de cogeneración, por lo que resultan muy adecuadas para este sector.

En las conclusiones de diversos estudios europeos se destaca que sólo se ha desarrollado una mínima parte del

potencial de cogeneración en el sector residencial-comercial de la UE. Por otra parte, una revisión de los datos sobre el estado de la cogeneración en España nos revela que la cogeneración está poco extendida en el sector servicios y es prácticamente inexistente en el sector residencial. Sin embargo, la cogeneración presenta un rendimiento energético elevado en la utilización del combustible consumido, con el consiguiente menor impacto ambiental. Además de estos aspectos termodinámicos hay otros importantes argumentos para favorecer la participación de la cogeneración en el suministro de los servicios energéticos a los edificios y urbanizaciones en España, como son: la disponibilidad de los combustibles empleados (fundamentalmente gas natural), la demanda de sus productos (electricidad, calefacción, ACS y refrigeración) y la baja penetración actual. Se requiere, por lo tanto, un entorno económico adecuado y el correspondiente apoyo político para que realmente se produzca el despegue de la cogeneración.

En este capítulo se ha hecho una descripción de las características tecnológicas de los sistemas de calefacción de distrito. Este tipo de sistemas tiene mucha presencia en países del Centro, Este y Norte de Europa, generalmente ligados a centrales termoeléctricas, pero también en países como China o Estados Unidos han demostrado su valía energética, económica y ambiental. En el caso de España la potencia instalada es todavía pequeña, siendo el combustible principal de este tipo de instalaciones la biomasa y, en segundo lugar, el gas natural.

Hoy en día existen ya tecnologías de cogeneración convenientemente desarrolladas para su aplicación en el sector doméstico. En este capítulo hemos hecho un repaso a las características tecnológicas más relevantes de los micromotores de combustión interna, que se suministran generalmente como unidades encabinadas, con todas las fuentes de calor integradas, de modo que el calor disponible se entrega en forma de una única corriente de agua caliente. Hemos visto que las microturbinas incorporan un regenerador en el ciclo, lo que les permite alcanzar rendimientos cercanos a los de sus hermanas mayores. Las microturbinas de gas son equipos altamente fiables y eficaces para la producción de electricidad y calor en modo cogeneración, e igualmente para la climatización de edificios.

De los motores Stirling destacamos la versatilidad de las fuentes de energía utilizables para su funcionamiento, al ser un motor de combustión externa, así como su adecuación para el sector doméstico, por la relación entre su producción eléctrica y térmica. En cuanto a las pilas de combustible destacamos la alta eficiencia energética, al no estar limitadas por el factor de Carnot y el bajo nivel de contaminación medioambiental, al no existir reacciones de combustión. Además, se caracterizan por su carácter modular, flexibilidad de operación, la posibilidad de admisión de diversos combustibles, funcionamiento silencioso, su fiabilidad y la sencillez de instalación. No obstante, a día de hoy no son competitivas, por su elevado precio fundamentalmente, por lo que habrá que esperar

algún tiempo a su incorporación masiva al mercado de la cogeneración.

Hemos visto que la generación de frío para climatización en plantas de trigeneración permite alargar el período de operación de los equipos de cogeneración, al no ser coincidentes las demandas de frío y calor. Por ello, la conversión del calor residual en frío, realizada mediante máquinas de absorción, puede ser una excelente solución para la cogeneración en la edificación.

El proceso de diseño de un sistema de cogeneración incluye la selección del tipo de tecnologías a emplear, el tamaño y número de equipos a instalar y sus estados de operación. Este proceso está condicionado por diversos factores, tales como: la demanda de los servicios energéticos, el coste de inversión de los equipos, sus prestaciones energéticas, etc. tal y como hemos comentado en este capítulo.

Aun cuando se trata de un problema complejo, en la práctica se han propuesto y se utilizan procedimientos de análisis que permiten determinar las características más relevantes de los sistemas a instalar. En este capítulo se ha presentado el método basado en la utilización de la curva monótona de demanda. Así mismo, se ha hecho alusión a métodos más sofisticados que utilizan la programación lineal entera. Mediante herramientas informáticas adecuadas se realiza la optimización de estos sistemas, desde su concepción (determinación de la estructura y configuración de los equipos) hasta el control óptimo en tiempo real de su operación. Todo estudio de viabilidad finaliza en el correspondiente análisis de rentabilidad, de forma que, a partir de los flujos de caja previstos, se calculan los valores de los índices de rentabilidad más habituales y generalmente se finaliza el estudio con un análisis de sensibilidad a los parámetros más significativos.

Glosario

Cogeneración: Producción secuencial de electricidad y energía térmica útil (calor útil) a partir del mismo combustible.

Exergía: Energía ponderada por su factor de calidad. Mide la capacidad de producir trabajo de la energía.

Sistema de calefacción de distrito: Sistema centralizado de generación de electricidad y calor, con una red de distribución que suministra calefacción y ACS a un conjunto de edificios (urbanización, polígono industrial, etc.).

Sistema de calefacción y refrigeración de distrito: Sistema centralizado de generación de electricidad, calor y frío, con un anillo de distribución de calor y otro de frío que suministra calefacción, ACS y refrigeración a un conjunto de edificios.

Micromotor de combustión interna: Pequeño motor alternativo de combustión interna, con sus fuentes de calor residual integradas para producir generalmente agua caliente.

Microturbina de gas: pequeña turbina de gas que incorpora entre sus componentes un regenerador para mejorar su rendimiento.

Regenerador: Intercambiador de calor que precalienta el aire de combustión mediante los gases de escape de la turbina.

Motor Stirling: Motor de combustión externa basado en que el fluido de trabajo funciona siguiendo un ciclo Stirling.

Pila de combustión: Convertidor directo de energía química de un combustible en electricidad (corriente continua), por medio de reacciones electroquímicas.

Trigeneración: Producción secuencial de electricidad, energía térmica por encima de la temperatura ambiental (calor útil) y energía térmica por debajo de la temperatura ambiental (frío) a partir del mismo combustible.

Frigorífico de absorción: Equipo que genera frío a partir de calor, mediante los procesos de absorción y desorción en una disolución.

Absorbedor: Componente del frigorífico de absorción en el que tiene lugar la absorción del refrigerante en un proceso exotérmico.

Generador: Componente del frigorífico de absorción en el que tiene lugar la separación del refrigerante de la disolución a través de un proceso endotérmico.

Frigorífico de adsorción: Equipo que produce frío basado en el proceso de adsorción/desorción, en el que un medio sólido adsorbe o se separa de un gas.

Factor de utilización: Cociente entre la producción anual real y la producción anual máxima teórica de un motor de cogeneración.

Tasa de cobertura: Fracción de la demanda del usuario atendida con la electricidad y el calor cogenerados.

Curva cronológica de demanda: Proporciona los valores de la demanda térmica cronológicamente.

Curva monótona de demanda: Proporciona los valores de la demanda térmica, ordenando los valores de mayor a menor.

Referencias

- [1] Polimeros, G (1981). *Energy Cogeneration Handbook. Criteria for Plant Design*, Industrial Pres.
- [2] Marecky J. (1988). *Combined Heat and Power Generating Systems*, Peter Peregrinus, Ltd.
- [3] Sala, J.M. (1995). *Cogeneración. Aspectos termodinámicos, económicos y tecnológicos*, Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco.
- [4] Horlock, J. (1997). *Cogeneration. Combined Heat and Power (CHP). Thermodynamics and Economics*, Krieger publishing Company.
- [5] Petchers, N. (2003). *Combined Heating, Cooling & Power Handbook: Technologies & Applications. An Integrated Approach to Energy Resource Optimization*, The Fairmont Press.
- [6] *Resolución del Parlamento Europeo, de 10 de septiembre de 2013, sobre la aplicación y el impacto de las medidas de eficiencia energética en el marco de la política de cohesión (2013/2038(INI))*.
- [7] IDAE (2013), Estudios, informes y estadísticas. Consumo en unidades comerciales, <http://www.idae.es/index.php/idpag.802/recategoria.1368/relmenu.363/mod.pags/mem.detalle>.
- [8] CHOSE (2001) *Energy Savings by Combined Heat Cooling and Power Plants (CHCP) in the Hotel Sector*. The Commission of the European Communities, Directorate General for Energy, SAVE II Project, ContractNo.1031/Z/98-036. http://www.inescc.pt/urepe/chose/reports/Final_report.pdf.
- [9] TRIGEMED (2003). *Promotion of Tri-generation Technologies in the Tertiary Sector in Mediterranean Countries*. The Commission of the European Communities, Directorate General for Energy, SAVE Project, Contract No. 1031/Z/01-130/2001.
- [10] SUMMERHEAT (2009). *Meet cooling needs in SUMMER by applying HEAT from cogeneration*. EU Intelligent Energy Europe Programme EIE-06-194. http://eaci-projects.eu/ee/page/Page.jsp?op=project_detail&prid=1746
- [11] IDAE (anual), *Boletín de estadísticas energéticas de cogeneración*.
- [12] (2002) *Eficiencia Energética y Económica de la Cogeneración*, Cogen España, Ref EEC 0205PT.4.
- [13] Fogelholm C, Gebremedhin A, Kim S, Pedersen L, Savola T, Stang J, Tveit T, Zinko H. (2008) 8DCHC-08-02: *Improved cogeneration and heat utilization in DH networks*. IEA Implementing Agreement on District Heating and Cooling, including the integration of CHP.
- [14] Campos A, Erkoreka A, Martin K, Sala JM.(2011) *Feasibility of small-scale gas engine-based residential cogeneration in Spain*. Energy Policy, Vol. 39, No 6, pp. 3813-3821.
- [15] (2016) *District Heating and Cooling Connection Handbook*. IEA, Programme of Research, Development and Demonstration on District Heating and Cooling.
- [16] Pulkravek W (2004) *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engines*, Prentice Hall.
- [17] *Caterpillar* (<http://www.cat.com/power.generation>), *Waukesha* (<http://www.dresserwaukesha.com>).
- [18] Jurado, F (2005). *La generación eléctrica distribuida con microturbinas de gas*, Universidad de Sevilla.
- [19] Walker, G. (1980) *Stirling Engines*, Clarendon Press.
- [20] Otero de Becerra, J (2010) *Hidrógeno y pilas de combustible: estado actual y perspectiva inmediata*, Asociación Nacional de Ingenieros de ICAI.
- [21] Weidlich, E. (1997), *Constitución y funcionamiento de las pilas de combustible*, Marcombo.
- [22] Serra, L., Lozano, M.A., Ramos J., Ensinas A., Nebbras, S. (2009) *Polygeneration and efficient use of natural resources*, Energy Vol 34, N° 5, pp575-586, 2009.
- [23] ASHRAE (2008) *2008 ASHRAE Handbook- HVAC Systems and Equipment*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- [24] Wang, D. C., Y. H. Li, Y. Z. Xia, J. P. Zhang (2010) *A review on adsorption refrigeration technology and adsorption deterioration in physical adsorption systems*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol14, N° 1, pp344-353.
- [25] Ramos, J. (2012). *Optimización del Diseño y Operación de Sistemas de Cogeneración para el Sector residencial-comercial*, Tesis Doctoral, Universidad de Zaragoza.
- [26] Nemhauser, G., Wolsey, L. (1999). *Integer and Combinatorial Optimization*, Wiley.

Bibliografía

Bejan, A., Tsatsaronis, G., Moran, M. (1996). *Thermal design and Optimization*, Wiley.

Cardona, E., Piacentino A (2003). *A methodology for sizing a trigeneration plant in mediterranean areas*, Applied Thermal Engineering Vol.23, N° 13, pp 1665-1680.

Caterpillar (2008). *Cooling Systems. Application and Installation Guide*, Caterpillar.

Cogen Spain (2002). *Evaluación de plantas de cogeneración*, Cogen Spain.

GTI (2006). *Integrated Energy Systems for Buildings. Modular System Prototype*, Gas Technology Institute, USA.

IEA-DHC (1999). *District Heating and Cooling Connection Handbook*, Annex VI de IEA.

Lozano, M.A., Ramos, J. (2010). *Thermodynamic and economic analysis of simple cogeneration systems*, Cogeneration & Distributed Generation Journal, Vol.25, N° 3, pp 63-80.

Sala, J.M. (1994). *Cogeneración. Aspectos termodinámicos, tecnológicos y económicos*, Servicio Editorial Universidad País Vasco, ISBN: 84-7585-571-7.

Wong, J. (2003). *Cogeneration System Design: Analysis and Synthesis: A Review of some relevant Procedures and Programs*, Cogeneration and Competitive Power Journal, Vol.18, N° 3, pp 6-26.

Webgrafía

www.mwm.net/en

www.wartsila.com

www.mtu-online.com

www.rolls-royce.com

www.cat.com

www.mhi.co.jp

www.ge-energy.com

www.idae.es

www.guascorpower.com

www.hyundai-engine.com

http://eaci-projects.eu

www.lsaircondition.com

www.ers.ebara.com

www.thermax-europe.com

www.trane.com

www.yazakienergy.com

www.broad.com

La biomasa como energía térmica renovable

Biomass as Thermal Renewable Energy

Enrique Granada ^{a*}, Raquel Pérez Orozco, Jacobo Porteiro, David Patiño

^a Dr. Ingeniero Industrial. Dpto Ingeniería Mecánica, Máquinas y Motores Térmicos y Fluidos. Escuela de Ingeniería Industrial. Universidad de Vigo

Resumen

El aumento de la demanda de energía, los niveles de CO₂ atmosférico y el alto coste de los combustibles convencionales y su disponibilidad, han llevado a la utilización de la biomasa para reemplazar parcialmente los combustibles convencionales [1, 2]. Miembros de la Unión Europea como España, han establecido el objetivo de al menos el 20% del consumo bruto de energía en renovables en 2020 [3, 4, 5]. En función del crecimiento del sector de la energía en los países de la UE, las fuentes de energía renovables aportarán entre el 33% y el 40% de la producción total de electricidad y el 25% de la producción total de calor en 2020 [6]. El potencial de biomasa en España es de alrededor de 100 millones de toneladas compuesto mayoritariamente de subproductos de silvicultura (virutas de pino, etc.) y residuos agrícolas (hueso de aceituna, cáscara de almendra, etc.) [4]. Gran parte de este potencial no se utiliza a pesar de las ventajas ambientales y los beneficios económicos de esta energía renovable. En este capítulo se tratará de explicar el potencial de la biomasa como fuente energética en la edificación concretando fundamentalmente en la energía térmica y con una visión como fuente de energía eléctrica. Para ello se iniciará con apartados más teóricos referidos a las propiedades de la biomasa y su conversión energética, para seguir con apartados más concretos de aplicaciones.

Palabras clave: Biomasa, Fuentes Renovables, Energía Térmica, Calderas, Estufas

Abstract

The increase in energy demand, atmospheric CO₂ levels and the high cost of conventional fuels and their disposal have led to the use of biomass to replace conventional fuels partially [1, 2]. European Union members, such as Spain, have established the renewable energy target of at least 20% of gross energy consumption by 2020 [3, 4, 5]. Depending on the growth of the power sector in EU countries, renewable energy sources will contribute between 33% and 40% to total electricity production and 25% to total heat production in 2020 [6]. Biomass potential in Spain is around 100 million tons, being made up of forestry by-products (pine shavings, etc.) and agricultural waste (olive stone, almond shell etc.) [4]. Much of this potential is unused in spite of the environmental advantages and the economic benefits of this renewable energy. This chapter outlines the biomass potential as energy source in building sector mainly focused on thermal energy with details in electric energy. It starts with theoretical paragraphs about biomass properties and energy conversion followed by applied paragraphs about facilities.

Keywords: Biomass, Renewable Sources, Thermal Energy, Boilers, Stoves

1. Introducción

La cambiante situación mundial afecta de forma global a la realidad energética de todos los países, condicionando a las políticas energéticas. La política energética española está en consonancia con las regulaciones Europeas, al tiempo que enfrenta los principales retos que caracterizan nuestro sector energético: elevada intensidad energética, alta dependencia exterior y grandes emisiones de gases de

efecto invernadero. Se siguen tomando medidas para revertir dicha situación, basadas fundamentalmente en la mejora de la eficiencia energética en todos los ámbitos a través de diversas regulaciones y el uso de energías renovables. Todo ello aparece plasmado fundamentalmente en el Plan de Energías Renovables para el periodo 2011-2020 (PER 2011-2020) [4].

Una revisión de la evolución de la estructura de consumo en energía primaria española (Fig. 1) permite

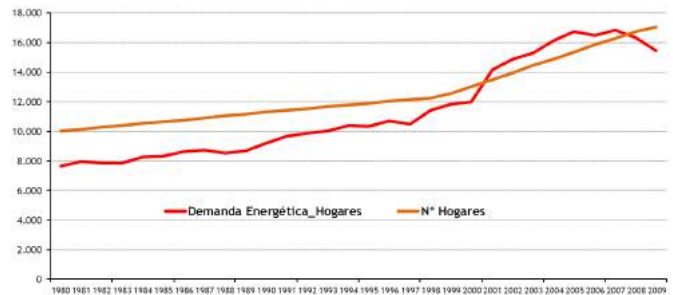
* egranada@uvigo.es

Citar como: Granada, E., Orozco R., Porteiro, Patiño, D. (2019). La biomasa como fuente térmica renovable. En R. Hernández_Minguillón, O. Irulegi, M. Aranjuelo_Fernández-Miranda (Eds.), *Arquitectura Ecoeficiente* (Tomo II, pp. 19 – 50). San Sebastián, España. Servicio Editorial de la UPV/EHU

comprobar la transformación de la misma en los últimos años. Es posible observar que las fuentes energéticas como el gas natural y, sobre todo, las renovables, han cobrado impulso a partir de fuentes más tradicionales como carbón o petróleo, permitiendo una mayor diversificación del abastecimiento energético. En gran medida, el aumento en el consumo de energía primaria debido a las renovables es achacable al Plan de Energías Renovables, PER 2005-2010, que ha permitido un cambio importante de tendencia, especialmente en sectores como el transporte y la edificación, tanto en los ámbitos residencial como terciario.

Dentro del puzzle energético europeo, el consumo de energía en el sector de la construcción representa aproximadamente un 40% del consumo total de energía final y de las emisiones de CO₂. La actividad económica vinculada a este sector supone un 9% del PIB y un 7-8% del empleo en la UE.

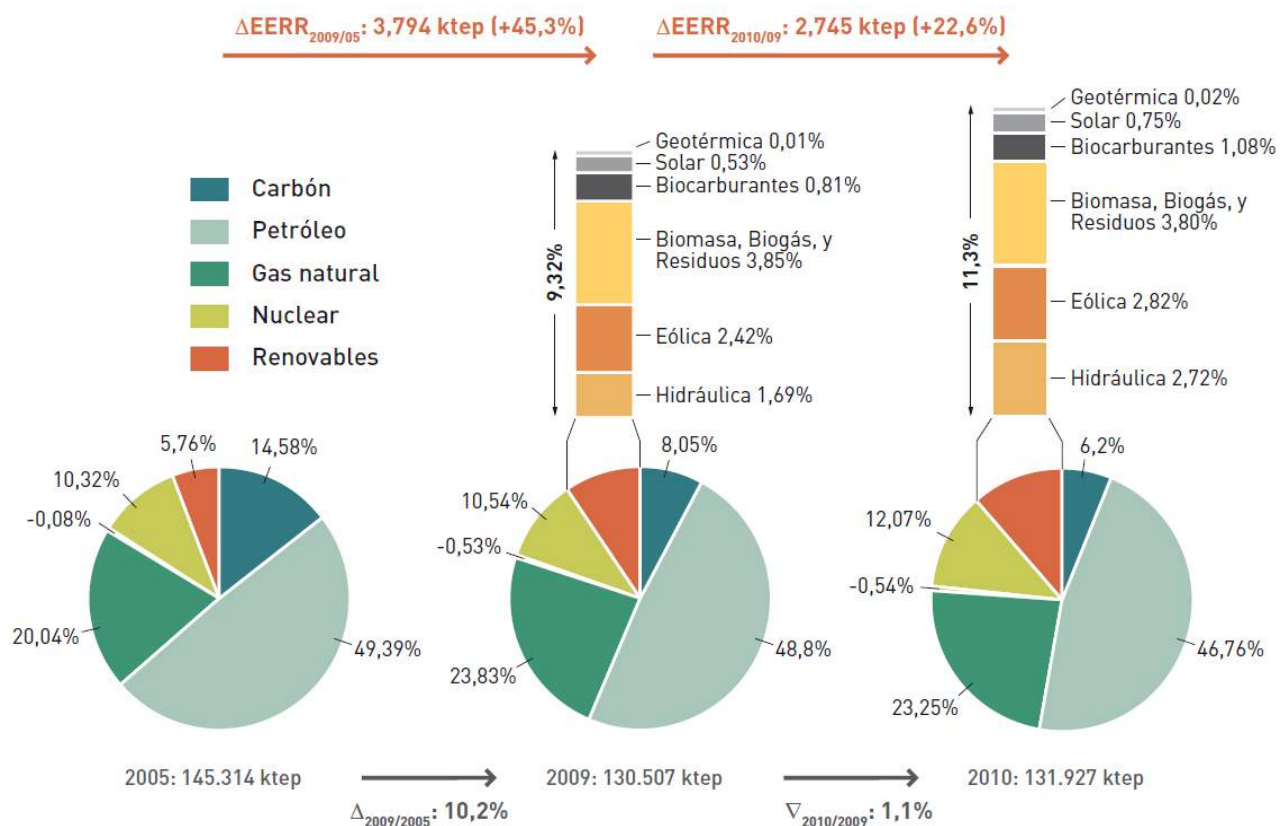
El último y más exhaustivo informe sobre el consumo energético del sector residencial español (Proyecto SECH-SPAHOUSEC-2011 [7]) clarifica los datos de consumo en base a una nueva metodología de análisis. En la Figura 2 se refleja la tendencia de consumo energético residencial, constituido por 17.199.630 viviendas con un consumo medio de 0,85 tep/año, donde los alojamientos unifamiliares demandan 2 veces más que los pisos.



Fuente: IDAE (2011), PROYECTO SECH-SPAHOUSEC. Análisis del consumo energético del sector residencial en España

Fig. 2. Tendencias del Consumo Energético (ktep) del Sector Residencial en España.

En términos de energía final, el consumo de combustibles en el sector residencial, según los últimos datos disponibles (IDAE-2015) es 1,45 veces superior al consumo eléctrico. En cuanto al consumo de energía eléctrica, el 73,5% se debe a iluminación y electrodomésticos y, en menor medida, a cocina y los servicios de calefacción y agua caliente. La estructura del citado consumo puede verse desagregada en la Figura 3, donde claramente la biomasa aparece como mayoritaria con más del 91% del consumo de renovables (encontrándose en el 11% de los hogares, sobre todo en viviendas unifamiliares).

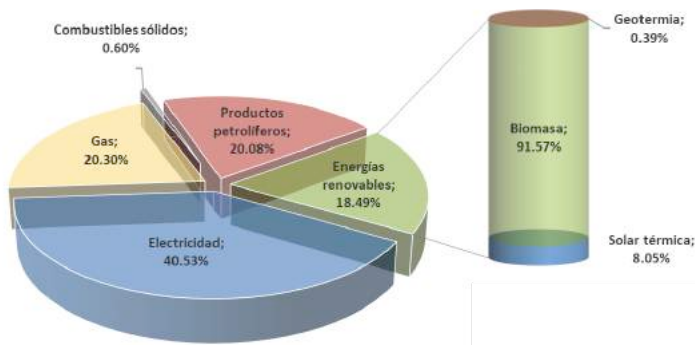


Fuente: IDAE (2011), Plan de Energías Renovables (PER) 2011-2020

Fig. 1. Evolución de la estructura de consumo de energía primaria nacional 2005-2010.

De la energía final consumida en un hogar medio, la calefacción supone el 44,0% (93,2% combustible y 6,7% electricidad); el agua caliente sanitaria (ACS), el 17,7% (82,9% combustible y 17,1% electricidad); y la cocina, el 7,5% (49,7% combustible y 50,3% electricidad). Claramente puede verse que el consumo de combustibles supone casi el 60% de la energía consumida total, siendo los mayores responsables la calefacción y el ACS.

La estructura de equipamientos de calefacción existente puede verse en la Figura 4 donde es mayoritaria la caldera convencional (aquella caldera que tiene como fuente energética principal un combustible excluyendo las de alta eficiencia y las de condensación) presente en cerca de la mitad de los hogares españoles con un mayor impacto en la zona interior del país, sobre todo en bloques de viviendas.



Fuente: IDAE (2017). Consumos de energía final por usos del sector residencial. Año 2015

Fig. 3. Estructura del consumo de energía final para un hogar tipo.

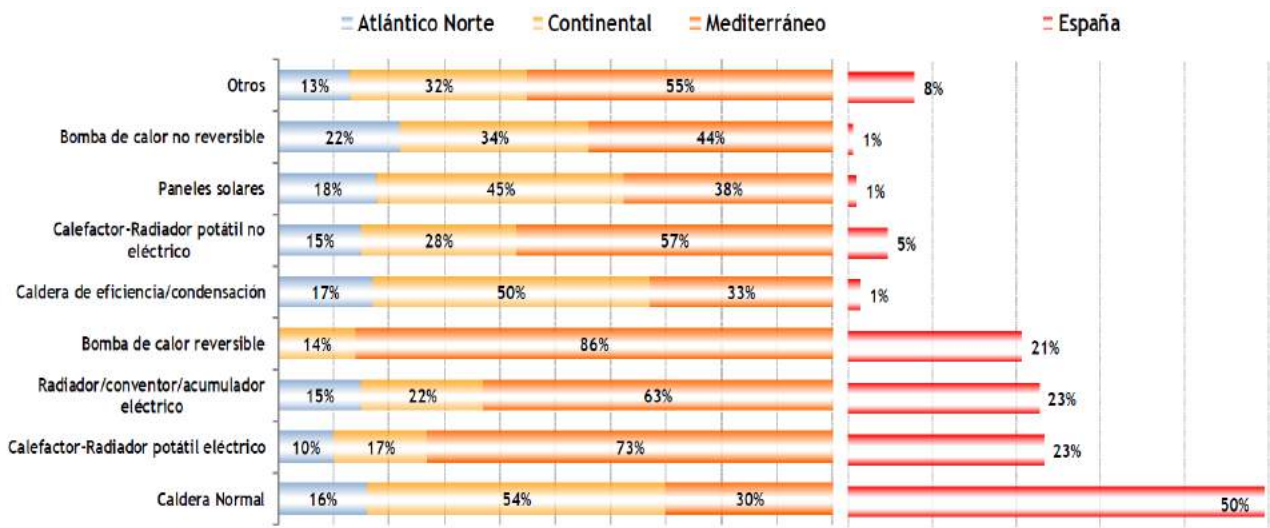
Por lo que respecta a la generación de ACS, el equipo más utilizado es la caldera individual, sobre todo en la zona continental con una antigüedad media de los equipamientos de 7 años. Las fuentes energéticas más utilizadas son el gas natural (40%), el butano (26%) y la electricidad (22%), variando el orden de importancia según el tipo de zona climática y el tipo de vivienda.

Tabla 1
Consumo de Biomasa Anual Español Sector Residencial (TJ)

| | Carbón Vegetal | Leñas y Ramas | Pellets | Otras Biomásas Sólidas |
|--------------------|----------------|---------------|---------|------------------------|
| CALEFACCIÓN | 805 | 97695 | 202 | 434 |
| ACS | 247 | 1469 | 168 | 213 |
| COCINA | 90 | 989 | 1 | |

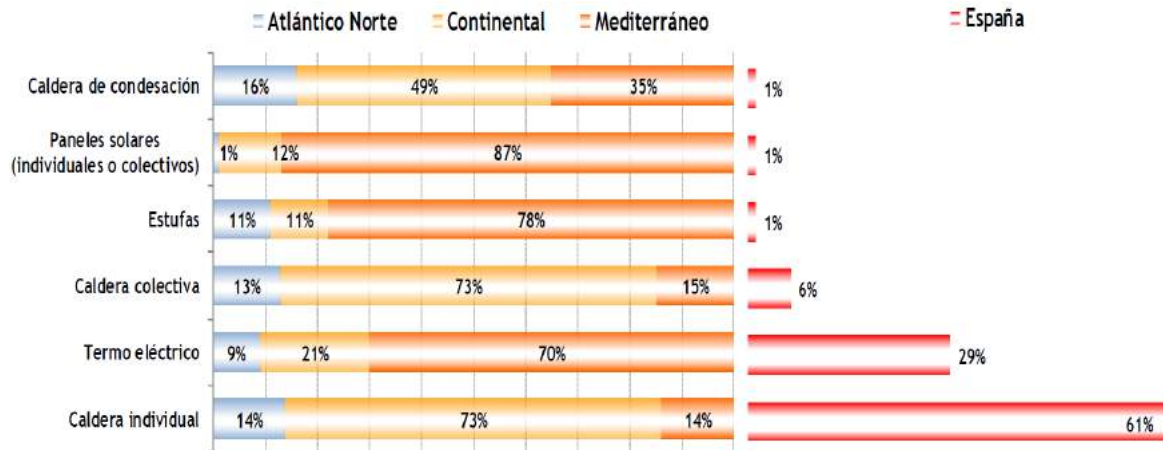
Fuente: IDAE (2011)

La biomasa supone el 16,7% del consumo de energía final para un hogar tipo siendo empleada para calefacción el 96,9% de la misma. Un estudio más detallado de dicha fuente nos lleva al reparto reflejado en la Tabla 1. Es muy destacable que prácticamente el 98% del consumo de biomasa la emplea prácticamente sin tratar, haciendo, por tanto, que el rendimiento no pueda ser tan elevado como en el caso de combustibles como los pellets, que presentan mayor homogeneidad en forma y composición.



Fuente: IDAE (2011), PROYECTO SECH-SPAHOUSEC. Análisis del consumo energético del sector residencial en España

Fig. 4. Distribución de sistemas de calefacción por zona climática.



Fuente: IDAE (2011), PROYECTO SECH-SPAHOUSEC. Análisis del consumo energético del sector residencial en España

Fig. 5. Distribución de sistemas ACS por zona climática.

Éste es, básicamente, el panorama energético actual dentro del sector residencial español, donde se puede comprobar que la biomasa tiene una presencia muy importante, aunque con un gran margen de mejora tanto en calidad del combustible como de los equipamientos asociados. En ese sentido, se están sentando las bases tanto a nivel Europeo (fundamentalmente a partir de la Directiva 2010/31/C) como a nivel Español (a través del Real Decreto 235/2013 y del PER 2011-2020), para tratar de mejorar el panorama energético asociado al sector residencial. Estas normativas fijan los mínimos de eficiencia energética y de recursos renovables en todos los ámbitos de la edificación.

La Directiva 2010/31/CE relativa a la gestión eficiente de la energía de los edificios, es de obligado cumplimiento en todos los países que conforman la UE. Su objetivo consiste en fomentar la eficiencia energética de los edificios situados en la Unión Europea, teniendo en cuenta las condiciones climáticas exteriores y las particularidades locales, así como las exigencias ambientales interiores y la rentabilidad en términos de coste-eficacia. Por lo que respecta a la metodología de cálculo, el marco común viene establecido en el Anexo I, donde se indica que la eficiencia energética de un edificio se expresará de forma clara e incluirá un indicador de la misma y un indicador numérico del consumo de energía primaria. Dicha metodología debe tener en cuenta, entre otros, la incidencia positiva de las condiciones locales de exposición al sol o aquellos sistemas de calefacción o producción de electricidad basados en energía procedente de fuentes renovables. En España, se traspone a través del Real Decreto 235/2013, de 5 de abril, por el que se aprueba el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios, implicando más de dos millones de certificados de eficiencia desde su entrada en vigor [5].

Por otro lado, el Plan de Energías Renovables (PER) 2011-2020 [4] elaborado por el IDAE, se apunta a grandes cambios para los próximos años en el entorno energético mundial, planteando una política energética en torno a tres

ejes: competitividad económica, conservación del medio ambiente y garantía de suministro, lo que está en consonancia con la promoción de las energías renovables. En el citado estudio se destaca el uso de la biomasa en el ámbito de la generación térmica, donde ha alcanzado cotas que la hacen competitivamente cercana a las energías fósiles.

La elaboración de dicho plan [4] fue precedida de una serie de estudios de evaluación del potencial de las energías renovables más representativas, resultando ser ésta muy superior a la demanda y a los recursos de origen fósil. Otro aspecto importante es que, a pesar de no destacar en generación eléctrica, la biomasa destaca en usos térmicos, con un gran potencial de 20 Mtep (15 Mtep solar térmica, 12 Mtep geotermia). Hay que tener en cuenta que los potenciales del uso térmico están estrechamente relacionados con su demanda ya que, a diferencia del caso eléctrico, la energía térmica no se puede transportar a grandes distancias.

De forma global el objetivo de consumo final de energías renovables en España quedó fijado dentro del PER en un 20,8% para 2020. Los usos térmicos en edificación tendrán que contribuir con una aportación significativa (25% del objetivo global). El sector de la edificación es, por tanto, estratégico para establecer la mejora de la eficiencia energética y de fomento de las energías renovables. Por otro lado, el desarrollo tecnológico de las aplicaciones térmicas con energías renovables ha despegado en los últimos años, contando actualmente con un amplio abanico de posibilidades para su integración en la edificación. La principal estrategia del PER para el fomento de renovables en la edificación pasa por la modificación del Código Técnico de la Edificación donde, además de una aportación solar para agua caliente sanitaria, incluiría la obligación de una contribución renovable mínima para usos térmicos en los edificios de nueva construcción o que se rehabiliten.

Previamente, el uso de la biomasa en la edificación se ha visto favorecida durante estos años por su inclusión en el

Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE) y su aplicación como tecnología que posibilita alcanzar la calificación energética A en edificios [5]. Se entiende pues que la aportación del sector de las energías renovables en general y la biomasa en particular a la economía es claramente positiva, convirtiéndose en un sector productivo más, generador de riqueza y de empleo, con alta relevancia en el desarrollo local de donde procede.

1.1. Definición de Biomasa

La biomasa se define de forma general como la fracción biodegradable de los productos desechados y residuos procedentes de la agricultura, de la silvicultura y de las industrias conexas, así como la fracción biodegradable de los residuos industriales y municipales [2001/77/CEE]. La Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), define la biomasa como “todo material de origen biológico excluyendo aquellos que han sido englobados en formaciones geológicas sufriendo un proceso de mineralización”. En general, se engloba a toda materia orgánica próxima en el tiempo susceptible de aprovechamiento energético. La biomasa proviene de fuentes diversas y con propiedades heterogéneas, permitiendo que los productos energéticos obtenidos puedan sustituir a un combustible sólido, líquido o gaseoso tanto en sus conversiones térmicas como eléctricas. Una definición tan abierta abarca un grupo muy heterogéneo de combustibles resultando de utilidad disgregar un poco más esta división en nuevas familias en función de su procedencia [4, 8]:

- Forestal: residuos procedentes de tratamientos y aprovechamientos de las masas vegetales para la defensa y mejora de éstas, obtenidos tras operaciones de corte, extracción, transporte y procesado (astillado, compactado, densificado...). Vinculado directamente con el sector forestal.
- Agrícola leñosa: procedentes de las podas de olivos, frutales o viñedos. Vinculado directamente con el sector agrícola y sus actividades.
- Agrícola herbácea: procedente de las explotaciones de cereales (paja y cañote de maíz) a través del empleo de maquinaria específica. Vinculado directamente con el sector agrícola y sus actividades.
- Industria forestal y agrícola: residuos generados en industrias de primera o segunda transformación de la madera (serrín, astillas, corteza,...) o derivados de procesos de cosechado agrícola como la uva y la oliva. También puede considerarse en este apartado la biomasa de parte de la madera recuperada.
- Cultivos energéticos: son cultivos destinados específicamente a la producción de materiales combustibles. Son de tipo herbáceo o leñoso y su tratamiento es semejante a los ya comentados, aunque ha cambiado la motivación inicial de la plantación. Cabe matizar que actualmente están siendo impulsados por diversos planes de promoción estatales, que los consideran una de las vías más ventajosas para el

desarrollo de la biomasa ya que colaboran en la resolución del problema de utilización del suelo agrícola español.

Resulta también útil la clasificación en nuevos grupos en función de su uso final [4]:

- Biomasa para generación térmica: dedicada al suministro de calor para uso térmico directo en instalaciones de calefacción, producción de ACS y/o procesos industriales. A través de su uso habitual ésta está dividida en aplicaciones para edificios (combustible de mayor calidad tipo pellet) y aplicaciones para procesos industriales. La biomasa más común en los usos térmicos suele derivar de industrias agrícolas (huesos de aceitunas y cáscaras de frutos secos), de las industrias forestales (astillas, virutas, ...) y de actividades silvícolas y de cultivos leñosos (podas, leñas, ...). Pueden ser transformados físicamente en pellets y briquetas, astillas molturadas y compactadas para facilitar su transporte, almacenamiento, alimentación y manipulación.
- Biomasa de generación eléctrica: dedicada en último término a la producción de electricidad, tanto de forma exclusiva como mediante sistemas de cogeneración o sistemas de co-combustión.

Como ayuda para profesionales del sector, el IDAE ha desarrollado dos herramientas informáticas para evaluar los recursos de biomasa en España, denominadas BIONLINE y BIDA. BIONLINE es una herramienta SIG para la evaluación del potencial de biomasa en función de sus orígenes y posibilidades de introducción en el mercado energético, así como costes de producción y disposición en el mercado [4]. Mientras que BIONLINE tiene una función más divulgativa, BIDA es una herramienta de uso propio del IDAE para la elaboración de proyectos más complejos.

También dentro de sus labores de divulgación técnica, el IDAE ha desarrollado mapas tecnológicos aplicados a tecnologías de generación de energía térmica habituales en el sector de la edificación (solar, geotermia y biomasa). Con ello, se ha desarrollado el estado del arte relativo a las principales tecnologías para generación de calor y frío renovable, incluyendo previsiones de futuro, iniciativas desarrolladas más relevantes, barreras con las que se encuentra el sector y proyectos de carácter innovador [9].

1.2. Comparativa de Costes de Energía

Según el Índice de precios de biocombustibles para el 1er trimestre del año 2018 (AVEBIOM), el informe de precios energéticos liberalizados del IDAE de 30 de abril 2018; los últimos datos de gas natural publicados en el BOE; y datos medios de mercado para electricidad, la biomasa sólida se consolida como el combustible más competitivo para el usuario final, manteniendo unos precios poco variables durante los últimos años:

Fósiles

- Gasóleo C: 6,69 c€/kWh
- GLP canalizado: 6,64 c€/kWh (+ coste fijo mensual)
- GLP butano-propano (11 kg): 8,77 c€/kWh
- Fuelóleo: 4,44 c€/kWh
- Gas natural: 5,16 c€/kWh (+ coste fijo mensual)

Biocombustibles

- Pellets saco de 15 kg: 5,54 c€/kWh
- Pellets granel: 4,69-5,05 c€/kWh
- Astilla de pino: 2,45 c€/kWh
- Hueso de aceituna: 3,23-4,02 c€/kWh

Electricidad

- Electricidad: 14,55 c€/kWh (+ coste fijo mensual)

Puede verse claramente en esta introducción que, a raíz de la crisis económica de 2008, lejos de hacer menguar el mercado energético derivado de la biomasa sólida, la está haciendo más competitiva y que constituya uno de los sectores que contribuye al crecimiento económico del país como puede verse en el informe elaborado por la misma asociación titulado “Rotunda aportación de la biomasa al crecimiento de España” (Bioenergía, Valladolid octubre 2012).

Tabla 2

Comparativa de costes finales de energía

| CATEGORÍAS DE COSTES | UNIDAD | TRONCOS WOOD (a) | TRONCOS WOOD (b) | ASTILLAS | PELLETS | GAS NATURAL | FUELOIL | GLP |
|--|--------|------------------|------------------|----------|---------|-------------|---------|--------|
| Tipo de interés | % | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Duración de la inversión (años) | año | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Capacidad de la caldera | KW | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Funcionamiento anual (horas) | h | 1,300 | 1,300 | 1,300 | 1,300 | 1,300 | 1,300 | 1,300 |
| Producción de energía primaria | MWh/a | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 |
| Eficiencia global por temporada | % | 75% | 75% | 79,0% | 84% | 90% | 85% | 90% |
| Producción final de energía* | MWh/a | 97.50 | 97.50 | 102.70 | 109.20 | 117.00 | 110.50 | 117.00 |
| Costes de inversión (IVA incl.) | € | 45,000 | 45,000 | 65,000 | 40,000 | 13,000 | 18,000 | 13,000 |
| Amortización | €/año | 1,361 | 1,361 | 1,966 | 1,210 | 393 | 544 | 393 |
| Demanda anual de combustible | u.m.** | 32.7 | 32.7 | 38.2 | 28.3 | 13,542 | 13,000 | 19,062 |
| Coste/precio de combustibles** | €/u.m. | 77 | 130 | 88 | 216 | 0.72 | 1.04 | 1.22 |
| Coste del consumo anual de combustible (a) | €/año | 2,944 | 4,971 | 3,365 | 6,104 | 9,750 | 13,463 | 24,863 |
| Coste de electricidad (b) | €/año | 50 | 50 | 200 | 100 | 30 | 30 | 30 |
| Coste de explotación (O=a+b) | €/año | 2,994 | 5,021 | 3,565 | 6,204 | 9,780 | 13,493 | 24,893 |
| Coste de limpieza (c) | €/año | 130 | 130 | 130 | 130 | 60 | 60 | 60 |
| Gastos de mantenimiento (d) | €/año | 300 | 300 | 400 | 200 | 95 | 95 | 95 |
| Coste corriente (E=c+d) | €/año | 430 | 430 | 530 | 330 | 155 | 155 | 155 |
| COSTES anuales (R+O+E) | €/año | 4,785 | 6,812 | 6,060 | 7,744 | 10,328 | 14,192 | 25,441 |
| COSTES FINALES DE LA ENERGÍA | €/MWh | 49.08 | 69.87 | 59.01 | 70.92 | 88.27 | 128.44 | 217.44 |

* Poderes caloríficos utilizados: troncos M20, 3,98 MWh/t, astillas M30, 3,4 MWh/t, pellets M10 4,6 MWh/t, gas natural, 9,6 kWh/m³, fueloil 10 kWh/l, GLP, 6,82 kWh/l.

** Precios (IVA incluido; para los combustibles de madera el IVA es del 10%, excepto para pellets que es del 20%)

Abreviaturas: Troncos (a): producción propia, tamaño deseado; Troncos (b): comprados en el mercado local (P500); Astillas: M30 P45.

Fuente: AVEBIOM (2008)

A modo ilustrativo, es interesante comprobar a través de una evaluación económica los costes finales de la energía

incluyendo los gastos de inversión y explotación. En ese sentido, en el estudio “Manual de combustibles de Madera” de la asociación AVEBIOM (2008), se incluye una comparativa (Tabla 2) para una vivienda unifamiliar de 100 m² en el norte de Italia donde claramente los combustibles derivados de biomasa tienen unos costes finales de energía inferiores a los combustibles fósiles habituales.

Para finalizar este apartado de introducción, en cuanto a la estructura del presente capítulo, se ha desarrollado con el objetivo de que el lector consiga por un lado una visión general de la biomasa como recurso energético y por otro, profundizar en el diseño del aprovechamiento de la misma.

En este apartado introductorio se ha definido la biomasa y se le ha posicionado en comparación con el resto de los recursos energéticos. En el apartado 2 se presentarán sus propiedades básicas como combustible. En el apartado 3 se clasificarán los diferentes tipos de biomasa, así como la logística de su aprovisionamiento. El apartado 4 tratará sobre el proceso y los dispositivos de conversión más comunes para su aprovechamiento como es la combustión y las calderas. En el apartado 5 se presentará un ejemplo práctico de aplicación de los conceptos aprendidos y se finalizará con un último apartado de conclusiones.

2. Aspectos teóricos básicos para cálculo

Del mismo modo que cualquier otro tipo de combustible, la biomasa sólida empleada para producción de energía en calderas debe cumplir una serie de normas. Su sometimiento a un proceso de estandarización establece unas propiedades mínimas que garanticen su viabilidad en los sistemas de combustión existentes. Uno de sus problemas actualmente radica en la falta de unificación normativa en toda la Unión Europea. Existen diversos estándares de calidad, de entre los cuales suelen imponerse en el mercado de productores las normas de aquellos países con más tradición en biomasa, como es el caso de Austria y la Önorm. Por esta razón, actualmente un comité técnico ISO (ISO TC 238 [10]) centra su actividad en la estandarización de terminología, especificaciones y clasificación de combustibles sólidos tanto procesados como materiales en crudo provenientes de agricultura, silvicultura, etc. De entre todos los tipos de combustibles normalizados (astillas, viruta, serrín, briquetas, etc.), el de uso más extendido es el pellet. Las principales ventajas están relacionadas con el procesado (densificación) de la materia prima. A pesar de que se encarece el precio final, mediante la densificación se obtiene un combustible de mucha mayor calidad, con más energía por unidad de volumen y mucho más homogéneo [11-13]. Además, se facilita la manejabilidad y se reducen los costes logísticos. En comparación con las briquetas, el menor tamaño de las partículas del pellet favorece la automatización de su alimentación, factor clave para convertirlo en un combustible mucho más interesante para las calderas modernas. La alimentación automática y la homogeneidad son factores vitales para regular las condiciones de operación de las calderas, que afectan de manera directa a

su eficiencia y emisiones, especialmente si ésta es de baja potencia.

A pesar de todas estas ventajas, bajo un punto de vista económico puede resultar interesante la posibilidad de emplear otra clase de materiales mucho menos procesados. Estos procederían de diversas actividades relacionadas con la industria agrícola y están concebidos para ser empleados tal y como son recibidos o como mucho, después de haber sufrido algún proceso simple de selección. Aunque sus características como combustible sean "peores", su competitividad radica en que son desechos de algún proceso, y por tanto, tienen un reducido coste. Tal es el caso de materiales como las cáscaras de frutos secos (almendra, avellana, ...), huesos de aceituna excedentes de la producción de aceite, serrín sin procesar procedente de alguna industria maderera, o desechos de piña procedentes del aprovechamiento de los piñones (cáscara de piñón y escamas). También se podrían añadir en este conjunto, combustibles que, aunque procesados, su coste es reducido o están subvencionados debido a que el objetivo fundamental es su eliminación. En este caso, hablaríamos de productos de desecho (residuos sólidos urbanos o lodos de depuradora). El estudio de viabilidad de todos estos combustibles representa una importante área de trabajo actualmente, ya que podrían contribuir de manera determinante al desarrollo de la biomasa como fuente energética [12].

Cualquier estudio para la utilización de un combustible sólido pasa por su caracterización para analizar su viabilidad. Para ello, es necesario obtener previamente una muestra representativa. Habitualmente, se emplea el *método del cuarto*, que consiste en ir separando sucesivamente la cuarta parte del demuestre anterior hasta conseguir el tamaño muestral deseado. La primera característica a la que se debe prestar atención en un combustible sólido es su *aspecto*, ya que la observación directa de las partículas de combustible puede ofrecer información muy interesante acerca del mismo (adecuación del tamaño al sistema de alimentación, contenido en humedad y/o en estado de descomposición, etc.). Quizás una de las propiedades más importante a analizar en una descripción visual general del combustible sea la friabilidad. Una baja friabilidad representa una alta resistencia al desmenuzamiento y ayuda a asegurar que las partículas mantienen su geometría hasta el momento de ser introducidas en el sistema de combustión. Igualmente, un combustible muy friable provocará una manipulación más incómoda, generando mucho polvo y partículas pequeñas más difíciles de manejar [14, 15]. A pesar de que es una propiedad difícilmente cuantificable, sí que es bastante sencillo obtener una medida cualitativa de la tendencia de un combustible a fragmentarse. Tras la inspección visual inicial es necesario realizar el resto de análisis como el inmediato, el elemental, etc. para poder caracterizar con rigor el combustible.

2.1. Densidad

La densidad de la madera se ha utilizado desde el S. XVIII como un parámetro definitorio de la calidad de la misma como material de construcción. La mayoría de las piezas de biomasa tienen densidad inferior a la del agua en condiciones ambiente (aprox. 1000 kg/m^3), por lo que flotan en ella. No obstante, la fibra que conforma la biomasa (biomasas lignocelulósicas) ronda los 1500 kg/m^3 , debiéndose esta diferencia a la porosidad interna de los propios materiales. Por otra parte, los productos densificados (briquetas y pellets) procedentes de biomasa lignocelulósica pueden alcanzar fácilmente densidades por encima de 1000 kg/m^3 .

Se puede definir la densidad, ρ_p , como el cociente entre la masa de una pieza individual de biomasa y el volumen que ocupa en el espacio. La densidad del producto está también afectada por el contenido de humedad, siendo ésta variable a lo largo del tiempo. Los valores de la densidad se darán en $[\text{kg/m}^3]$, $[\text{g/dm}^3]$, $[\text{g/l}]$ o $[\text{g/cm}^3]$ acompañadas siempre de la humedad del producto.

El método empleado para su determinación es el conocido como "*método de la parafina*", Figura 6, que consiste en la determinación del volumen de una pieza individual de biomasa mediante el desplazamiento del agua que origina. Cada muestra se recubre de parafina (ya que la biomasa es altamente higroscópica) y se sumerge en un recipiente rebosante de agua, el cual está dotado de un tubo lateral por donde se recoge el agua desplazada. La operación de inmersión de la briqueta se repite tres veces sucesivas. Conocidos los pesos de la pieza y la parafina, así como los volúmenes de agua desplazada y de la parafina, se procede a determinar la densidad. Previamente, en cada lote de parafina utilizado se determina su densidad (habitualmente en torno a $0,890 \text{ kg/m}^3$).



Fig. 6. Sistema usado para la determinación de la densidad por el método de la parafina.

2.2. Densidad aparente del empaquetamiento o a granel

La densidad aparente, ρ , (kg/m^3 , g/dm^3 , g/l ó g/cm^3) del empaquetamiento o a granel es el cociente entre la masa de un conjunto de piezas individuales de biomasa y el volumen ocupado por dicho conjunto o lecho. Se denomina de forma general “lecho” al lugar físico en el que se encuentra el pellet que está siendo sometido a algún tipo de proceso termoquímico. En el caso de la combustión, el reactor que se emplea habitualmente es una caldera y el lecho sería el hogar de la misma, como se verá posteriormente. Es una variable determinante en los procesos de almacenamiento y alimentación.

Una unidad adimensional asociada a la densidad aparente es la porosidad, ε , definida como la fracción en volumen de huecos en el empaquetamiento, es decir, el cociente entre el volumen de huecos y el volumen ocupado por el conjunto. Se entiende por empaquetamiento el ordenamiento de cuerpos sólidos sin solapamiento llenando un volumen [16]. La mayoría de los estudios en este campo se refieren a partículas esféricas idénticas y son muy poco habituales aquellos que conciernen a conjuntos de cuerpos no esféricos con una distribución granulométrica diversa, como en el caso de los combustibles que nos atañen. Si la densidad de la partícula individual, ρ_p , es conocida, se puede obtener de manera sencilla la porosidad o fracción de huecos en el empaquetamiento como $\varepsilon = 1 - \rho/\rho_p$.

El efecto de las paredes de lecho induce comúnmente un ordenamiento forzado en las zonas cercanas, que decae progresivamente al alejarse de las mismas [17]. La base del contenedor en el que se recoge el lecho provoca el mismo efecto, que desaparece totalmente a una distancia de 5 ó 6 diámetros [18]. Por esta razón, en esas zonas se generan canales de aire preferentes, provocando corrientes locales y flujo no homogéneo a través del empaquetamiento, lo que es indeseable. Para evitar la influencia de estos efectos en el conjunto, es preciso trabajar con un lecho que rompa esa estructura de bordes. Generalmente, se consigue con inserciones o deformaciones aleatorias de las paredes del mismo. Para el caso de partículas esféricas de un único tamaño, el Máximo Empaquetamiento Teórico (Maximally Ordered Packing MOP) que se puede conseguir es 0,7405. Si se emplean métodos de vibración o agitación, se puede conseguir una porosidad un poco menor. La vibración se consigue en los procesos de transporte y alimentación, donde la agitación de los diferentes medios empleados hace aumentar la densidad a granel. De forma general, se puede afirmar que, aunque el empaquetamiento está condicionado por un gran número de factores, su comportamiento es únicamente dependiente del tamaño y forma de las partículas [19].

El procedimiento de obtención de la densidad aparente lo determina la norma CEN/TS 15103. Para ello se emplea un recipiente cilíndrico de dimensiones 500x300 mm. Se vierte el combustible desde una altura cercana a los 300 mm. hasta que desborde y, acto seguido, se enrasa. La diferencia de masa devuelve el peso y, con el volumen conocido del recipiente, es posible obtener la densidad a

granel. Se emplea como valor final el promedio de 3 medidas diferentes.

- *Ejemplo de cálculo de la porosidad*

Enunciado: calcular la porosidad de un lecho de pellets con densidad de 1150 kg/m^3 donde en la prueba de densidad aparente un volumen de 10 l contenía 5,87 kg.

Solución:

$$\varepsilon = 1 - \rho/\rho_p = 1 \text{ m}^3 \text{ lecho}/\text{m}^3 \text{ lecho} - (5,87 \text{ kg pellet}/10 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ lecho})/(1150 \text{ kg pellet}/\text{m}^3 \text{ pellet}) = 1 \text{ m}^3 \text{ lecho}/\text{m}^3 \text{ lecho} - 0,51 \text{ m}^3 \text{ pellet}/\text{m}^3 \text{ lecho} = 0,49 \text{ m}^3 \text{ huecos}/\text{m}^3 \text{ lecho}.$$

2.3. Friabilidad. Resistencia a la rotura

Este factor es una medida de la resistencia mecánica de la biomasa a la rotura, que la afectará principalmente durante su manejo y transporte. Suele aplicarse a productos densificados, briquetas y pellets, y también puede emplearse con cualquier otro combustible frágil, como por ejemplo el carbón vegetal. Esta característica determina el grado de deterioro previsible para condiciones de almacenaje, carga y/o transporte a granel y, por tanto, la susceptibilidad al empleo de sistemas que impliquen una manipulación y manejo más o menos violento. Las pruebas se pueden hacer en un tambor rotatorio o golpeando repetidamente las muestras desde una altura especificada. En ambos métodos, las muestras son tamizadas y, tras realizar una separación por tamaños y el análisis granulométrico correspondiente, se define el “Índice de Friabilidad”, que es indicativo de la susceptibilidad al fraccionamiento. La especificidad de esta propiedad excede el objetivo de este capítulo por lo que sólo se dan algunas nociones que permitan entender el resto del mismo.

2.4. Humedad

Definida como el contenido en “agua en el combustible, extraíble bajo condiciones específicas” según la norma UNE-EN ISO 16559. Su determinación viene marcada por la norma UNE-EN ISO 18134, a través de la cual se mide la pérdida de masa de la muestra a 105°C en un horno, hasta alcanzar peso constante. El estado de la biomasa en función de su contenido en humedad, se puede reflejar de diversas formas:

- *Biomasa con la humedad de recepción.* Los resultados dados en esta base reflejan con exactitud la composición de la biomasa, pero no es posible manipular estas muestras con el grado de humedad con que se reciben pues plantean problemas en los desmuestres y en la reducción de tamaño.
- *Biomasa con humedad estabilizada.* La estabilización se puede conseguir mediante acondicionamiento en cámara climática o por secado en el ambiente del laboratorio. Conviene recordar que en un mismo lote de

biomasa, se tendrán diferentes humedades, según se trate de muestras procedentes de las zonas superficiales o interiores. Por otra parte, la humedad de recepción varía notablemente durante la manipulación en el laboratorio, tendiendo a la humedad de equilibrio con las condiciones climáticas del mismo. Es por ello, que no se recomienda el uso de esta base de cálculo.

- *Biomasa libre de humedad.* La muestra se libera de su humedad por secado en estufa a 105°C hasta alcanzar peso constante. Esta situación de la muestra es fácilmente reproducible en cualquier momento, a la vez que permite una manipulación idónea, tanto en las fases de demuestre como de molienda. Aunque la muestra gane algo de humedad durante estas etapas, fácilmente se puede volver a la situación de humedad cero.

Los datos del análisis inmediato, descrito a continuación, se obtienen y facilitan en base a la biomasa libre de humedad (base seca, bs). Conociendo la humedad de recepción de la muestra, se pueden determinar los anteriores parámetros en base húmeda (bh). El cambio entre base húmeda y base seca se lleva a cabo empleando las siguientes expresiones:

$$W (\%bh) = 100 \cdot W (\%bs) / (100 + W (\%bs))$$

$$W (\%bs) = 100 \cdot W (\%bh) / (100 - W (\%bh))$$

- *Ejemplo de cálculo de humedades*

Enunciado: en una limpieza de montes se obtuvieron 2 Tm de biomasa húmeda la cual se almacena a cubierto hasta que su peso se estabiliza a 1800 kg. Se extrae una muestra de 20 kg que se calienta a 115°C hasta que su peso se estabiliza a 17 kg. Calcular las humedades en base húmeda y en base seca.

Solución:

Humedad de la muestra estabilizada en base húmeda:

$$W_{estabilizada} (\%bh) = (20 \text{ kg} - 17 \text{ kg}) / 20 \text{ kg} = 15 (\%bh) = 0,15 \text{ kg agua/kg biomasa con humedad estabilizada.}$$

La cantidad de agua total de la muestra estabilizada es 0,15 · 1800 kg biomasa con humedad estabilizada = 270 kg de agua.

$$W_{total} (\%bh): [270 + (2000 - 1800)] \text{ kg agua totales} / 2000 \text{ kg biomasa con humedad de recepción} = 23,5 (\%bh)$$

$$W_{total} (\%bs): [270 + (2000 - 1800)] \text{ kg agua totales} / (1800 - 0,15 \cdot 1800) \text{ kg biomasa seca} = 30,7 (\%bs)$$

$$\text{Comprobación: } 30,7 (\%bs) = 100 \cdot 23,5 (\%bh) / (100 - 23,5 (\%bh))$$

2.5. Análisis inmediato. Contenido en volátiles, carbono fijo y cenizas

Permite obtener información de cómo se descompondrá la biomasa durante el proceso de combustión. Consta de tres pruebas que determinan el contenido en volátiles, cenizas y carbono fijo:

- *Volátiles.* Definidos como la pérdida en peso al calentar la muestra en atmósfera inerte. Obtenidos a partir de la pérdida en peso de la muestra, previamente secada, en horno de mufla a 950°C, en crisol tapado con un tiempo de residencia de 5 minutos previo calentamiento progresivo. Resultado expresado en %bs. El procedimiento de determinación está basado en la norma UNE 32019-84.
- *Cenizas, A(%).* Masa de residuo inorgánico que permanece tras la combustión. Su determinación se realiza en base a la norma UNE 32004, introduciendo la muestra, en crisol abierto, a 800°C durante 5 horas en horno de mufla. Habitualmente, el resultado es expresado en %bs. Para combustibles derivados de la madera, el contenido en cenizas suele ser muy pequeño, típicamente menor del 1%, no obstante, en otros tipos de combustibles sólidos, como el carbón o los residuos sólidos urbanos, su presencia puede llegar a alcanzar el 10%. Las cenizas están a su vez constituidas por diferentes elementos de origen mineral, entre los que generalmente se encuentran el Aluminio, Cadmio, Hierro, Potasio, Sodio...
- *Carbono fijo (char).* Materia orgánica remanente tras la eliminación de la humedad, los volátiles y las cenizas. Calculado por diferencia a cien de cenizas y volátiles en % (bs). Básicamente constituido por carbono.

Si bien los contenidos de cenizas son fijos y poco dependientes de las condiciones térmicas de experimentación, las proporciones de volátiles y carbono fijo están íntimamente ligadas a las velocidades de calentamiento en los ensayos: velocidades elevadas favorecen la formación de volátiles, en detrimento del char.

- *Ejemplo de análisis inmediato*

Enunciado: una muestra de 1 kg de biomasa se seca a 105°C hasta peso constante de 900 gr. Posteriormente, se mantiene a 950°C en ausencia de oxígeno durante 5 minutos, quedando un residuo de 120 gr. Por último, se quema completamente, obteniéndose un residuo incombustible de 10 gr. Determinar el análisis inmediato.

Solución:

$$W (\%bh) = (1000 - 900) / 1000 = 10 (\%bh)$$

$$Vol (\%bs) = (900 - 120) / 900 = 86,7 (\%bs)$$

$$A (\%bs) = 10 / 900 = 1,1 (\%bs)$$

$$CF (\%bs) = 100,0 - 86,7 - 1,1 = (120 - 10) / 900 = 12,2 (\%bs)$$

2.6. Análisis elemental

El análisis elemental trata de determinar el contenido en aquellas especies químicas que se gasificarán y/o supondrán un aporte calorífico en las reacciones de combustión. Se realiza siguiendo las normas UNE-EN ISO 16948:2015 y UNE-EN ISO 16994:2017. Estos elementos se expresan en %bs, y son: Carbono, Hidrógeno, Azufre, Nitrógeno y Oxígeno:

- *Carbono*: procede de la fracción orgánica y de los carbonatos minerales. Será la suma del carbono fijo y del contenido en las materias volátiles.
- *Hidrógeno*: el hidrógeno está presente tanto en la fracción orgánica (en forma de humedad y combinada con C y O formando alquitranes); como en la inorgánica (como agua de constitución de los silicatos de la materia mineral).
- *Azufre*: durante la combustión, el azufre como impureza forma óxidos y por hidratación, ácido sulfúrico. Este último, corroe piezas de hornos y calderas, siendo además sus emisiones contaminantes y malolientes.
- *Nitrógeno*: el nitrógeno se encuentra en pequeños porcentajes. Al ser inerte, no produce ningún efecto perjudicial, excepto que obliga en su manipulación a gastar energía. Al igual que las cenizas, disminuye la cantidad de energía disponible por tonelada de combustible.
- *Oxígeno*: el contenido en oxígeno se estima por diferencia a 100 de la suma de carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre y cenizas. El oxígeno rebaja la potencia calorífica del combustible, aunque contribuye a satisfacer las necesidades del aire de combustión.

2.7. Molécula equivalente

La composición másica de una muestra de combustible sólido tomada tal y como se recibe (con cenizas y humedad) y expresada en base húmeda con cenizas (bhcc), estará integrada, tal como se comentó, esencialmente por *carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno*, además de otros elementos que, en menor proporción, aparecen vinculados al combustible de distintas formas. Típicamente, se distinguen en una muestra los siguientes compuestos:

- Fracción combustible del pellet (CH_yO_x), que a su vez, está constituida por:

- *Ejemplo de cálculo de molécula equivalente*

Enunciado: Un pellet tiene un análisis inmediato con un contenido de $W(\%bh) = 9,250$ y, $A(\%bh) = 0,680$. Por su análisis elemental, tiene un contenido en $C(\%bh) = 46,996$, $N(\%bh) = 0,117$ y $H(\%bh) = 6,061$. Determinar su molécula equivalente y su masa molecular.

- C: carbono
- $H_{CH_yO_x}$: hidrógeno del combustible
- $O_{CH_yO_x}$: oxígeno del combustible
- Humedad (W):
 - H_{H_2O} , hidrógeno del agua
 - O_{H_2O} , oxígeno del agua
- Nitrógeno (N)
- Cenizas (A)

En resumen, un análisis en laboratorio de la composición de cenizas y de la composición elemental del pellet proporciona, habitualmente, los siguientes datos expresados en términos de muestra en base húmeda (bhcc):

- Proporción de cenizas = A (%)
- Humedad = W (%)
- Análisis elemental
 - Proporción de carbono = C (%)
 - Proporción de nitrógeno = N (%)
 - Proporción de hidrógeno = H (%)

El oxígeno O (g), generalmente se calcula como diferencia a 100. Tomando como base de cálculo 100 g (100%) de muestra de pellet (bhcc), se establecen las siguientes relaciones másicas que permiten determinar la ecuación química de la fracción combustible de pellet:

$$CH_yO_x (g) = 100 (g) - A (g) - W (g) - N (g)$$

Parte del oxígeno y del hidrógeno proceden de la humedad:

$$O_{H_2O} (g) = (PM_O/PM_{H_2O}) \cdot W (g) \quad H_{H_2O} (g) = (PM_H/PM_{H_2O}) \cdot W (g)$$

Donde PM_i ($kg \cdot mol^{-1}$) es el peso molecular de la especie i. Por tanto, el hidrógeno y el oxígeno no asociados a la humedad de la muestra y presentes en la fracción combustible de pellet (CH_yO_x) será:

$$O_{CH_yO_x} (g) = O (g) - O_{H_2O} (g)$$

$$H_{CH_yO_x} (g) = H (g) - H_{H_2O} (g)$$

De donde se obtiene la composición molar equivalente de la fracción combustible (bhcc):

$$x = (O_{CH_yO_x} (g) / PM_O) / (C_{CH_yO_x} (g) / PM_C)$$

$$y = (H_{CH_yO_x} (g) / PM_H) / (C_{CH_yO_x} (g) / PM_C)$$

Solución

| | | ACUMULADO |
|---------------|--|-----------|
| 100 gr pellet | 0,680 gr cenizas (sin C, H, O ni N) | 0,680 |
| | 0,117 gr N | 0,797 |
| | 9,250 gr H ₂ O | 9,017 |
| | $9,25 \cdot 16 / 18 = 8,22$ gr O $9,25 \cdot 2 / 18 = 1,03$ gr H | 10,047 |
| | $100 - 10,047 = 89,953$ gr CH _y O _x $M_R = 12 + y + 16x$ | 57,043 |
| | $46,996$ gr C (3,916 moles C) $6,061 - 1,03 = 5,031$ gr H (5,031 moles H) $100 - 62,074 = 37,926$ gr O (2,370 moles O) | 62,074 |
| | | 100 |

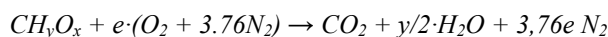
$y = 5,031 / 3,916 = 1,285$ $x = 2,370 / 3,916 = 0,605$ Compuesto seco sin cenizas y sin N **CH_{1,285}O_{0,605}**
 $PM_{CH_yO_x} = 12 + y + 16x = 22,965$ gr/mol.

Por tanto, la composición elemental con el oxígeno calculado queda de la siguiente forma (pellet en bruto):

| | BH | BS | BSSC | BSSC y SN |
|-----------------------|--------|--------|--------|-----------|
| C | 46,996 | 51,786 | 52,177 | 52,245 |
| H | 5,031 | 5,544 | 5,586 | 5,593 |
| O | 37,926 | 41,792 | 42,107 | 42,162 |
| N | 0,117 | 0,129 | 0,130 | - |
| H₂O | 9,25 | - | - | - |
| ASH | 0,68 | 0,75 | - | - |

2.8. Aire mínimo combustible o aire estequiométrico

Una vez determinada la formulación de la fracción combustible de pellet (CH_yO_x), será útil calcular la cantidad de aire necesario para la combustión. El aire mínimo teórico para la oxidación completa del combustible, o aire estequiométrico a_e ($n_{aire} / n_{CH_yO_x}$), se define como la cantidad mínima de aire necesaria para que toda la muestra pueda reaccionar completamente con el oxígeno, formando CO₂ y H₂O. Su valor se obtiene del ajuste de las especies en la reacción química correspondiente. Para su cálculo, se supone aire técnico, compuesto de un 21% de oxígeno y un 79% de nitrógeno en base molar:



$$e = 1 + y/4 + x/2 \text{ [mol } O_2 \text{/mol comb]}$$

$$A_e = 4,76 \cdot e \text{ [mol aire/mol comb]}$$

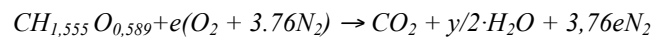
$$A_e = 4,76 \cdot e \cdot PM_{aire} / PM_{CH_yO_x} \text{ [g aire/g comb]}$$

En general, para la combustión del combustible se suministra más aire que el mínimo necesario. El cociente entre el aire realmente suministrado y el mínimo necesario se denomina "exceso de aire" y se representa por la letra n .

- Ejemplo de cálculo del aire estequiométrico

Enunciado: calcular el aire estequiométrico de un combustible con molécula equivalente CH_{1,555}O_{0,589} ($PM_{CH_yO_x} = 22,979$ gr/mol).

Solución:



$$e = 1,095 \text{ [mol } O_2 \text{/mol comb]}$$

$$A_e = 5,21 \text{ [mol aire/mol comb]}$$

$$A_e = 4,76 \cdot e / PM_{CH_yO_x} \text{ [mol aire/g comb]} = 0,227 \text{ [mol aire/g comb]}$$

A_e representa la cantidad de aire mínimo necesario para oxidar completamente 1 mol de molécula equivalente. Esto no es directamente utilizable, ya que la molécula equivalente no representa a todo el combustible (sólo la parte que se oxidará). Por otra parte, el aire usado en el cálculo es un aire técnico seco, y lo habitual es que el aire empleado sea el de la atmósfera, que contiene humedad. Por tanto, se tratará de ampliar la utilidad del cálculo, inicialmente extrapolando el resultado al combustible real y luego, teniendo en cuenta la humedad del aire atmosférico. Según lo dicho, y expresado con mayor precisión tenemos:

$$A_e = 0,227 \text{ [mol aire seco/g comb sin cenizas (A) sin N sin agua (W)]}$$

Supongamos que el combustible tiene un 0,62 A (%bh), 0,16 N (%bh) y 8,5 W (%bh). Por tanto, 1 g de combustible húmedo tiene un contenido de $(1 - 0,0062 - 0,0016 - 0,085) = 0,907$ g combustible sin cenizas (A) sin N sin agua (W). Por tanto:

$$A_e = 0,227 \cdot 0,907 = 0,206 \text{ [mol aire seco/g combustible]}$$

Por otro lado, y debido a que el aire es húmedo, se procederá a calcular cuánto aire húmedo es necesario suponiendo que $t_{\text{ambiente}} = 22^{\circ}\text{C}$, $p_{\text{ambiente}} = 1\text{atm}$ y $\text{HR} = 50\%$. En este caso no se describirá la teoría sobre psicrometría necesaria para el cálculo, pues excede el objetivo de este capítulo:

$$\phi = 0,0083 \text{ gr agua/gr aire seco} \rightarrow 0,013 \text{ mol agua/mol aire seco}$$

1 mol aire seco está contenido en 1,013 moles aire húmedo

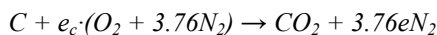
$A_e = 0,206 \cdot 1,013 = 0,209$ moles aire húmedo/gr. combustible. 1 mol aire húmedo a 22°C y 1 atm ocupa 24,19 litros

$$A_e = 0,209 \cdot 24,19 = 5,04 \text{ litros aire húmedo/gr. combustible}$$

$$AC_{\text{estequio}} = 5,04 \text{ litros aire húmedo/gr. combustible}$$

2.9. Aire mínimo para la oxidación completa del char

A medida que el combustible se descompone, va liberando, en diferentes fases, primero el agua (secado) y luego los volátiles. Finalmente, y a temperaturas más elevadas, se oxida el carbono fijo (char), permaneciendo como único residuo las cenizas, siempre que el proceso sea una combustión completa. En la fase de calentamiento y secado, tendremos la molécula de combustible equivalente seca, con un valor para el aire estequiométrico obtenido como acabamos de ver en la sección anterior. Sin embargo, para la combustión de carbono fijo, se supondrá una molécula equivalente diferente. A pesar de que el char puede contener pequeñas cantidades de Hidrógeno, Nitrógeno y Oxígeno, el contenido en carbono es superior al 90%. Por ello, se suele considerar su combustión suponiéndolo carbono puro [20-22], con lo que la reacción estequiométrica de oxidación, quedará como se muestra:



$$e_c = 1 \text{ [mol } O_2/\text{mol comb]}$$

$$(A_e)_c = 4,76 \text{ [mol aire/mol comb]}$$

$$A_e = 4,76 \cdot PM_{\text{aire}}/PM_C = 11,46 \text{ [g aire/g char]}$$

En general, para la combustión del char se suministra más aire que el mínimo necesario. El cociente entre el aire realmente suministrado y el mínimo necesario se denomina “exceso de aire” y se representa por la letra n_c .

2.10. Poder Calorífico

El Poder Calorífico es la propiedad que define el contenido de energía del combustible, la cual es susceptible de ser obtenida mediante su oxidación. Esta definición es muy imprecisa, ya que dicho calor depende de las condiciones de combustión. Una definición más científica

es la correspondiente al Poder Calorífico Superior (PCS) y al Poder Calorífico Inferior (PCI). Por definición, el PCS es el calor liberado en una combustión completa donde reactivos y productos están a la misma temperatura y el agua en los productos en estado líquido. Lógicamente, esto no es lo que sucede en una combustión real, donde el agua sale en estado vapor (excepto en calderas de condensación). Un valor más próximo a la realidad de los calores liberados en combustión es el PCI, cuya definición es la misma que el PCS, con la salvedad de que el agua en los productos está en estado vapor. El valor de PCI será siempre inferior al PCS, puesto que no contabiliza el calor latente asociado al cambio de estado del agua durante su condensación. El PCS se determina experimentalmente en una bomba calorimétrica, según la norma UNE-EN ISO 18125:2008. Aunque durante la combustión de un combustible en un sistema real, se ceda una cantidad de calor equivalente al poder calorífico inferior, PCI, esta cantidad de calor no es íntegramente utilizable. Esto se debe a que, durante la evacuación de los humos calientes, estos se llevan parte del calor producido, originando pérdidas. La cantidad de calor que realmente puede ser utilizada será aquella resultante de restar al PCI las pérdidas de calor latente en los humos, y recibe el nombre de *poder calorífico real o útil*.

A lo largo de los años también han aparecido numerosas publicaciones afrontando la problemática de su estimación a partir de la composición de la materia prima, tanto en el ámbito del carbón como de la biomasa. Muchas de ellas se basan en el análisis inmediato del combustible [23], otras (generalmente más precisas) en el elemental [24] y algunas para la madera, simplemente en el contenido de lignina [25], logrando aproximaciones bastante precisas. Todas estas estimaciones parten de la conocida correlación de Dulong, modificando los coeficientes de manera que se adapten lo mejor posible al tipo de combustible usado. Una de las más precisas es la correlación de Channiwala para el cálculo del PCS [26], siendo su empleo ampliamente difundido y contrastado. Para la obtención del PCI se parte del PCS y se elimina la energía derivada de los elementos con hidrógeno, ya que son susceptibles de formar agua.

$$PCS = 0,3491 \cdot C + 1,1783 \cdot H + 0,1005 \cdot S - 0,1034 \cdot O - 0,0151 \cdot N - 0,0211 \cdot A \text{ [MJ/kg]}$$

$$PCI = PCS - 0,4186 \cdot [5,828 \cdot (9H + W)] \text{ [MJ/kg]}$$

Donde C, H, O, S, N y A son los contenidos en Carbono, Hidrógeno, Oxígeno, Azufre, Nitrógeno y Cenizas, respectivamente, expresados en % en masa.

2.11. Potencia Térmica

Se ha definido como *Potencia Térmica* el total de energía suministrada al sistema, por unidad de tiempo, a través de la dosificación del pellet, con independencia de su aprovechamiento. La energía suministrada por los pellets se estima a través de su poder calorífico inferior en base húmeda (PCI_{bh}). El valor del poder calorífico del combustible podrá haber sido determinado de forma teórica

(a partir de su composición), mediante fórmulas semi-empíricas o de forma experimental.

$$Q_{Pellet} (kW) = \dot{m}_{Pellet} \cdot PCI_{bh}$$

Donde Q_{Pellet} [kW] es el caudal térmico o potencia térmica, \dot{m}_{Pellet} [kg·s⁻¹] es el caudal másico de combustible y PCI_{bh} Pellet [kJ·kg⁻¹] es el poder calorífico inferior del combustible en base húmeda (bh).

2.12. Cálculo de la potencia suministrada al agua

Se ha considerado que la única energía útil que se obtiene de la caldera es el calor que recibe el circuito de agua, teniendo en cuenta las pérdidas producidas por el calor disipado a través de las paredes de la caldera, el envío de gases a chimenea, la radiación de calor a través de la puerta, etc.:

$$Q_w (kW) = \dot{m}_w \cdot C_{p,w} \cdot \Delta T_w$$

Donde Q_w [kW] es la potencia suministrada al agua, \dot{m}_w [kg·s⁻¹] es el caudal de agua, $C_{p,w}$ [kJ·kg⁻¹·K⁻¹] es el calor específico del agua y ΔT [K] es el salto térmico experimentado en la caldera.

2.13. Rendimiento o eficiencia de la caldera (η)

Se entiende como tal, la proporción de la potencia térmica (teórica) que se transforma en potencia suministrada al agua. A este tipo de determinación del rendimiento se le conoce como método directo (UNE 9-044-86/2).

$$\eta = Q_w / Q_{Pellet}$$

3. Análisis del recurso biomasa

En este apartado se tratará de establecer cuáles de los recursos derivados de la biomasa son susceptibles de aprovechamiento energético, junto con una aproximación de los costes económicos. En una primera estimación, se tratará de cuantificar el recurso disponible y sus costes derivados, los cuales dependen en gran medida del nivel de tratamiento que se requiera para su uso. Posteriormente, se hará hincapié en los combustibles densificados.

Las instalaciones de producción energética con biomasa se abastecen de una amplia gama de biocombustibles, desde astillas hasta cardos y paja, pasando por huesos de aceituna y cáscaras de almendra. De forma general, dentro de los principales biocombustibles sólidos empleados a nivel nacional destacan: los orujillos (de aceite y de uva), los huesos de aceituna, las cáscaras de frutos secos provenientes de la industria de transformación agrícola (tanto agrícolas, almendra; como forestales, piñón) y los residuos forestales y sus industrias derivadas (cortezas, astillas, costeros y serrines).

Existen diferentes clasificaciones de la biomasa susceptible de uso energético, como por ejemplo las presentadas en el apartado de introducción (en función de su procedencia o de su uso). En el precio final para el usuario, puede ser de gran influencia el hecho de que dicho recurso se genere directamente para su uso energético o que provenga de materiales recuperados de otras aplicaciones. En este sentido, cabe clasificar la biomasa en función de su origen [27]:

- *Biomasa primaria.* Procedente de masas agrícolas y/o forestales:
 - Productos derivados de tratamientos silvícolas: ramas y ramillas procedentes de trabajos de poda, incluyendo pies de cortas de aclareo y aquellos productos afectados por incendios forestales.
 - Restos de cortas: ramas procedentes de la regeneración de los bosques y de cortas intermedias. Restos de podas de cultivos leñosos agrícolas (frutales, vid y olivo) así como cosechado. Restos de otras intervenciones sobre cultivos herbáceos agrícolas (principalmente cereales).
 - Arbol completo: aprovechamiento de árboles enteros para fines energéticos.
 - Leñas procedentes de trasmochos y de pies no maderables: ramas y troncos de pies mal formados.
 - Plantaciones de masas leñosas y herbáceas susceptibles de implantación con fin energético: formaciones de alta densidad o media y turnos más o menos cortos (según la especie considerada) establecidos en terrenos forestales y/o agrícolas con fines principalmente energéticos.
- *Biomasa secundaria:* Procedente de aprovechamientos tanto forestales como agrícolas. Son restos generados a partir de cualquier tipo de actividad humana, como: restos agrícolas procedentes de cultivos (herbáceos o leñosos); restos forestales procedentes de los tratamientos silvícolas realizados, y restos de las industrias forestal y agrícola.



Fig. 7. Biomasa forestal sólida con pretratamientos de astillado y molienda.

En las Figuras 7, 8 y 9 pueden verse diferentes presentaciones de biomasa pretratada, susceptible de uso como combustible. En este caso, las granulometrías escogidas son pequeñas, pudiendo emplearse mayores tamaños si la caldera estuviese preparada para ello. Se han escogido como muestra representativa residuos procedentes de las industrias forestales (Fig. 7) y agrícolas (Fig. 8) así como la típica presentación en forma de pellet, con biomasa de residuos forestales y cultivos energéticos (Fig. 9).



Fig. 8. Biomasa proveniente de la industria agrícola. De izquierda a derecha: hueso de aceituna y cáscara de almendra.

El precio final de los diferentes combustibles derivados de la biomasa dependerá de su origen y del nivel de procesado que hayan recibido. En este sentido, los combustibles densificados son los que requieren de mayor acondicionamiento, y por tanto, para la misma biomasa de origen, el formato con mayores costes. Otra variable de gran influencia en el precio del combustible son las distancias y medios de transporte hasta el usuario final. Atendiendo a ello, el pellet se presenta como el formato más competitivo, dada su elevada densidad energética. Conviene, en este punto especificar, los diferentes tratamientos que puede recibir la biomasa hasta convertirse en el formato de combustible que se emplea en el sector residencial, ya que ello determinará parte de sus propiedades y precio. En este sentido y debido a que la biomasa de origen forestal es la mayoritariamente utilizada en el citado sector, se tratará de detallar la cadena de procesos que este tipo de biomasa recibe.

Dentro de los sistemas de aprovechamiento forestal primaria, las tecnologías empleadas son diversas y están en continua evolución. La determinación de cuál es la más adecuada está condicionada por varios factores: densidad forestal y estado de la red viaria, tipo de plantación, especie arbórea, características físicas del terreno (orografía), características de los centros de consumo, impacto ambiental, etc. [28]. Los procesamientos más habituales son:

- *Preparación de los restos de corta.* Es una de las fases iniciales para la recuperación energética de los restos. La materia prima se puede encontrar extendida por la parcela, agrupada en pequeños montones o agrupada en montones a pie de pista. Para el aprovechamiento

energético, la primera presentación de residuo es la más desfavorable, siendo la tercera la más rentable.

- *Recogida y transporte de biomasa en bruto.* Recogida y transporte sin procesar, sin ningún tratamiento de compactación, astillado, empacado, etc. Sólo es viable si el centro de transformación se encuentra cerca del centro origen.
- *Empacado.* Supone la necesidad de adquisición de máquinas empacadoras móviles, permitiendo la compactación en fardos o pacas con tamaños típicos de 3 m de longitud por 1 m de diámetro y densidades aparentes de 350 kg/m³. Lógicamente, se optimiza el almacenamiento y el transporte con este tratamiento.
- *Astillado.* Este puede ser en monte o en campa o zona de acopio. En monte se realiza con pequeñas astilladoras móviles, haciendo perder humedad de forma natural al producto y reduciendo los costes de manipulación y transporte. En campa se habilita un parque con el residuo lo que permite un secado adicional del mismo y mayores producciones.
- *Aprovechamiento de árbol entero.* Se emplea el fuste entero para aprovechamiento energético. Suele aplicarse a árboles procesados con bajo valor económico como plantaciones de baja rentabilidad, cultivos energéticos, árboles de áreas de corta anticipada o dañados por incendios etc. Se emplean para la obtención de astilla.

El IDAE ha desarrollado una útil herramienta gráfica, BIONLINE [27], que permite de forma bastante realista, la evaluación del potencial de biomasa en diferentes partes de España. Tiene en cuenta los distintos orígenes y las posibilidades de introducción en el mercado energético, en función de unos determinados costes estimados para la producción y disposición en el mercado.

Es una herramienta preparada para cuantificar la biomasa primaria de origen forestal del área geográfica que elija el usuario. La biomasa primaria que considera son principalmente: productos derivados de tratamientos silvícolas, excepto el procedente de limpieza de matorrales leñosos arbustivos y subarbustivos en masas arboladas; restos de cortas; árbol completo; leñas procedentes de trasmochos y de pies no maderables, y plantaciones de masas leñosas y herbáceas susceptibles de implantación con fin energético. El potencial de las diferentes biomasa lo establece en unidades másicas (t/ha·año) y energéticas (tep/ha·año) siendo el tep tonelada equivalente de petróleo (41840 MJ). El usuario puede escoger el tipo de biomasa en la que está interesado, así como el tipo de aprovechamiento. En cualquier caso, el precio del recurso finalmente utilizable es muy variable dependiendo del tipo de recurso, su ubicación y el tipo de tratamientos a los que se someta. A modo de ejemplo, se incluyen en las Tablas 3 y 4 los precios finales en venta minorista de diversos tipos de biomasa, para la campaña otoño-invierno 2017/2018 y 2012/2013 (extraídos directamente de la web de una empresa suministradora).



Fig.9. Pellets provenientes de residuos forestales y cultivos energéticos. De izquierda a derecha: pellets de mezcla de maderas, pino, brásica y chopo.



Fuente: INEGA. Análisis de la viabilidad del mercado de biomasa en Galicia y norte de Portugal. 2012[28]

Fig. 10. Procesamientos habituales. De izquierda a derecha: restos de corta, astillado en campa, empacado y aprovechamiento de árbol entero.

Tabla 3

Lista de precios de biomasa para la temporada 2017/18 de un suministrador genérico

| HUESO (Portes e IVA no incluídos) 2017/18 | |
|--|-------------|
| Hueso de aceituna seco y limpio a granel | 0,11 €/kg |
| Hueso de aceituna seco en sacos Big Bag | 0,12 €/kg |
| Hueso de aceituna seco en sacos de 20 kg | 0,13 €/kg |
| Hueso de aceituna sin tratar | 0,07 €/kg |
| Orujillo a granel | 0,05 €/kg |
| Pellet de orujillo | 0,06 €/kg |
| PELLETS DE MADERA (Portes e IVA no incluídos) 2017/18 | |
| Sacos de 15 kg | 3,68 €/saco |
| 1 palets de 60 sacos | 3,20 €/saco |
| A partir de 47 palets (no se cobra porte) | 2,48 €/saco |
| CÁSCARA DE ALMENDRA (Portes e IVA no incluídos) 2017/18 | |
| Cáscara de Almendra a granel | 0,10 €/kg |
| Cáscara de Almendra en sacos Big Bag | 0,11 €/kg |
| Cáscara de Almendra en sacos de 20 kg | 0,13 €/kg |

Nota: el precio del porte depende del destino. A partir de 25.000 kg. no se cobra porte. (Precios sin IVA).

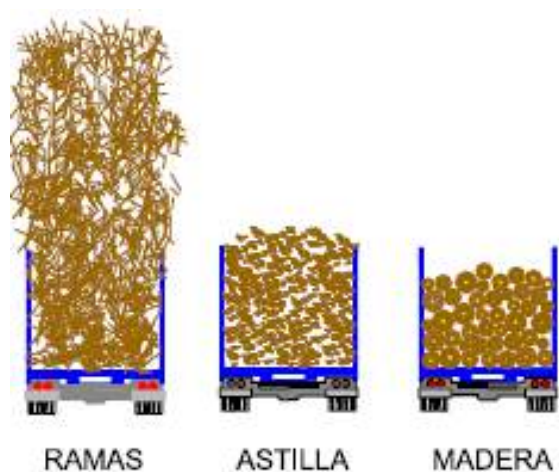
Tabla 4

Lista de precios de leña para la temporada 2012/13 de un suministrador genérico

| | Camión pequeño 5 m ³ | Camión median 8 m ³ | Camión grande 11 m ³ |
|------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| Leña de Olivo mixto | 270,00 | 370,00 | 470,00 |
| Leña de Eucalipto | 300,00 | 400,00 | 500,00 |
| Leña de Olivo sin raíz | 320,00 | 420,00 | 520,00 |
| Leña para estufa | 320,00 | 420,00 | 520,00 |
| Leña de Encina | 400,00 | 520,00 | 650,00 |

Nota: no se cobra porte. (Precios sin IVA). 1 m³ equivale a 550 kg aproximadamente.

Puede observarse, a partir de los datos de la tarifa, que el precio es muy dependiente de los costes de transporte. En este sentido, es determinante desde un punto de vista de eficiencia, el poder transportar la mayor cantidad de “densidad energética” posible. Esto se consigue con materia prima con un mayor poder calorífico, menor humedad y mayor densidad a granel. Un ejemplo visual de lo que esto significa, se puede observar en la Figura 11, donde se evidencia la importancia de la densidad a granel en los posibles costes de transporte y manipulación.



Fuente: Revista CIS-Madera.

Fig. 11. Efecto de la densidad a granel en el transporte de biomasa.

Tabla 5
Características promedio de combustibles (% Base Húmeda)

| | Humedad | Cenizas | Volátiles | Azufre | PCI (Kcal/kg) | Densidad media (kg/m ³) |
|----------------------------|---------|---------|-----------|--------|---------------|-------------------------------------|
| Orujos de uva seca | <12 | <4 | >58 | <0,3 | >3800 | 275-300 |
| Hueso de aceituna | 12-23 | <1 | >65 | <0,1 | >3800 | 680 |
| Astilla de madera | 20-55 | 1-2 | >65 | <0,05 | 1600-3300 | 250 |
| Serrín (húmedo) | 20-55 | <1 | >65 | <0,05 | 1600-3300 | 350 |
| Cáscara de almendra | 9-15 | 1-3 | 60-70 | 0 | >3700 | 400 |
| Pellets de madera | <12 | <1 | >60 | <0,05 | >4000 | 700 |

Fuente: CENER (2006)

Desde el punto de vista de producto final consumido y tal como se indicó en la introducción, la biomasa mayoritariamente utilizada es un biocombustible sólido. Generalmente, se trata de materiales lignocelulósicos procedentes del sector forestal, agrícola o de sus industrias transformadoras, siendo los productos más habituales leña, astillas, pellet, briqueta, carbón vegetal, cáscara de almendra, hueso de aceituna, etc. En la Tabla 5, se pueden ver algunas propiedades características de estos combustibles. En ella es fácil percatarse de que uno de los mejores combustibles son los pellets, dado su bajo contenido en humedad, alto poder calorífico y elevada densidad a granel, lo que los hace uno de los combustibles con más proyección de consumo en el sector doméstico. En este sentido y según [28] y diversas fuentes para el año 2016, el potencial de producción española de pellets superaba las 1000000 t/año, produciéndose sólo el 46% de dicho potencial, dedicándose 256000 t/año del total de producción de biomasa, al mercado exterior.

Por otra parte, y según las previsiones del PER 2011-20, se espera un aumento del consumo de biomasa del 12% en el sector doméstico para el 2020 [4]. Esto, unido a que el pellet es actualmente el combustible derivado de biomasa más homogéneo, hace que su combustión sea más controlable que el resto de combustibles sólidos derivados de biomasa, lo que permite mejores rendimientos en combustión y por tanto, una mejor eficiencia energética.

3.1. Combustibles densificados. Pellets

La densificación es un proceso que se desarrolla fundamentalmente en dos fases. Inicialmente, al aplicarle presión (2-51 kg/cm²), el material reduce su volumen, eliminándose el aire existente en los huecos interpartículas. Posteriormente, al continuar aumentando la presión (hasta 1000 kg/cm²), el elemento que actúa de cimentador, en este caso la lignina, se reblandece, acoplado entre sí las partículas y haciendo disminuir aún más los huecos. En este estado, la lignina, acentúa sus propiedades aglutinantes permitiendo que, al cesar la presión, el nuevo producto permanezca compacto. Si el producto obtenido tiene unas dimensiones superiores a 30 mm, se le denomina briqueta; en caso contrario, pellet. Densidades habituales obtenidas en tales productos oscilan entre los 600 y 1400 kg/m³, dependiendo de la técnica empleada. Existe un límite máximo, fijado por la densidad

del propio material empleado, alrededor de 1560 kg/m³ (téngase en cuenta que la densidad de la madera suele ser inferior a 1000 kg/m³, pues flota en agua).

3.2. Combustibles densificados. Pellets

La densificación es un proceso que se desarrolla fundamentalmente en dos fases. Inicialmente, al aplicarle presión (2-51 kg/cm²), el material reduce su volumen, eliminándose el aire existente en los huecos interpartículas. Posteriormente, al continuar aumentando la presión (hasta 1000 kg/cm²), el elemento que actúa de cimentador, en este caso la lignina, se reblandece, acoplado entre sí las partículas y haciendo disminuir aún más los huecos. En este estado, la lignina, acentúa sus propiedades aglutinantes permitiendo que, al cesar la presión, el nuevo producto permanezca compacto. Si el producto obtenido tiene unas dimensiones superiores a 30 mm, se le denomina briqueta; en caso contrario, pellet. Densidades habituales obtenidas en tales productos oscilan entre los 600 y 1400 kg/m³, dependiendo de la técnica empleada. Existe un límite máximo, fijado por la densidad del propio material empleado, alrededor de 1560 kg/m³ (téngase en cuenta que la densidad de la madera suele ser inferior a 1000 kg/m³, pues flota en agua). Donde difieren claramente las briquetas de los pellets es en el proceso de fabricación.

Siendo el pellet el producto densificado por excelencia, nos centraremos brevemente en su producción. Existen dos tecnologías que emplean matrices planas y anulares. Por las dimensiones de las máquinas resultantes, se ha impuesto de forma generalizada la fabricación con matriz anular. En este proceso, la biomasa con una granulometría y humedad controlada es comprimida a través de una serie de orificios con forma convergente-divergente, donde son finalmente cortados a una longitud característica. Para su producción es necesario disponer de un producto base con una humedad comprendida entre el 8-15% bh y un tamaño de partícula del orden de 5 mm. El proceso de densificación puede verse en la Figura 12, donde la máquina dispone de 2 cabezales de compresión, lo que aumenta la capacidad productiva de la misma. Existen dos variantes productivas: en la primera, la matriz anular es fija y los rodillos giran y en la segunda, los rodillos son fijos y es la matriz la que gira a alta velocidad [29].

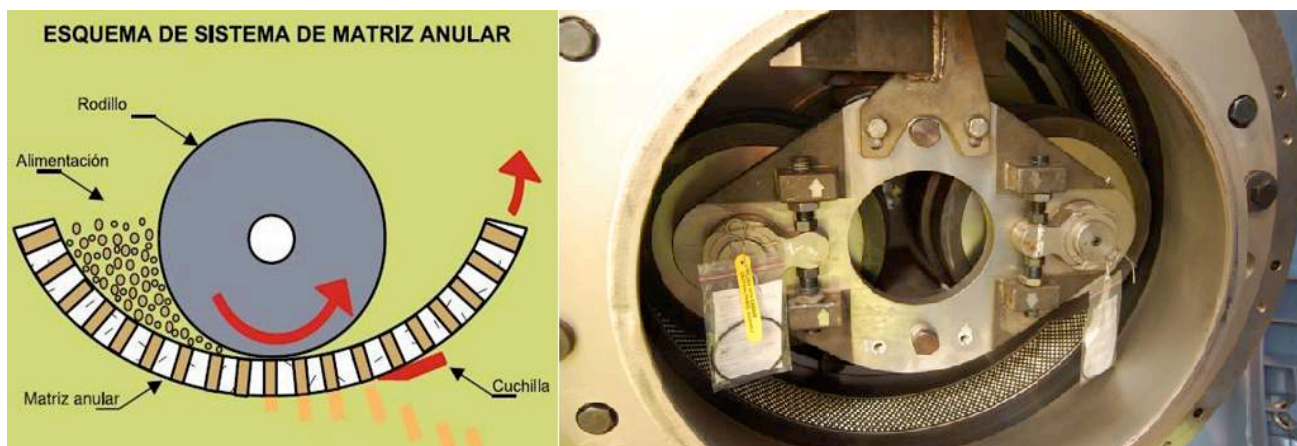
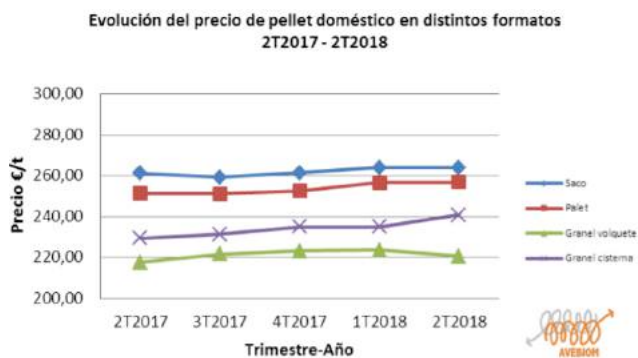


Fig. 12. Sistema de producción de pellet con matriz anular.

En la expansión del uso de pellets en Europa, además del incremento en el precio de los combustibles fósiles tradicionales, uno de los factores más importantes del aumento del consumo ha sido el desarrollo de los sistemas de combustión, tanto de los utilizados en el sector doméstico, como de las instalaciones de media potencia.

Durante los primeros años, se utilizaron calderas fabricadas para leña y carbón, de forma que se conseguía un bajo rendimiento [29]. Actualmente, la eficiencia de las calderas con pellets supera el 90%. Por otra parte, otro factor de expansión es la contención en los precios, tal y como se puede ver en el estudio realizado por AVEBIOM (Fig. 13) donde se puede comprobar que entre el 2º trimestre de 2017 y el 2º trimestre de 2018, el precio medio a nivel doméstico del pellet en sus diferentes presentaciones comerciales se ha mantenido.



Fuente AVEBIOM (2018)

Fig. 13. Evolución del precio del pellet en España para el mercado doméstico.

3.3. Suministro y almacenamiento doméstico

A nivel doméstico, el tipo de suministro depende en gran medida del tipo de almacenamiento disponible. El caso más sencillo, pero no más eficiente, ocurre cuando el combustible utilizado es leña o briquetas. Esto se debe a que el transporte se realiza fundamentalmente a granel en

camión y los requerimientos de almacenamiento únicamente exigen que el recinto esté libre de humedades. En el caso de las briquetas, su mayor densidad energética permite que sea rentable suministrarlo en blisters plásticos en estaciones de servicio y grandes almacenes, aunque también comienza a observarse la venta directa de leña al por menor en estaciones de servicio. La manipulación es casi exclusivamente manual en ambos casos, debido a su elevada granulometría. Por lo que respecta a los de pequeña granulometría (pellets, astillas, huesos aceituna,...), el suministro se lleva a cabo bien en sacos normalizados de 15 kg, a granel en camión, big-bags o utilizando un camión cisterna con sistema neumático [30-32].

Como se comentó, el tipo de suministro físicamente depende del tipo de almacenamiento. Éste y el vínculo del suministrador con la instalación dependen, a su vez, en gran medida de la potencia de la instalación. Así, por ejemplo, en instalaciones de “district heating” el suministrador suele tener algún tipo de vínculo administrativo con la instalación, asegurando el suministro de combustible suficiente para amortizar la instalación, al menos. En otros casos, el suministrador proviene de explotaciones gestionadas por la administración (local, generalmente) promoviendo el uso de renovables. El proveedor entrega la biomasa apta para ser consumida directamente y, si tecnológicamente es posible, en fardos o a granel sin un tratamiento previo que encarezca los precios. La planta tendrá un comportamiento más estable si la alimentación tiene pequeña granulometría.

En sistemas de calefacción de media potencia (50-500 kW) es preciso disponer de un sistema de almacenamiento cercano a la caldera que tenga espacio suficiente para almacenar el combustible necesario para, al menos, 2 semanas, precisando de un suministrador que entregue el combustible periódicamente.

En sistemas de baja potencia, existen calderas comerciales con potencias desde 15 hasta 40 kW, así como estufas de biomasa entre 8 y 15 kW. Las calderas suministran calor en toda la vivienda a través de radiadores, suelo radiante, etc. y ACS mientras que las estufas sólo calefactan de forma directa la estancia en la que se

encuentren y tienen también una misión decorativa [32]. Los sistemas de alimentación y las dimensiones de la máquina requieren de un combustible de gran homogeneidad, por lo que usan en exclusiva pellets y astilla (excepto en estufas manuales de leña). El suministro, en este caso, suele ser en saco y big-bags.

Independientemente del tipo de caldera, los sistemas de almacenamiento de biomasa más comunes se basan en depósitos dentro del edificio, estancias cerradas próximas a la caldera o almacenes próximos a la edificación. Cualquiera de los tipos debe permitir una alimentación automática a la caldera. Lógicamente, el tipo de almacenamiento influye de forma determinante en el transporte hasta la planta y el tipo de suministro. Así, por ejemplo, los almacenamientos por debajo del nivel del terreno, permiten el uso de vehículo con volquete. Los más habituales pueden clasificarse en:

- *Tolva acoplada a la caldera.* Habitual en calderas de baja potencia. La alimentación puede ser tanto manual, introduciendo el biocombustible mediante sacos en la tolva situada en la parte superior o en el lateral de la caldera, como automática. Es un sistema de poca autonomía y disponible para calderas de hasta 60 kW.
- *Silo textil.* Depósito confeccionado con una lona de alta resistencia, suspendido por una estructura metálica, antiestático, permeable al aire pero no al polvo y con una capacidad que puede variar entre 2000 kg y 5000 kg. Se rellena por la parte superior con un camión distribuidor con sistema de alimentación neumático o de tornillo sinfín, por lo que debe poder aproximarse hasta menos de 40 metros en caso de descarga neumática de pellets. Dicha distancia depende también del desnivel entre camión y silo.
- *Silo enterrado.* Depósito por debajo del terreno y resistente a la corrosión, que alimenta a la caldera por medio de un sistema neumático. Habitualmente empleado cuando hay problemas de espacio tanto en el interior como en el exterior.
- *Silo de obra.* Recinto construido dentro del edificio, anexo a la caldera, equipado con una protección contra impactos para evitar la degradación mecánica del combustible en el llenado. Su capacidad es función de la disponibilidad de espacio y del consumo.

Para evitar la degradación del combustible o la autocombustión, los sistemas de almacenamiento deben

cumplir una serie de requisitos de seguridad: ambiente seco, evitar instalaciones eléctricas próximas, accesos ignífugos, toma de tierra para evitar chispas electrostáticas, compuertas de cierre estancas para evitar el retroceso de llama, rociadores de emergencia en el sistema de alimentación que lo puedan inundar en caso necesario.



Fig. 14. Detalle de camión de suministro de pellet por impulsión neumática.

En cuanto a los sistemas de transporte, podrían clasificarse en pasivos y activos. Los pasivos aglutinan aquellas características constructivas de los sistemas de almacenamiento que facilitan la alimentación. Los activos son los que propiamente alimentan el combustible, siendo los más habituales el transporte neumático (por diferencia de presión) y el tornillo sinfín (arrastre mecánico), tanto rígido como flexible. Dentro de los sistemas pasivos, podríamos encontrarnos las siguientes características en los sistemas de almacenamiento [30]:

- *Suelo inclinado con dos pendientes.* Suelos con inclinaciones de 35°-45° para desplazar desde el fondo del almacenamiento por gravedad hasta el tornillo sinfín. Es económico, pero desperdicia el hueco bajo las pendientes. Es determinante la inclinación y altura de las rampas para evitar atascos de la biomasa.
- *Suelo inclinado a una pendiente.* Única pendiente de menor inclinación que el caso anterior. Desperdicia menos hueco, pero necesita de un rascador giratorio para facilitar el movimiento de la biomasa.
- *Suelo horizontal.* No desperdicia el espacio, pero requiere de rascadores horizontales o suelos móviles. Ideal para combustibles de baja densidad como las astillas.



Fuente: IDAE

Fig. 15. Sistema de almacenamiento de tolva acoplada, silo textil, silo enterrado y silos de obra con dos y un planos inclinados.

4. Generación térmica en edificación. Calderas

Después de conocer las características de los combustibles derivados de la biomasa que se utilizan en el sector residencial, se van a abordar las características técnicas generales de las calderas utilizadas. La estructura conceptual básica de las calderas es muy similar, al margen de la potencia de la misma. Por ello, el presente apartado se centrará más en la descripción de las mismas en calderas de baja-media potencia, pues son las más utilizadas. Por otra parte, los combustibles que se tendrán en cuenta son los de baja granulometría, ya que permiten una manipulación automatizada.

La tecnología de las calderas de biomasa ha progresado considerablemente en las últimas décadas, logrando bajos niveles de emisiones y elevada fiabilidad y rendimiento. Aun así, hay que señalar que existe una amplia gama de calidades disponibles en el mercado, siendo, por tanto, necesaria una cuidadosa selección para llevar a cabo con éxito un determinado proyecto. La calefacción con biomasa puede ser económicamente viable, debido a su bajo precio en relación a los combustibles fósiles. Sin embargo, los costes de inversión resultan ser más altos que para la calefacción con sistemas convencionales. Existen diversos factores que afectan a la elección de la caldera de biomasa adecuada, entre los que se encuentran:

- *El espacio:* es un factor fundamental, pues podría resultar un gran inconveniente a la hora de almacenar el combustible. Por ejemplo, las astillas de madera ocupan aproximadamente tres veces más que los pellets, para un mismo peso. Además, las calderas de biomasa tienden a ser más grandes que las de combustibles fósiles convencionales, por lo que se necesita un cuarto de dimensiones adecuadas para ellas.
- *El tamaño del edificio/casa:* generalmente, cuanto más grande es, mayor es la exigencia térmica requerida y el combustible consumido. Por tanto, será necesario un espacio mayor tanto para la caldera como para el almacenaje.
- *El acceso:* para llevar a cabo un correcto suministro del combustible empleado, es absolutamente necesario un buen acceso para el vehículo de entrega.
- *El suministro de combustible:* aunque la disponibilidad de la biomasa es abundante en toda Europa, el suministro aún no está organizado en algunos casos. Sin embargo, la aparición de los pellets, con una densidad energética tal que permite transportarlos grandes distancias, ha mejorado considerablemente la situación. Además, el número de productores de pellets está creciendo rápidamente.
- *Estimación de la potencia y necesidades de combustible:* es importante establecer los cálculos correctos con relación a la demanda térmica del edificio, teniendo en cuenta datos de aislamiento de la vivienda, la demanda de agua caliente...
- *Estimaciones económicas:* teniendo en cuenta las experiencias suecas, entre el 20 y el 25 % de la inversión total (en un edificio ya existente) está

relacionado con el almacenamiento y el sistema de suministro del combustible. La caldera automática de biomasa y otros equipos de la sala de calderas, suman cerca de 50 % de los costes. El resto del coste, generalmente menos del 30%, puede dividirse equitativamente entre la chimenea y el coste de ejecución, así como el diseño, gastos administrativos, dirección de obra, permisos, etc.

Existen otros factores también importantes en la selección de la tecnología, como son:

- Alto rendimiento (más del 85%) probado por mediciones certificadas.
- Bajas emisiones de CO (por debajo de 200 mg/m³), bajas emisiones de partículas (por debajo de 150 mg/m³ a plena carga).
- Variación continua de la potencia de salida (no sólo regulación por conexión/desconexión, ya que esto causa emisiones y pérdidas altas).
- Alto grado de automatización para reducir el trabajo del mantenimiento.
- Posibilidad de telecontrol de los parámetros de la caldera por el suministrador de la misma.
- Referencias que prueban que la caldera se ha utilizado en aplicaciones domésticas de calefacción con éxito.

Para entender adecuadamente los siguientes apartados, es necesario tener un breve conocimiento sobre el proceso de combustión. Las partículas de biomasa que son alimentadas a las calderas sufren diferentes procesos al entrar en el quemador de la misma. Inicialmente, sufren un calentamiento desde la temperatura de almacenamiento hasta la temperatura de evaporación del agua. En este punto, absorben calor para ir eliminando dicha humedad (fase de secado). A medida que sigue subiendo la temperatura, desprenden las sustancias volátiles que contienen, las cuales arderán en forma de llama (fase de volatilización). En esta fase, cuanto más rápidamente se calienta la biomasa, más volátiles generará y por tanto, menos char se obtendrá. Estas dos fases anteriores son endotérmicas, es decir, absorben energía. La fase gas liberada como volátiles arde en forma de llama a partir del quemador. Por otra parte, la parte sólida que queda con contenido mayoritario de char (básicamente carbono), se oxida sin llama en el quemador. Estas dos últimas son las fases de combustión y son exotérmicas, siendo las responsables de la generación de energía térmica.

También es necesario conocer de forma sucinta las partes más básicas de una caldera. El *quemador* es el dispositivo físico que prepara el combustible para ser quemado. Éste contiene a la parte sólida que está en las diferentes fases de la combustión, quedando finalmente un resto sólido incombustible (cenizas). Éstas suelen eliminarse del quemador para que no bloqueen la combustión de nueva biomasa al irse acumulando. La combustión en el quemador propiamente dicho suele ser sin llama. De éste, salen productos fundamentalmente gaseosos, los cuales terminan de reaccionar (en forma de

llama, generalmente) en una cavidad específicamente diseñada para ello llamada *hogar*. Tras una combustión lo más completa posible, los productos gaseosos pasan a un *intercambiador de calor* donde ceden gran parte de su energía a un fluido térmico (generalmente agua). Por último, son evacuados por la *chimenea*. Las necesidades de aire para la combustión no son las mismas en la zona de lecho, donde se supone que se emplea en la combustión del char, que en la zona gaseosa. De ahí que las calderas tengan diferentes entradas de aire, lo que se conoce como *estratificación de aire*. Se denomina *aire primario* al que atraviesa el lecho de partículas sólidas y proporciona el oxígeno para la oxidación del char, y *secundario* y *terciario* a los que alimentan la zona de combustión con llama.

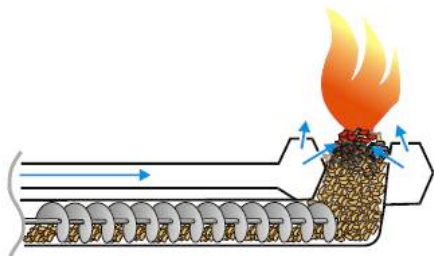
En los siguientes apartados, se describirán las diferentes partes de las calderas de biomasa y tecnologías empleadas en el mercado para cada parte funcional.

4.1. Según la alimentación al quemador

En función del tipo de alimentación del quemador, podemos encontrarnos tres casos: alimentación superior, alimentación horizontal y alimentación inferior.

4.1.1. Alimentación inferior.

En una caldera con alimentación inferior (Fig. 16), la biomasa es transportada a través de un tornillo sinfín por la parte inferior hasta llegar al quemador.



Fuente: *Handbook of Biomass Combustion and Co-Firing*, IEA

Fig. 16. Esquema de un quemador con alimentación inferior.

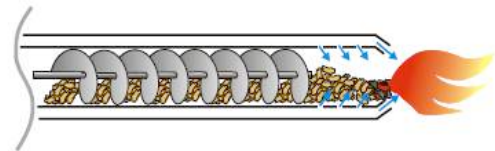
Las ventajas de la alimentación inferior son: su simplicidad y que el quemado del combustible en sentido contrario a la alimentación normalmente no suele ocurrir. Además, la capa incandescente está libre de perturbaciones mecánicas, de tal manera que la emisión de partículas llega a ser mínima. Sin embargo, este tipo de alimentación posee aspectos negativos que conviene mencionar:

- No se forma ninguna zona de secado en el combustible acumulado bajo la capa incandescente. Por tanto, únicamente se pueden usar combustibles con un contenido de humedad inferior al 30%. Si el contenido de humedad es superior, ocurre una combustión incompleta con emisiones elevadas de monóxido de carbono e hidrocarburos.

- La entrada de aire primario a través del combustible es difícil.
- La ceniza se puede acumular en el quemador y es difícil extraerla.

4.1.2. Alimentación horizontal

En este caso, el combustible se empuja mediante un tornillo sinfín horizontalmente hasta el quemador (Fig. 17). La biomasa acumulada, que se mueve horizontalmente en la parrilla, pasa por una zona de secado antes del quemado, por lo que se pueden usar aquellas con un contenido de humedad más alto que en caso anterior. Como inconveniente, se tiene que el quemado en dirección contraria no se puede evitar totalmente, debido al diseño del sistema de alimentación. Por ese motivo, es necesaria la instalación de sistemas de seguridad contra fuego en la entrada de combustible.

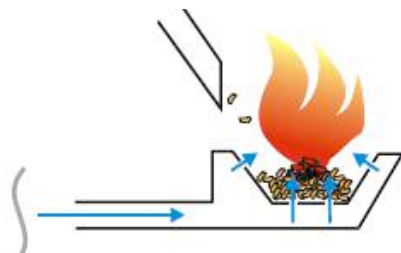


Fuente: *Handbook of Biomass Combustion and Co-Firing*, IEA

Fig. 17. Quemador con alimentación horizontal.

4.1.3. Alimentación superior

La biomasa cae a través de un eje en el quemador (Fig. 18). La alimentación superior presenta una ventaja importante ya que, durante el proceso de caída del combustible, el secado del mismo sucede casi inmediatamente. Con un buen diseño, las condiciones de la combustión no se ven influidas negativamente por el material húmedo en el punto de impacto. Debido a la caída de las partículas de combustible, se produce una agitación mecánica en el lecho que libera partículas en la corriente de gas.



Fuente: *Handbook of Biomass Combustion and Co-Firing*, IEA

Fig. 18. Quemador con alimentación superior.

4.2. Según el diseño del quemador

Un quemador de pellets permite la combustión continua de un combustible refinado y bien definido. Los tipos más habituales de diseño de quemador son:

4.2.1. Quemador de retorta

Este tipo de quemadores se construyen de tal manera que la alimentación de los mismos es siempre inferior. El combustible es empujado por un conducto a la caja de retorta, donde se incorpora a la combustión empujando hacia arriba los restos de combustible quemado. Éstos, se vierten lateralmente sobre los bordes de la retorta.

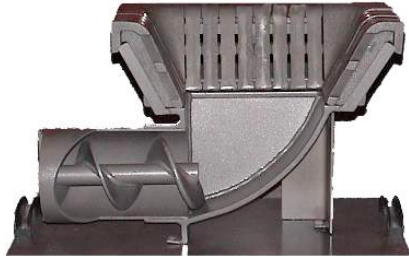


Fig. 19. Quemador con alimentación inferior de retorta.

4.2.2. Quemador de parrilla

Las parrillas están compuestas por barras, de sección puede ser trapezoidal o rectangular, posicionadas de tal manera que entre elemento y elemento existen una serie de huecos. Las funciones de los mismos son, por un lado, permitir la entrada del aire primario de combustión (sentido ascendente) y, por otro, la caída de los residuos al cenicero. Las parrillas se suelen construir de forma que la alimentación sea superior u horizontal, cayendo el combustible sobre la parrilla, alimentando la combustión. Dentro de esta clase se puede distinguir, a su vez, entre parrillas fijas y móviles.



Fig. 20. Quemador con alimentación superior con parrilla fija.

En baja y media potencia, lo más habitual es el sistema de parrilla fija, puesto que se evitan partes móviles que encarecerían la instalación. Por lo que respecta a la parrilla

móvil, existen a su vez diversas clasificaciones, destacando a continuación las más importantes:

- *Parrilla móvil inclinada.* El combustible es transportado a lo largo de la rejilla, produciéndose dicho movimiento gracias a cilindros hidráulicos. La parrilla entera es dividida en varias secciones, que pueden ser movidas a diferentes velocidades, de acuerdo con las diferentes etapas de combustión.
- *Parrilla móvil horizontal.* Esta tecnología impide movimientos del combustible inducidos por la gravedad incontrolada, produciéndose una distribución muy homogénea del material sobre la superficie de la parrilla.
- *Parrilla móvil de avance.* El combustible recibe el aire primario por debajo de la parrilla, produciéndose, por una parte, una buena refrigeración de los módulos de la parrilla y por otra, un precalentamiento del aire de combustión. Esta técnica asegura un rendimiento constante. Sobre la parrilla, el material atraviesa zonas de distinta temperatura, por lo que el combustible se seca, volatiliza y, finalmente, entra en combustión.
- *Parrilla móvil vibratoria.* En este caso, dos o más vibradores consiguen que se produzca el transporte del combustible así como la retirada de la ceniza hacia el cajón de cenizas. Esta tecnología es apropiada casos en los que el combustible muestre tendencias de aglomeración. La alimentación es permanente y regular, y la distribución del combustible es uniforme, debido al movimiento de la parrilla. Como desventaja, se tienen las altas emisiones de cenizas en los humos debido a las vibraciones, junto con unas altas emisiones de monóxido de carbono.



Fig. 21. Esquema didáctico de una caldera de parrilla móvil inclinada.

4.3. Circulación del fluido térmico

Según el fluido que circule a través de los tubos de la caldera, éstas se pueden clasificar en:

- *Pirotubulares,* cuando el fluido que viaja por los tubos intercambiadores son los gases de la combustión.
- *Acuotubulares,* cuando el fluido que circula por los tubos intercambiadores es el agua.

4.4. Sistema de ignición

La ignición del combustible en las calderas se realiza de manera automática mediante una de las siguientes técnicas:

- *Encendido eléctrico.* En este caso, se produce la ignición mediante una resistencia eléctrica o mediante una barra cerámica incandescente.
- *Encendido mediante aire caliente.* A través de un generador de aire caliente, se produce la llama necesaria para iniciar la combustión. Este tipo de encendido tiene el inconveniente de su alto consumo de corriente, que oscila entre 1.500W-1.800W frente los 250W que son necesarios en la técnica de encendido eléctrico.
- *Encendido mediante brasas.*

4.5. Sistema de control automático

Los sistemas de control automático juegan un papel crucial en las calderas de biomasa, pues de ellos depende el correcto funcionamiento de las mismas. Dentro de estos sistemas de control, nos podemos encontrar con los siguientes:

- *Control de carga.* Se realiza teniendo en cuenta la temperatura de retorno del agua y, generalmente, determina el combustible y aire primario necesarios.
- *Control de la combustión.* Se lleva a cabo a través de la sonda Lambda. Esta sonda controla permanentemente los valores de los gases de salida, utilizando el nivel de oxígeno como indicador de la combustión. Se pretende que la cantidad de oxígeno en este punto sea la menor posible, como indicador de una combustión completa y de buena calidad. De este modo, se corrige la cantidad de biomasa que se necesita así como el aire secundario insuflado. Ambos parámetros son controlados aumentando o disminuyendo los tiempos de alimentación. Así, se pretende conseguir un menor consumo y unos valores mínimos de emisiones, además de garantizar una potencia térmica constante, incluso si la calidad del combustible varía.
- *Control de la temperatura.* Se realiza teniendo en cuenta la temperatura de los gases de combustión. Se realiza el control sobre el gas de salida a recircular.
- *Control de presión.* Se realiza midiendo la diferencia de presiones entre la cámara de combustión y el ambiente, y se controla mediante un ventilador inducido de aspiración.

En la mayoría de los casos, los fabricantes incluyen un panel para que el usuario regule y compruebe las funciones (aire necesario para la combustión, carga de combustible, temperatura del agua, temperatura de los humos...).

4.6. Limpieza automática de intercambiadores de calor

En lo que a la limpieza de los intercambiadores de calor se refiere, lo común es que lleve a cabo mediante sistemas

mecánicos móviles que, por rozamiento, eliminan las partículas depositadas en los tubos (las cuales interfieren en el intercambio de calor). Lógicamente, los mejores sistemas son los automáticos, aunque existe una amplia variedad de calderas con limpieza manuales. Los más habituales son:

- Limpieza mediante muelles.
- Limpieza mediante cuchillas turbuladoras.
- Limpieza mediante palancas.
- Limpieza mediante mecanismos vibratorios.
- Limpieza mediante sinfines helicoidales.



Fig. 22. En la parte superior, limpieza de tubos con sinfines helicoidales, izquierda, y palancas, derecha. En inferior, limpieza de tubos con muelles.

4.7. Limpieza de cenizas

Al hablar de cenizas, hay que considerar tanto las cenizas que se encuentran depositadas en el quemador, como las cenizas volantes adheridas a la cámara de combustión. Estos residuos se irán acumulando en depósitos habilitados para tal efecto. La ceniza depositada en el quemador puede ser eliminada de forma automática. En ocasiones, los quemadores incorporan mecanismos que se encargan de su eliminación: parrillas sacudidoras, vibratorias, de bisagra, basculantes... Para conducir la ceniza que queda en el fondo de la cámara de combustión hasta el contenedor, se suelen utilizar sistemas automáticos que consisten en un tornillo sinfín. Una vez en el contenedor, dicha ceniza es compactada de tal manera que se puede alargar su recogida hasta una o dos veces por año. Los contenedores suelen contener ruedas o un diseño que permita su cómodo transporte hasta el lugar de desecho de las cenizas.

4.8. Tecnología de combustión y aprovechamiento del calor

Dentro del apartado de combustión de las calderas, conviene considerar algunos aspectos que resultan interesantes tecnológicamente a la hora de proyectar una instalación, como son: el control de combustión por sonda

lambda (ya comentado), recirculación de gases, estratificación de aire y tecnología de condensación:

- *La recirculación de los gases de escape* es el método más eficaz para reducir la emisión del NO_x que se produce por las altas temperaturas de la llama. Esta tecnología se basa en hacer pasar nuevamente parte de los gases de escape por el quemador de la cámara de combustión. De esta manera, se consigue una reducción de los picos de temperatura de la combustión y se disminuye el porcentaje de oxígeno necesario para realizar la combustión así como unas menores emisiones. Consecuentemente, al lograr un mayor control de la temperatura en la caldera, se evita la aparición de temperaturas muy altas en la cámara de combustión y se reduce el riesgo de clinkering y de formación de escorias. Esta tecnología se recomienda para combustibles con un alto valor calorífico, con un punto de fusión de ceniza bajo, o con un alto contenido de nitrógeno. Se pueden citar dos clases de recirculación:

- *External flue gas recirculation (EFGR)*, donde una porción de gas de chimenea es succionada por un ventilador para ser inyectada directamente en la caldera. Se ve limitada por la estabilidad de la llama.
- *Internal flue gas recirculation (IFGR)*, donde una porción de gas de conducto se mezcla con el aire por el ventilador de aire forzado. Esta mezcla se realiza con el aire primario antes de ser introducido en la caldera. Está limitado por la estabilidad de la llama y la temperatura de la mezcla aire/gas de conducto.

- *La estratificación de aire* está basada en la separación de la cámara de combustión en dos zonas diferenciadas, donde se producirá la combustión primaria y la combustión secundaria. Cada una de estas zonas tiene su propia alimentación de aire, denominado aire primario y secundario, respectivamente. Con esta separación, se evita mezclar el aire primario con el aire secundario, permitiendo así que la zona de combustión primaria sea la de gasificación (con requerimientos de aire por debajo del estequiométrico). En la zona secundaria se producirá la última oxidación de los gases de combustión. Finalmente, para que haya una correcta mezcla de aire secundario y gases en la zona secundaria, se debe tener una geometría adecuada de la caldera y diseño de la distribución de aire. Mediante esta tecnología, es posible alcanzar una combustión de buena calidad y unas menores emisiones, por lo que es la utilizada en la mayoría de las calderas por la mayor parte de los fabricantes.

- *Las calderas de condensación* que usan biomasa como combustible se han desarrollado muy poco hasta el momento. La tecnología de las calderas de condensación se basa en extraer el calor de los gases residuales y del propio proceso de combustión. El vapor de agua contenido en el aire, procedente de la cámara de

combustión, se enfría hasta que cambia de estado (liberando energía). Con ello se consigue un aumento de la eficiencia entre el 10% y el 15%. Para extraer, de manera eficiente, el pleno valor calorífico del combustible, es fundamental que la temperatura de retorno del circuito sea baja (aproximadamente). En cuanto a las ventajas que proporciona esta tecnología, se señalan las siguientes:

- Eficiencia óptima de los combustibles con un ahorro de hasta el 15% de los gastos de calefacción.
- Eficiencias globales superiores al 100%, pues se posee una fuente de ganancia de calor adicional con respecto a los sistemas convencionales.
- Emisiones limpias, ya que los gases de escape están libres de polvo.
- Operación independiente del aire ambiental.

4.9. Clasificación de calderas según tecnologías

En este apartado, se van a presentar las principales conclusiones que se obtuvieron en un estudio detallado de más de cincuenta calderas representativas del estado del arte de la tecnología a nivel nacional, desarrollado por el grupo de investigación al que pertenecen los autores. Por otra parte, se presentará un análisis comparativo entre las mismas en cuanto a diferentes parámetros.

4.9.1. Tipo de combustible

En cuanto al tipo de combustible que admiten este tipo de calderas, pueden encontrarse varios casos. Así, existen calderas que sólo admiten un único combustible, principalmente pellets y en menor medida astillas de madera, además de las calderas de leña (troncos de madera) propiamente dichas. Otro tipo de calderas admiten dos, e incluso más de dos combustibles distintos (pellets, astillas, serrín, cereales...). En la Figura 23 se observa que las calderas de sólo pellet y las policombustibles acaparan un gran porcentaje del total (86%). Sin embargo, las que trabajan únicamente con leña o con astillas de madera, suponen una porción relativamente pequeña con respecto al número total de calderas estudiadas (8% en el caso de las de leña, 6% en el caso de las de astillas).

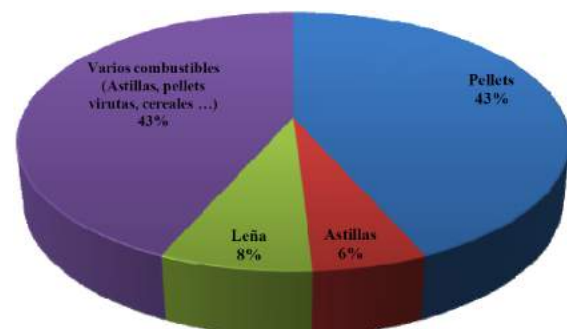


Fig. 23. Combustibles que admiten las calderas de biomasa

4.9.2. Tipo de alimentación

El tipo de alimentación que más se utiliza es la horizontal (30%), seguida de la superior (24%) y la inferior (18%). La alimentación manual, con un 8% del total, se refiere a calderas que utilizan como combustible troncos de madera. Los porcentajes anteriores, se han calculado sobre el total de los equipos. Ahora bien, si se consideran los porcentajes en función del rango de potencia suministrada, se obtiene la siguiente gráfica (Fig. 24):

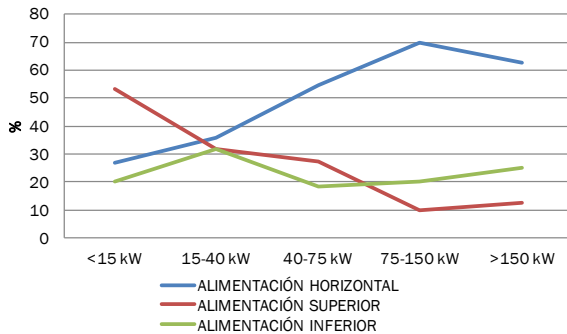


Fig. 24. Tipo de alimentación en función de la potencia.

Para bajas potencias (<15kW), el tipo de alimentación más utilizado es la superior, con casi un 55% del total de calderas. Sin embargo, el uso de este tipo de alimentación decrece a medida que aumenta la potencia. El caso contrario ocurre con la alimentación horizontal, cuyo porcentaje crece considerablemente con la potencia, siendo la más utilizada (en el 70% de las calderas) para el rango de potencias 75-150kW. La alimentación inferior es la menos usada, con una presencia relativamente baja para todos los rangos de potencias.

4.9.3. Diseño del quemador

En función del diseño del quemador, se tienen los siguientes tipos: retorta, parrilla fija y parrilla móvil. El 43% del total de las calderas estudiadas poseen parrilla fija, el 39%, parrilla móvil y únicamente el 9 % de las mismas tiene retorta como quemador. Dentro de las parrillas fijas, además de las parrillas convencionales (que acaparan el 78% del total de las mismas), existen otros tipos, aunque representan porcentajes muy pequeños del total: parrilla fija de embudo, quemador en forma de anillo.... Las parrillas móviles más usadas son las denominadas parrillas basculantes o de bisagra, con un 29% del total de las parrillas móviles, junto con las parrillas de avance o “Step grates”, con el mismo porcentaje. Dentro de las parrillas móviles, nos podemos encontrar también con otras como las giratorias o las vibratorias, aunque su uso está mucho más limitado que en el caso de las anteriores.

Por lo que respecta a la distribución por potencias (Fig. 25), la parrilla fija se utiliza en más de un 50% de las calderas que trabajan a potencias relativamente bajas. A media que aumenta el rango de potencias, su uso va

disminuyendo, aunque nunca por debajo del 40%. El uso de la parrilla móvil se va incrementando a medida que las aplicaciones son de mayor potencia, siendo la predominante para potencias mayores de 75kW. Por último, la retorta es el quemador menos utilizado con diferencia frente a los anteriores. De hecho, no llega al 15% para bajas potencias y a partir de 75 kW no existen calderas con este tipo de tecnología.

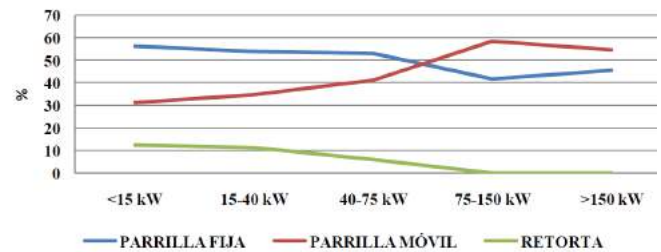


Fig. 25. Diseño del quemador en función de la potencia.

4.9.4. Limpieza de los tubos intercambiadores de calor

La limpieza de los intercambiadores de calor en este tipo de calderas suele ser automática (68% de total). En un 8% de los casos, la limpieza es manual, es decir, es necesario activar una palanca que se encuentra en el exterior de la caldera para activar los turbuladores o el mecanismo de limpieza concreto de la misma. Los mecanismos más utilizados para la limpieza automática de los intercambiadores de calor son los muelles/espinales (33%) y los turbuladores/cuchillas turbuladoras (22%). A continuación, se sitúa el sistema de recirculación de flujo (8%), seguido de mecanismos vibratorios (5%) y sinfines helicoidales (5%). Por último, con un 3% del total, se encuentran los mecanismos de limpieza mediante palancas.

4.9.5. Sistemas de control

En lo que a sistemas de control se refiere, se han analizado tanto la existencia de sonda Lambda en las calderas, como el funcionamiento modular de las mismas.

El 57% de las calderas estudiadas poseen sonda Lambda, un 2% no la poseen, mientras que un 41% de las mismas no lo declaran. En la gran mayoría de los casos en los que este dato no es declarado (al igual que en el caso de funcionamiento modular), la realidad muestra que se debe a la no existencia de dicha sonda. El porcentaje de calderas que poseen regulación por sonda Lambda aumenta considerablemente a medida que aumenta la potencia.

En cuanto al funcionamiento modular, prácticamente la mitad de las calderas disponen del mismo, mientras que la otra mitad no declaran este dato. Al igual que ocurre en el caso anterior, el porcentaje de calderas que son capaces de trabajar a carga parcial, aumenta notablemente hasta llegar al rango de potencias 75-150 kW, donde alcanza su máximo (80% del total de las calderas comprendidas en ese rango).

4.9.6. Eficiencia y emisiones

Teniendo en cuenta la eficiencia energética y las emisiones, se pueden establecer comparativas entre las diferentes calderas comerciales. En este sentido, no se pueden comparar todas en conjunto, sino que es necesario cruzar los datos de los diferentes fabricantes agrupando las calderas por tipos y tecnologías. Los datos se cruzaron de la siguiente manera:

- En función de la potencia, según los siguientes rangos: <15kW, 15-40kW, 40-75kW, 75-150kW y >150kW.
- En función del tipo de alimentación: calderas con alimentación superior, horizontal o inferior.
- En función del diseño del quemador: parrilla fija, parrilla móvil y retorta.
- En función del control de las calderas, según posean sonda Lambda y funcionamiento modular o no.

Los parámetros finalmente estudiados en función de las categorías anteriores son: la eficiencia energética, emisiones de CO, partículas y exceso de aire. Las categorías resultan ser: potencia, tipo de alimentación, diseño del quemador, sonda lambda y funcionamiento modular. A modo de ejemplo, se presenta un primer caso con apoyo gráfico (Fig. 26) como es el parámetro eficiencia categorizado por la potencia.

En la Figura 26 se comprueba que, para bajas potencias, los rendimientos a carga parcial son menores que los rendimientos a carga total. Sin embargo, para potencias más elevadas, a partir de los 90 kW, ocurre lo contrario, lo que indica que se produce correctamente la regulación a carga parcial).

Estudiando la *eficiencia en función de la alimentación*, no se aprecia ninguna relación entre el rendimiento y los

distintos tipos de alimentación (horizontal, superior e inferior). En función del diseño del quemador (parrilla fija, parrilla móvil y retorta), se tiene que son las parrillas fijas con las que mayor eficiencia se obtiene.

Aquellas calderas que poseen sonda Lambda tienen unos rendimientos ligeramente superiores que aquellas que no la tienen, tanto a carga parcial como a carga total. Debido a los pocos datos disponibles en el caso de funcionamiento no modular, no es posible obtener conclusiones comparando los dos tipos de funcionamiento (modular/todo o nada). Ahora bien, en el caso de las calderas que funcionan de manera modular, se tiene que para bajas potencias se alcanzan mayores rendimientos a carga total y para potencias más elevadas las mayores eficiencias se alcanzan a carga parcial. Por lo que respecta al rendimiento se puede pues concluir:

- A bajas potencias, los rendimientos a carga parcial son menores que a carga total. Para potencias elevadas (mayores de 90kW aproximadamente) ocurre lo contrario.
- Las mayores eficiencias se alcanzan con parrilla fija.
- Las calderas que poseen sonda Lambda tienen unos rendimientos ligeramente superiores, tanto a carga parcial como a carga total.

Respecto a las *emisiones de CO*, no hay ningún tipo de alimentación que produzca unas mejores emisiones de CO. Sin embargo, cabe resaltar que las emisiones a carga parcial se disparan notablemente con respecto a las emisiones de carga total. A medida que aumenta la potencia, esta diferencia entre emisiones a carga parcial y a carga total se reduce, aunque continúan siendo más altas las emisiones a carga parcial.

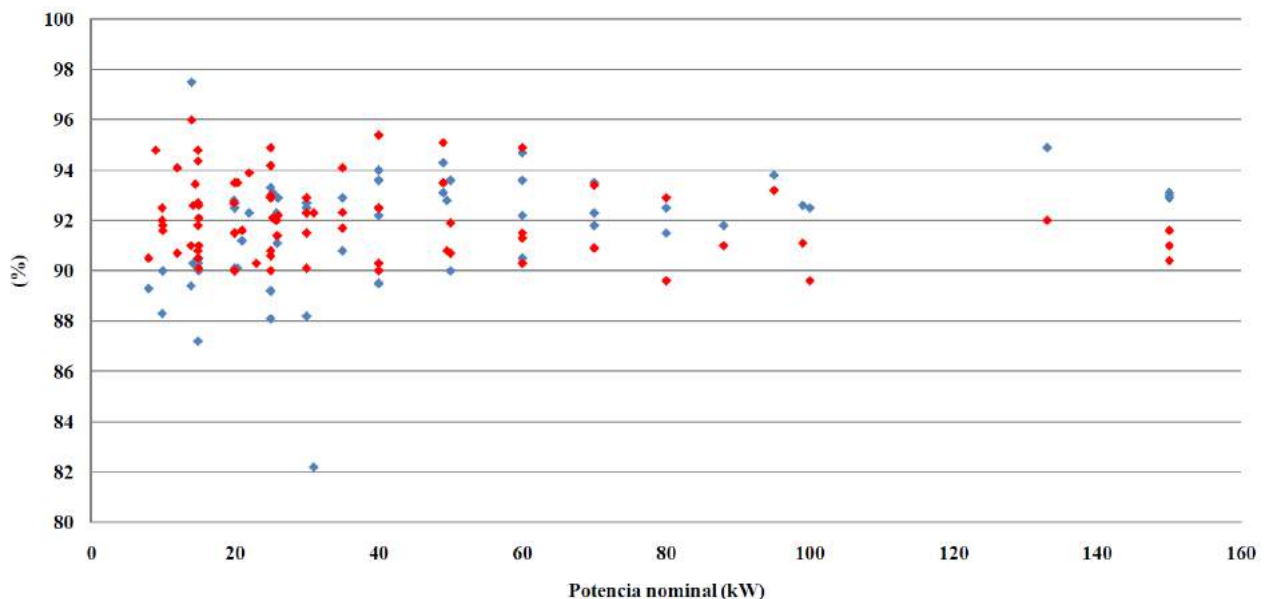


Fig. 26. Eficiencia (%) a carga parcial y total en función de la potencia. (◆) Carga parcial (◆) Carga total.

La existencia de sonda Lambda no implica unas menores emisiones de CO, de hecho, las emisiones de una caldera con sonda Lambda y de una sin dicha sonda son similares. Las emisiones de CO se disparan a carga parcial, en menor medida conforme aumenta la potencia. En las calderas con funcionamiento modular, a bajas potencias las emisiones de CO a carga parcial son, de nuevo, muy superiores a las emisiones a carga total. Por lo que respecta a las emisiones de CO, se puede pues concluir:

- Las emisiones de CO, a carga parcial, se disparan notablemente con respecto a las emisiones a carga total, disminuyendo esta diferencia a medida que aumenta la potencia.
- Las menores emisiones de CO se producen con parrilla móvil. Además, con este tipo de quemador, las emisiones de CO a carga parcial no se disparan tanto como con el resto de quemadores.
- La existencia de sonda Lambda no implica menores emisiones de CO.

Por lo que respecta a *la emisión de partículas* en los gases de escape, éstas son perjudiciales para la salud por lo que deben tratar de ser eliminadas. El sistema de alimentación no tiene una influencia decisiva en el nivel de emisiones de partículas, pero sí el diseño del quemador, donde las menores emisiones se producen con quemadores de retorta. No existen apenas diferencias entre las calderas que poseen regulación por sonda Lambda y las que no disponen de dicha sonda, y lo mismo puede decirse del funcionamiento modular. Se puede concluir pues:

- Las emisiones de partículas a carga total son mayores que a carga parcial.
- Las menores emisiones de partículas se producen en calderas que poseen retorta como diseño del quemador.
- La existencia de sonda Lambda no implica unas menores emisiones de partículas.
- Existen enormes variaciones en cuanto a las emisiones de partículas de las distintas calderas.

El *exceso de aire* representa la proporción entre el aire que realmente se emplea en la combustión y el aire mínimo necesario para la misma. Cuanto menos aire se utilice, menos calor se pierde por la chimenea, pero la combustión se hace más difícil, y existe tendencia a emitir CO. Un exceso de aire muy elevado, enfría demasiado el interior de la caldera provocando también la formación de CO. En muchas calderas el exceso de aire es difícil de controlar, motivo por el cual, los fabricantes tienden a introducir sondas Lambda en sus calderas. Las emisiones de CO₂ deben de ser lo más altas posibles, ya que esto indica que se está quemando todo y que el exceso de aire es bajo. Teniendo en cuenta el tipo de alimentación, el menor exceso de aire se da para la alimentación superior a carga total, es decir, el aire realmente consumido se acerca más al estequiométrico que con el resto de alimentaciones. Sin embargo, a carga parcial, el exceso de aire con alimentación superior se dispara. En cuanto al quemador, el

exceso de aire con parrilla fija es ligeramente inferior que con parrilla móvil (a carga total). Sin embargo, a carga parcial, el exceso de aire con parrilla fija se dispara por encima del exceso de aire con parrilla móvil. Se puede afirmar que existe una tendencia a utilizar un exceso de aire más bajo mediante la introducción de sonda Lambda. En el caso de funcionamiento modular, el exceso de aire a carga total es muy inferior al exceso de aire a carga parcial:

- A carga total, el menor exceso de aire se da con alimentación superior. A carga parcial, este exceso de aire se dispara.
- A carga total, el exceso de aire es ligeramente inferior con parrilla fija que con parrilla móvil. Sin embargo, a carga parcial, el exceso de aire es inferior con parrilla móvil.
- Existe una tendencia a utilizar un exceso de aire más bajo mediante la introducción de sonda Lambda.
- Con funcionamiento modular, el exceso de aire a carga total es muy inferior al exceso de aire a carga parcial.

Este apartado proporciona una idea del estado del arte de las calderas de biomasa comerciales. Son varias las especificaciones que hay que tener en cuenta para la selección de un buen dispositivo generador, teniendo en cuenta los rendimientos esperables, pero sin perder de vista los aspectos medioambientales derivados de su uso.

5. Caso práctico

Se pretende emplear una caldera de Pellet de 70 kW con un rendimiento global de $\eta=0,90$ para quemar astilla. La caldera está regulada para trabajar con un exceso de aire 1.5 cuando trabaja con pellet con aire a 1 atm y 20 °C. Se supone que el tornillo sinfín alimentará volumétricamente igual el pellet que la astilla y que la demanda media diaria de energía es de 120 kWh. Se supone que el rendimiento global con astilla será de $\eta=0,88$ para cualquier exceso de aire con el que trabaje. La caldera no tiene opción de regulación.

Determinar:

1. Flujo másico de astilla de alimentación.
2. Potencia que liberará la caldera con astilla.
3. Ahorro en el kWh generado.
4. Volumen del silo necesario con pellet para 1 mes de demanda. ¿Cuánto tiempo de almacenamiento supondría con astilla?
5. Exceso de aire con el que se trabajará.
6. Suponiendo combustión completa y aire comburente seco calcular temperatura de rocío para el pellet y la astilla.
7. Calcular temperatura de salida de humos tanto para el pellet como la astilla con el supuesto anterior.
8. Suponiendo que la temperatura de salida de humos pueda ser de 50°C, calcular nueva potencia tanto con pellet como con astilla y nuevo ahorro en el kWh

generado. (Utilizar supuestos del apartado 6 del presente enunciado)

| | PELLET | ASTILLA |
|---|--------|---------|
| ρ_p (kg/m ³) | 1150 | 700 |
| ε (m ³ _{BUSCO} /m ³ _{LECHO}) | 0,50 | 0,55 |
| W (%BH) | 9,25 | 15,00 |
| A (%BH) | 0,68 | 0,70 |
| C (%BH) | 47,0 | 45,0 |
| H (%BH) | 6,0 | 5,0 |
| N (%BH) | 0,5 | 0,7 |
| PCI (kJ·kg ⁻¹ BH) | 17476 | 17000 |

1. Inicialmente calculamos el flujo másico de pellet (m_{pellet}) que permite obtener los 70 kW de potencia térmica en la caldera:

$$m_{\text{pellet}} = 70 \text{ kW} / [17476 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 0,90] = 4,45 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

Una vez definido el flujo másico, es necesario calcular el caudal volumétrico (V_{pellet}) con que se alimenta y que será el mismo para la astilla según el enunciado del caso.

$$V_{\text{pellet}} (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}) = m_{\text{pellet}} / \rho (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$$

Es necesario calcular previamente la densidad a granel de pellet (ρ):

$$\rho = (1 - \varepsilon) \cdot \rho_p = (1 - 0,5) \cdot 1150 = 575 \text{ kg}_{\text{pellet}} \cdot \text{m}^{-3}_{\text{lecho}}$$

$$V_{\text{pellet}} = 4,45 \cdot 10^{-3} \text{ kg}_{\text{pellet}} \cdot \text{s}^{-1} / 575 \text{ kg}_{\text{pellet}} \cdot \text{m}^{-3}_{\text{lecho}} = 7,74 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3_{\text{lecho}} \cdot \text{s}^{-1}$$

En este caso y tal como determina el enunciado, ambos caudales volumétricos son coincidentes ($V_{\text{pellet}} = V_{\text{astilla}}$) lo que permitirá determinar los parámetros básicos empleando astilla:

$$\rho' = (1 - \varepsilon') \cdot \rho'_p = (1 - 0,55) \cdot 700 = 315 \text{ kg}_{\text{astilla}} \cdot \text{m}^{-3}_{\text{lecho}}$$

Se puede por tanto determinar el flujo másico de astilla:

$$m'_{\text{astilla}} = V'_{\text{astilla}} (m'_{\text{astilla}} \cdot \text{s}^{-1}) \cdot \rho' (\text{kg}_{\text{astilla}} \cdot \text{m}^{-3}_{\text{lecho}}) = 7,74 \cdot 10^{-6} \cdot 315 = 2,44 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

2. La menor densidad de partícula y mayor porosidad hacen que el flujo másico de astilla sea muy inferior al de pellet. A continuación, se puede calcular la potencia esperada en la caldera empleando astilla:

$$2,44 \cdot 10^{-3} \text{ kg}_{\text{astilla}} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 17000 \text{ kJ} \cdot \text{kg}_{\text{astilla}}^{-1} \cdot 0,88 = 36,5 \text{ kW}$$

3. Por lo que respecta a los ahorros, es necesario tener una estimación de los precios de los combustibles, 0,253€/kg para el pellet y 0,060 €/kg para la astilla.

$$[70 \text{ kW} / 4,45 \cdot 10^{-3} \text{ kg}_{\text{pellet}} \cdot \text{s}^{-1}] \cdot [1 \text{ kWh} / 3600 \text{ kJ}] = 4,37 \text{ kWh} \cdot \text{kg}_{\text{pellet}}^{-1}$$

$$0,253 \text{ €} \cdot \text{kg}_{\text{pellet}}^{-1} / 4,37 \text{ kWh} \cdot \text{kg}_{\text{pellet}}^{-1} = 0,058 \text{ €/kWh}$$

$$[36,5 \text{ kW} / 2,44 \cdot 10^{-3} \text{ kg}_{\text{astilla}} \cdot \text{s}^{-1}] \cdot [1 \text{ kWh} / 3600 \text{ kJ}] = 4,16 \text{ kWh} \cdot \text{kg}_{\text{astilla}}^{-1}$$

$$0,060 \text{ €} \cdot \text{kg}_{\text{astilla}}^{-1} / 4,16 \text{ kWh} \cdot \text{kg}_{\text{astilla}}^{-1} = 0,014 \text{ €/kWh}$$

$$\text{Ahorro} = 0,058 \text{ €/kWh} - 0,014 \text{ €/kWh} = 0,044 \text{ €/kWh}$$

4. Para el cálculo del tamaño necesario del silo para un mes consumiendo pellet, se conoce la demanda energética media diaria (120 kWh) y se supondrá un mes de 30 días. Para cubrir dicha demanda se necesitará:

$$120 \text{ kWh} \cdot 30 \text{ días} / 4,37 \text{ kWh} \cdot \text{kg}_{\text{pellet}}^{-1} = 824 \text{ kg}_{\text{pellet}}$$

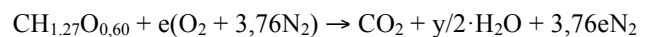
$$824 \text{ kg}_{\text{pellet}} / 575 \text{ kg}_{\text{pellet}} \cdot \text{m}^{-3}_{\text{lecho}} = 1,43 \text{ m}^3_{\text{lecho}} = 1,43 \text{ m}^3_{\text{silo}}$$

Suponiendo por tanto que el silo tiene 1,43 m³ la cantidad de astilla que cabría dar para menos días.

$$1,43 \text{ m}^3_{\text{lecho}} \cdot 315 \text{ kg}_{\text{astilla}} \cdot \text{m}^{-3}_{\text{lecho}} = 450 \text{ kg}_{\text{astilla}}$$

$$450 \text{ kg}_{\text{astilla}} \cdot 4,16 \text{ kWh} \cdot \text{kg}_{\text{astilla}}^{-1} / 120 \text{ kWh} = 15,6 \text{ días}$$

5. Primero, habrá que determinar para las condiciones de combustión con pellet (70 kW y n=1,5) el caudal de aire seco que se introduce en la caldera que será el mismo caudal que para la astilla. En el caso del pellet su molécula equivalente es CH_{1,27}O_{0,60} (22,87 gr/mol):



$$e = 1,018 [\text{mol O}_2 / \text{mol CH}_{1,27}\text{O}_{0,60}]$$

$$A_e = 4,84 [\text{mol aire} / \text{mol CH}_{1,27}\text{O}_{0,60}]$$

$$A_e = 0,211 [\text{mol aire} / \text{g CH}_{1,27}\text{O}_{0,60}]$$

Como el exceso de aire son n=1,5,

$$A = 0,318 [\text{mol aire} / \text{g CH}_{1,27}\text{O}_{0,60}]$$

1 gramo de CH_{1,27}O_{0,60} está contenido en 100/89,57 = 1,12 gramos de pellet.

$$A = 285 [\text{mol aire} / \text{kg pellet}]$$

Suponiendo aire seco y condiciones normales 1 mol de aire ocupa 22,4 · 10⁻³ m³. A = 6,38 [m³ aire seco/kg pellet]. Como se están introduciendo 4,45 · 10⁻³ kg_{pellet} · s⁻¹, el total de aire seco introducido por la caldera es:

$$A = 1,268 \text{ mol aire seco} \cdot \text{s}^{-1} = 28 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

En esas mismas condiciones se introducen 2,44 · 10⁻³ kg_{astilla} · s⁻¹ por lo que le corresponde:

$$A = 520 [\text{mol aire} / \text{kg astilla}]$$

| | PELLET | ACUMULADO |
|---------------|---|---------------------------------------|
| | 0,68 gr cenizas (sin C, H, O ni N) | 0,68 |
| | 0,50 gr N | 1,18 |
| | | 9,25·16/18 = 8,22 gr O |
| | | 9,25·2/18 = 1,03 gr H |
| 100 gr pellet | 9,25 gr H ₂ O | 10,43 |
| | | 47,00 gr C (3,92 moles C) |
| | 100-10,43 = 89,57 gr CH _y O _x | 6,00-1,03 = 4,97 gr H (4,97 moles H) |
| | M _R = 12+y+16x | 100-62,40 = 37,60 gr O (2,35 moles O) |

$y=4,97/3,92 = 1,27$ $x=2,35/3,92 = 0,60$ Compuesto seco sin cenizas y sin N
 $PM_{CH_yO_x} = 12+y+16x = 22,87$ gr/mol.

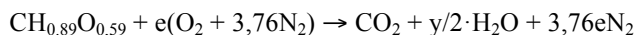
CH_{1,27}O_{0,60}

| | ASTILLA | ACUMULADO |
|----------------|---|---------------------------------------|
| | 0,70 gr cenizas (sin C, H, O ni N) | 0,70 |
| | 0,70 gr N | 1,40 |
| | | 15,00·16/18 = 13,33 gr O |
| | | 15,00·2/18 = 1,67 gr H |
| 100 gr astilla | 15,00 gr H ₂ O | 16,40 |
| | | 45,00 gr C (3,75 moles C) |
| | 100-16,40 = 83,60 gr CH _y O _x | 5,00-1,67 = 3,33 gr H (3,33 moles H) |
| | M _R = 12+y+16x | 100-64,73 = 35,27 gr O (2,20 moles O) |

$y=3,33/3,75 = 0,89$ $x=2,20/3,75 = 0,59$ Compuesto seco sin cenizas y sin N
 $PM_{CH_yO_x} = 12+y+16x = 22,33$ gr/mol.

CH_{0,89}O_{0,59}

Dado que éste es el aire realmente entrante, es necesario calcular el mínimo necesario para tratar de determinar con qué exceso de aire trabajaría la caldera con astilla.



$$e = 0,928 \text{ [mol } O_2/\text{mol } CH_{0,89}O_{0,59}]$$

$$A_e = 4,415 \text{ [mol aire/mol } CH_{0,89}O_{0,59}]$$

$$A_e = 0,198 \text{ [mol aire/g } CH_{0,89}O_{0,59}]$$

1 gramo de CH_{0,89}O_{0,59} está contenido en 100/83,60 = 1,20 gramos de pellet.

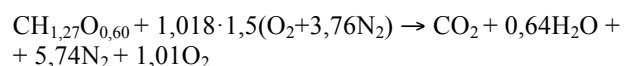
$$A_e = 165 \text{ [mol aire/kg astilla]}$$

Por lo tanto, el exceso de aire “n” será el cociente entre el aire que realmente entra en la caldera partido por el mínimo necesario:

$$n = 520/165 = 3,15$$

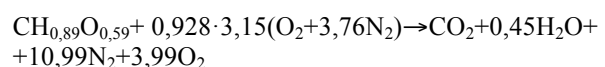
Por consiguiente, la astilla sería quemada en esas circunstancias con un exceso de aire de 3,15. Este resultado es en realidad excesivo para la astilla y habría que modificar la caldera para poder rebajarlo a condiciones de combustión más favorables para la astilla.

6. Suponiendo la combustión completa y los excesos de aire del apartado anterior, la combustión para el pellet queda definitivamente como:



Al agua formada en la combustión hay que añadirle la propia humedad del combustible. En esta reacción CH_{1,27}O_{0,60} representa 22,87 gramos. Por tanto, le corresponderían (22,87·9,25/80,97) 2,61 gramos de agua (0,15 moles H₂O). Siendo por consiguiente, la fracción molar del agua en los humos de 0,093 moles H₂O/mol humo ([0,64+0,15]/[1,00+0,64+0,15+5,74+1,01]). Suponiendo que la presión de los humos es 1,013 bar, la presión parcial del agua vapor, supuesta gas ideal, sería de 0,094 bar y por tanto, le corresponde una temperatura de rocío de $T_{ROCIOPellet} = 44,6^\circ C$.

Suponiendo la combustión completa y los excesos de aire del apartado anterior, la combustión para la astilla queda definitivamente como:



Al agua formada en la combustión hay que añadirle la propia humedad del combustible. En esta reacción $\text{CH}_{0,89}\text{O}_{0,59}$ representa 22,33 gramos. Por consiguiente, le corresponderían $(22,33 \cdot 15,00/83,60)$ 4,00 gramos de agua (0,22 moles H_2O). Siendo por tanto, la fracción molar del agua en los humos de 0.040 moles $\text{H}_2\text{O}/\text{mol}$ humo $([0,45+0,22]/[1,00+0,45+0,22+10,99+3,99])$. Suponiendo que la presión de los humos es 1,013 bar, la presión parcial del agua vapor, supuesta gas ideal, sería de 0,041 bar y por tanto le corresponde una temperatura de rocío de $T_{\text{ROCIOastilla}} = 29,4^\circ\text{C}$.

7. El rendimiento de la caldera en el caso de la utilización del pellet hace que la temperatura de los humos no sea igual a la de los reactivos. Sabiendo que no todo el calor liberado en el caso de combustión completa se utiliza en calentar el agua, supondremos que esa diferencia se va en forma de calor latente en los humos. Dicho calor en este caso sería:

$$17476 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot (1-0,90) = 1748 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}_{\text{pellet}}$$

En el caso de la reacción anterior $\text{CH}_{1,27}\text{O}_{0,60}$ representa 22,87 gramos que equivaldrían a $(22,87 \cdot 100/89,57)$ 25,53 gramos de pellet al que le correspondería un calor no utilizado en agua caliente de $(1748 \cdot 25,53/1000)$ 44,63 kJ. Dicha energía se emplea en evaporar el agua del pellet $(2,61 \cdot 10^{-3} \text{ gr } \text{H}_2\text{O} \cdot 2256,7 \text{ kJ/kg } \text{H}_2\text{O})$ 5,90 kJ y en aumentar la temperatura de los humos desde los 20 °C originales del aire y del pellet. Como el compuesto mayoritario en los humos es el N_2 , se supondrá que el calor específico de los mismos es el de dicho compuesto 29,26 J/mol·°C. El número de moles de humo es $(1,00+0,64+0,15+5,74+1,01)$ 8,54 moles, por lo que la temperatura que aproximadamente les correspondería sería de:

$$t_{\text{HUMOSpellet}} = 20^\circ\text{C} + (44,63 - 5,90) / (8,54 \cdot 29,26 \cdot 10^{-3}) = 153,21^\circ\text{C}$$

El mismo razonamiento puede seguirse para el caso de la astilla. El calor no aprovechado en este caso sería:

$$17000 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot (1-0,88) = 2040 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}_{\text{astilla}}$$

En el caso de la reacción anterior $\text{CH}_{0,89}\text{O}_{0,59}$ representa 22,33 gramos que equivaldrían a $(22,33 \cdot 100/83,60)$ 26,71 gramos de astilla al que le correspondería un calor no utilizado en agua caliente de $(2040 \cdot 26,71/1000)$ 54,49 kJ. Dicha energía se emplea en evaporar el agua de la astilla $(4,00 \cdot 10^{-3} \text{ gr } \text{H}_2\text{O} \cdot 2256,7 \text{ kJ/kg } \text{H}_2\text{O})$ 9,03 kJ y en aumentar la temperatura de los humos desde los 20 °C originales del aire y de la astilla. Como el compuesto mayoritario en los humos es el N_2 , se supondrá que el calor específico de los mismos es el de dicho compuesto 29,26 J/mol·°C. El número de moles de humo es $(1,00+0,45+0,22+10,99+3,99)$ 16,65 moles por lo que la temperatura que aproximadamente les correspondería sería de:

$$t_{\text{HUMOSastilla}} = 20^\circ\text{C} + (54,49 - 9,03) / (16,65 \cdot 29,26 \cdot 10^{-3}) = 113,31^\circ\text{C}$$

8. En este caso ya que la temperatura que se pretende alcanzar de 50°C está en ambos casos por encima de la temperatura de rocío tanto del pellet (44,6°C) como de la astilla (29,4°C) no se producirá condensación. La bajada de temperatura en humos hará que el rendimiento de la caldera mejore sustancialmente, aunque no tanto como si se produjera la condensación. Estas temperaturas de humos tan bajas se consiguen en calderas de baja temperatura y en las de condensación.

En el caso del pellet el calor finalmente desaprovechado ($Q_{\text{PERDIDOpellet}}$) se calcularía con la siguiente expresión:

$$50^\circ\text{C} = 20^\circ\text{C} + (Q_{\text{PERDIDOpellet}} - 5,90) / (8,54 \cdot 29,26 \cdot 10^{-3})$$

Donde $Q_{\text{PERDIDOpellet}} = 13,40$ kJ. Eso representaría 524,87 kJ·kg⁻¹_{pellet} $(13,40 \cdot 1000/25,53)$ de energía perdida lo que es mucho menor que en el supuesto 7. Esto implicaría que el nuevo rendimiento de la caldera sería de 0,97 $(1 - [524,87/17476])$. Esto implica que el ahorro de combustible será del 7% (97%-90%). Esto mismo se puede también razonar siguiendo los apartados 1 y 3 de este caso práctico. Siguiendo el razonamiento del supuesto 1 la nueva potencia sería de 75,44 kW $(4,45 \cdot 10^{-3} \cdot 17476 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 0,97)$. Por otra parte, siguiendo lo razonado en el supuesto 3, la energía disipada es de 4,71 kWh·kg⁻¹_{pellet} y por tanto, el nuevo precio de la energía es de 0,054 €/kWh lo que supone un ahorro del 6,9% $([0,058 - 0,054]/0,058)$ en el coste del combustible. Téngase en cuenta que la caldera no permite variar el flujo másico del pellet ni su caudal de aire, por lo que lo que sucede es que aumenta la potencia por encima de 70 kW.

En el caso de la astilla se determinará el ahorro también con dos supuestos consistiendo el segundo en aumentar la potencia ya que el flujo másico no se puede variar. En el caso de la astilla el calor finalmente desaprovechado ($Q_{\text{PERDIDOastilla}}$) se calcularía con la siguiente expresión:

$$50^\circ\text{C} = 20^\circ\text{C} + (Q_{\text{PERDIDOastilla}} - 9,03) / (16,65 \cdot 29,26 \cdot 10^{-3})$$

Donde $Q_{\text{PERDIDOastilla}} = 23,65$ kJ. Eso representaría 885,44 kJ·kg⁻¹_{astilla} $(23,65 \cdot 1000/26,71)$ de energía perdida lo que es mucho menor que en el supuesto 7. Esto implicaría que el nuevo rendimiento de la caldera sería de 0,95 $(1 - [885,44/17000])$. Esto implica que el ahorro de combustible será también del 7% (95%-88%). Esto mismo se puede también razonar siguiendo los apartados 1 y 3 de este caso práctico. La nueva potencia conseguida es de 39,4 kW $(2,44 \cdot 10^{-3} \cdot 17000 \cdot 0,95)$. Por otra parte, siguiendo lo razonado en el supuesto 3, la energía disipada es de 4,48 kWh·kg⁻¹_{astilla} y por tanto, el nuevo precio de la energía es de 0,013 €/kWh lo que supone un ahorro del 7,1% $([0,014 - 0,013]/0,014)$ en el coste del combustible.

Téngase en cuenta que en los cálculos se han hecho varias simplificaciones como que el régimen de la caldera es permanente, los humos son gases ideales, las combustiones son completas, la evaporación del agua tiene

lugar a presión constante 1,013 bar, el calor específico de los humos se asume constante e igual al del nitrógeno, etc. Esto no invalida los cálculos, pero sí que añade una cierta inexactitud cuya determinación excede el contenido del presente capítulo.

6. Conclusiones

La biomasa es una energía renovable con un gran potencial tanto a nivel global como nacional. Entendiéndola como una más entre las fuentes energéticas renovables, es una de las que más puede contribuir al desarrollo socioeconómico local en aquellas zonas donde se genera el recurso. Son diversos los agentes que intervienen en la adecuación del combustible para poder ser finalmente utilizado, y también diversas las coyunturas económicas que en conjunto han hecho que, a pesar de su potencial, la biomasa no se haya desarrollado como fuente de energía renovable al mismo nivel que el resto. Las actuales circunstancias, como puede ser el encarecimiento de la energía, hacen que la biomasa se vuelva cada vez más competitiva, proveyéndose un despegue de la misma en los próximos años, como así se manifiesta en el Plan de Energías Renovables PER 2011-2020.

Uno de los principales problemas para su uso extensivo es la baja densidad energética, existiendo diferentes tecnologías que minoran este efecto ya desde el origen, con una adecuada planificación y el uso de maquinaria de altas prestaciones. La densificación es otra tecnología que permite aumentar de forma significativa la densidad energética, aumentando también la homogeneidad de formas y tamaños además del resto de propiedades. En este sentido, el pellet, por su facilidad de manipulación, es el combustible densificado por excelencia y el más adecuado para la mayor parte de los casos de instalaciones térmicas domésticas. Otro aspecto de interés es que, a nivel normativo, el pellet se rige por unos estándares de calidad contrastados que permiten identificar con más claridad el combustible adquirido.

Por lo que respecta a los equipos generadores que usan la biomasa como combustible a nivel residencial y terciario, existe una amplia variedad de calderas que actualmente tienen unas prestaciones equivalentes a aquellas que emplean combustibles convencionales. Actualmente, es posible encontrar en el mercado equipos de altas prestaciones y fiabilidad que permiten un uso seguro, eficiente y automático de la biomasa. La única limitación de ésta con respecto a sus competidores convencionales, es la mayor necesidad de espacio tanto de almacenamiento como de instalaciones. Una buena opción para solventarlo es la instalación centralizada de las instalaciones o una configuración de *district heating*.

Glosario

Biomasa: se define de forma general como cualquier tipo de sustancia orgánica cuyo origen esté próximo en el tiempo y sea debido a un proceso biológico. También como la fracción biodegradable de los productos desechados y residuos procedentes de la agricultura, de la selvicultura y de las industrias conexas, así como la fracción biodegradable de los residuos industriales y municipales [2001/77/CEE]. La Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), define la biomasa como “todo material de origen biológico excluyendo aquellos que han sido englobados en formaciones geológicas sufriendo un proceso de mineralización” utilizando la definición de la Especificación Técnica Europea CEN/TS 14588.

Recursos Renovables y Fuentes Renovables: los primeros se definen como “aquellos derivados de procesos naturales” y “que pueden ser repuestos más rápido de lo que son consumidos”, según la Agencia Internacional de la Energía (IEA). Como fuentes de energía renovable se incluye la electricidad y el calor, derivados del sol, viento, océano, biomasa, geotermia, así como biocombustibles e hidrógeno derivados de fuentes renovables (IEA 2002).

Energía Térmica: se define como la manifestación de la energía en forma de calor, es decir, en forma de variación de la temperatura de un determinado sistema.

Calderas: recipiente metálico, cerrado, destinado a producir vapor o calentar agua a presión constante, mediante la acción del calor. Según el Reglamento de Instalaciones Técnicas de Edificación (RITE), se trata de un “equipo de trabajo a presión constante, en el que el calor procedente de cualquier fuente de energía se transfiere a los usos térmicos de un edificio por medio de un circuito de agua cerrado”.

Estufas: recipiente cerrado, de metal o materiales cerámicos, en cuyo interior se quema un combustible, transmitiendo el calor, generalmente por convección, directamente a la estancia que se desea calefactar.

Pellet: tipo de formato para la biomasa densificada, caracterizado por su forma cilíndrica y su pequeño tamaño, habitualmente formado a base de serrín, virutas y/o astillas, procedentes de restos de poda.

Listado de acrónimos y abreviaciones

ACS: Agua caliente sanitaria.
AENOR: Asociación Española de Normalización y Certificación.
Bh: Base húmeda.
Bhcc: Base húmeda con cenizas.
Bs: Base seca.
Bssc: Base seca sin cenizas.
CTE: Código Técnico de la Edificación.
EFGR: External flue gas recirculation.
GLP: Gas Licuado del Petróleo.
IDAE: Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía
IFGR: Internal flue gas recirculation.

PER: Plan de Energías Renovables.
RITE: Reglamento de Instalaciones Técnicas de Edificación.
tep: tonelada equivalente de petróleo.

Minúsculas

| | |
|---|--|
| d [m] | dimensión de longitud. Diámetro |
| e [mol O ₂ /mol comb] | oxígeno estequiométrico partícula |
| e _c [mol O ₂ /mol char] | oxígeno estequiométrico char |
| l [m] | longitud |
| m [kg] | masa |
| n [-] | exceso de aire respecto estequiométrico |
| n _c [-] | exceso de aire respecto estequiométrico char |
| t [s] | tiempo |

Mayúsculas

| | |
|--|---|
| A [%] ó [mol aire/mol comb] | Contenido en cenizas ó aire suministrado combustible. |
| A _e [mol aire/mol comb] | Aire estequiométrico partícula |
| (A _e) _c [mol aire/mol char] | Aire estequiométrico char |
| C [%] | Contenido en carbono |
| CF [%] | Contenido en carbono fijo |
| C _p [kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹] | Calor específico |
| H [%] | Contenido en hidrógeno |
| H _{vap} [kJ·kg ⁻¹] | Entalpía vaporización agua |
| P _m [g·mol ⁻¹] | Peso molecular |
| N [%] | Nitrógeno |
| PCS [kJ·kg ⁻¹] | Poder Calorífico Superior |
| PCI [kJ·kg ⁻¹] | Poder Calorífico Inferior |
| Q [kW] | Potencia térmica |
| Vol [%] | Contenido en volátiles |
| W [%] o [kJ·kg ⁻¹] | Humedad o Trabajo |

Griegas

| | |
|--------------------------------------|----------------------------|
| ε [-] | Porosidad |
| η [-] | Rendimiento |
| ρ [kg·m ⁻³] | Densidad a granel |
| ρ _p [kg·m ⁻³] | Densidad partícula |
| φ [-] | Contenido en agua del aire |

Referencias

- [1] Patel M., et al. *Techno-economic and life cycle assessment on lignocellulosic biomass thermochemical conversion technologies: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016;53:1486–99.
- [2] Nguyen TDB, et al. *Three-stage steady-state model for biomass gasification in a dual circulating fluidized-bed*. Energy Convers Manag. 2012;54 (1):100–12.
- [3] European Commission. *Renewable energy: progressing towards the 2020 target*. January 2011.
- [4]. I.D.A.E., P.E.R. (Plan de Energías Renovables 2011–2020).
- [5] Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital. Secretaría de Estado de Energía. *La Energía en España 2016*. 2017
- [6] Jankes G. G. et al.: *Biomass Gasification with CHP Production* THERMAL SCIENCE, Year 2012, Vol. 16, Suppl. 1, pp. S115-S130.

- [7] I.D.A.E. PROYECTO SECH-SPAHOUSEC. Análisis del consumo energético del sector residencial en España. Julio 2011.
- [8] *La Biomasa como Necesidad Energética*. Montes Ponce de León, Manual. Avances en Combustión de Biomasa y Bioenergía 1-16. (2005).
- [9] *Mapa tecnológico: Calor y Frío Renovables con Biomasa*. 2012 IDAE.
- [10] Mapping of international standards of solid biofuels for ISO TC 238. Alakangas E, Gerlagh T, Bakker F, Takagishi Y and Cedarquist S. International Organization for Standardization ISO. (2008).
- [11] Granada E, Lareo G, Míguez JL, Moran J, Porteiro J, Ortiz L. *Feasibility study of forest residue use as fuel through co-firing with pellet*. Biomass and Bioenergy, 30:238-246. (2006).
- [12] Regueiro, A., Jezerská, L., Patiño, D., Pérez-Orozco, R., Nečas, J., Židek, M. *Experimental study of the viability of low-grade biofuels in small-scale appliances*. Sustainability 9 (10), art. No. 1823, (2017).
- [13] Moran JC, Granada E, Porteiro J, Míguez JL. *Experimental modelling of a pilot lignocellulosic pellets stove plant*. (2004). Biomass and Bioenergy 27(6):577-583.
- [14] E. Granada Álvarez. *Estudio de la influencia de los parámetros de humedad, temperatura y presión en el proceso de densificado, mediante autoaglomeración, de biomasa lignocelulósica residual*. (1999). Tesis Doctoral, Universidad de Vigo.
- [15] J. L. Míguez Tabarés. *Valoración de residuos lignocelulósicos con fines energéticos mediante procesos de densificación por briquetado y determinación de índices de calidad en función de parámetros físico-químico-energéticos*. (1997). Tesis Doctoral Universidad de Vigo.
- [16] A proof of Kepler conjecture. Hales TC. (2003).
- [17] Abreu CRA, Macias-Salinas R, Tavarés FW and Castier M. A Monte (1999). *Carlo simulation of the packing and segregation of spheres in cylinders*. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. 16(4):395-405. [18] Numerically packing spheres in cylinders. Mueller GE. *Powder Technology* 159:105-110. (2005).
- [19] *Characterisation of non-spherical particles from their packing behavior*. Yu AB and Stan...sh N. *Powder Technology*, 74:205-213. (1993).
- [20] Measurement and Application of a Discrete Particle Model (DPM) to Simulate Combustion of a Packed Bed of Individual Fuel Particles. Peters B *Combustion and Flame* 131:132-146. (2002).
- [21] *Combustion of Wood Particles- A Particle Model for Eulerian Calculations*. Thunman H, Leckner B, Niklasson F and Johnson F *Combustion and Flame* 129:30-46. (2002).
- [22] *Modeling Intra- and Extra- Particle Processes of Wood Fast Pyrolysis*. Di Blasi C. *AIChE Journal* 48:2386-2397, (2002).
- [23] Parikh J, Channiwala SA and Ghosal GK. (2005). A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. *Fuel* 84:487-494.
- [24] *Correlation of physical and chemical properties of terrestrial biomass with conversion: symposium energy*. Jenkins B, Ebeling JM. *Symposium energy from biomass and waste IX IGT* p. 371. (1985).
- [25] *Relationships between lignin contents and heating values of biomass*. Demirbas A. *Energy Conversion & Management* 42:183-188, (2001).
- [26] A unified correlation for estimating HHV of solid liquid and gaseous fuels. Channiwala SA and Parikh PP. *Fuel* 81:1051-1063. (2002).
- [27] IDAE. Manual de uso BIONLINE. Herramienta WEB de cálculo de biomasa.
- [28] INEGA. Análisis de la viabilidad del mercado de biomasa en Galicia y norte de Portugal. 2012.
- [29] Revista CIS-Madera. Aprovechamiento de la Biomasa Forestal producida por la Cadena Monte-Industria. Parte III: Producción de elementos densificados.
- [30] FAEN. Guía de Mercado de la Biomasa Térmica para Edificios en Asturias (2008).
- [31] IDAE. Biomasa Edificios. 2007.
- [32] Comunidad de Madrid. Guía Práctica: *Sistemas Automáticos de Calefacción con Biomasa en Edificios y Viviendas*.

Márgenes y adaptaciones. Factores variables para la adecuación energética de los edificios

Limits and adaptations. Variable factors for energy adaptation in buildings

Margarita de Luxán García de Diego ^{a*}, Gloria Gómez Muñoz ^b

^a Dra. Arquitecto, Catedrática. Departamento de Ideación Gráfica Arquitectónica. Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Grupo de Investigación de Arquitectura, Urbanismo y Sostenibilidad GIAU+S, Universidad Politécnica de Madrid

^b Dra. Arquitecto, Especialista en Arquitectura Bioclimática y Rehabilitación Energética, CC60

Resumen

La adecuación energética de los edificios debería realizarse considerando análisis y soluciones que tengan en cuenta la modificación en el tiempo de algunos factores de carácter variable que son fundamentales en la evaluación ambiental a largo plazo de cualquier intervención de y sobre la edificación. Esta perspectiva se adecúa a los modelos de comprensión de la Naturaleza que la definen en continua evolución. En el capítulo se describen algunas de estos factores variables y se reflexiona sobre los límites y márgenes que deberían considerarse para la adecuación energética de los edificios.

Palabras clave: Eficiencia Energética, Confort, Calificaciones energéticas, Tiempo

Abstract

The building energy adjustment should be made considering an analysis taking into account the change in time of some variable factors that are critical character in the long-term environmental assessment of any work on the buildings. This perspective fits with compression models of Nature that define in continuous evolving. The chapter describes some of these variable factors and reflects on the limits and margins that should be considered for building energy adequacy.

Keywords: Energy Performance, Comfort, Energetic adequacy, Time

1. Introducción

Actualmente, para medir, desde el punto de vista de la sostenibilidad y adecuación medioambiental, las soluciones arquitectónicas y la eficiencia energética de los sistemas e instalaciones, hay numerosos programas informáticos, certificaciones energéticas y sellos evaluadores, que buscan cuantificar los resultados y los plazos de las amortizaciones.

Estas herramientas de análisis, se apoyan, habitualmente, en el uso de datos y circunstancias, como si estos fueran fijos e inamovibles.

Pero la realidad es variable y evoluciona en el tiempo, y hay que tener en cuenta estas circunstancias si se intentan

prever las consecuencias de las elecciones y diseños escogidas en el proceso de creación y uso de la arquitectura.

Hay que tener en cuenta que las soluciones se realizan para una realidad en cambio y evolución de:

- las condiciones climáticas y medioambientales.
- los precios y tipos de energías.
- la composición de los mercados energéticos
- las condiciones derivadas de políticas
- los usos sociales.
- los sistemas constructivos y de fabricación de materiales.
- las sinergias entre diferentes tecnologías.

* mrgluxan@telefonica.net; glogomu@cc60.com

Citar como: Luxán_García de Diego, M. Gómez Muñoz, G. (2019). Eficiencia energética de edificios. En R. Hernández_Minguillón, O. Irulegi, M. Aranjuelo_Fernández-Miranda (Eds.), *Arquitectura Ecoeficiente* (Tomo II, pp. 52 – 64). San Sebastián, España. Servicio Editorial de la UPV/EHU

- y los conocimientos y sus límites en cada circunstancia temporal.

Todo ello nos lleva a comprender la edificación como un proceso dilatado a lo largo del tiempo y que necesita continuas adaptaciones a las modificaciones que se producen en la realidad.

El tiempo y los efectos y circunstancias que va creando en su devenir es, por tanto, una variable fundamental para evaluar la eficiencia energética de cualquier proceso, incluidos los que producen y mantienen los edificios cuya vida útil suele estar por encima de los 50 años.

2. Modelos de comprensión de la naturaleza en sus relaciones ecológicas.

Los modelos de comprensión de la naturaleza han ido cambiando y evolucionando a lo largo de el siglo XX y XXI.

En estos modos de entendimiento sucesivos, los modelos tienden a ir reconociendo un aumento de la complejidad y de la dificultad, sino imposibilidad, de un uso prospectivo directo, que hoy nos permita valorar y dimensionar absolutamente el efecto futuro de todas las acciones que se pueden realizar.

Según Holling [1], los modelos han ido siendo los siguientes:

Naturaleza equilibrada: modelo mecanicista, los sistemas naturales presentaban la tendencia de evolucionar hacia un equilibrio estable. Una imagen de poblaciones autorreguladas en equilibrio con ellas mismas y el entorno, cuyo poder de ordenación proporcionó las directrices para amplias políticas de aprovechamiento de recursos. (Sin embargo no todo era predecible con estos modelos)

Naturaleza anárquica: los organismos son extremadamente diversos y no mantienen un equilibrio mutuo autorregulado, sino que las presiones del exterior del ecosistema pueden producir extensas fluctuaciones en las relaciones entre organismos. Teoría del caos. (Pero no todo era desordenado ni impredecible)

Naturaleza resistente: un ecosistema es resistente si las relaciones entre sus organismos persisten aun cuando se enfrenten a choques agudos con el exterior. Se entiende que los ecosistemas complejos constan de muchos subsistemas íntimamente entrelazados y envueltos en otros.

(Pero aunque amortigua el conocimiento imperfecto, la resistencia de los sistemas naturales no es ilimitada)

Naturaleza en evolución: modelo que no niega la idea de resistencia pero sugiere que hemos entrado en una nueva era, marcada por la evolución mutua de la naturaleza y la humanidad. No podemos decir cómo evolucionará. No sólo es incompleta la ciencia, sino que el mismo sistema está en movimiento.

Como ejemplo, ya a finales del siglo XX, los cambios por movimientos y alteración de materiales en la corteza terrestre debidos a actividades humanas se cuantificaban en un 40% del total, casi igualando los debidos a erosión, arrastres en cuencas fluviales, terremotos, vulcanismo, etc.

Habitualmente, la atención a la habitabilidad de la tierra se relacionaba con el cambio climático, con las variaciones en temperaturas y otros fenómenos atmosféricos derivados del aumento del CO₂; hoy el panorama se amplía y se observan otros extremos.

Se sigue atendiendo al cambio climático, pero hay otros procesos que afectan a la sostenibilidad de la vida humana y que en algunos casos exceden con mucho unos márgenes de seguridad, si alcanzan límites peligrosos. Los límites, según lo últimamente desarrollado por Jonathan Foley [2], serían los siguientes:

- Pérdida de biodiversidad
- Ciclos del nitrógeno y fósforo
- Aerosoles atmosféricos
- Contaminación química
- Cambio climático
- Uso del suelo
- Acidificación oceánica
- Consumo de agua dulce
- Destrucción del ozono estratosférico

De estos nueve límites, según Foley, se han superado tres:

- Pérdida de biodiversidad: medida por tasa de extinción de especies por millón y año, propuesto en un límite de equilibrio de 10, cuyo valor actual supera a las 100
- Ciclo de nitrógeno: medido por la extracción antrópica de la atmósfera en millones de toneladas al año, propuesto en un límite de equilibrio de 39, con valor actual de 133
- Cambio climático: medido en concentración de CO₂ en partes por millón, propuesto en un límite de equilibrio de 350, y cuyo valor actual es de 387.

Los nueve límites que se indican anteriormente, todos ellos, tienen relación con las actividades edificatorias y constructivas, y desde ellas son mejorables.



Fig. 1. Incidencia en el paisaje. Mina de mármol en Macael, Almería.
Fuente: Fotografía. M. de Luxán 2008.

A la vista de los indicadores y los límites, desde la arquitectura y el urbanismo, sería necesario insistir e innovar en:

- Frenar la deforestación y la ocupación del suelo
 - Minimizar la ocupación del suelo por: minas, canteras y explotaciones para la obtención de materiales, nueva urbanización, y vertidos derivados de derribos.
 - Limitar el crecimiento urbano.
 - Primar la rehabilitación con criterios de sostenibilidad de barrios y edificios existentes.
 - Conseguir una movilidad más adecuada.
 - Diseñar la ciudad para aminorar los desplazamientos en vehículos contaminantes
 - Diseñar para utilizar vehículos híbridos
 - Procesar mejor las basuras y los residuos.
 - Usar energías y combustibles de bajo contenido en carbono.
 - Mejorar el comportamiento de consumo energético de los edificios existentes y nuevos.
- Implantar diseños adaptados al aprovechamiento pasivo y bioclimático de las condiciones climáticas existentes y previsibles.
 - Implantar sistemas de climatización de eficiencia energética elevada.
 - Edificar con criterios de uso de los espacios por los habitantes, no por criterios de ganancias de los constructores.
 - Instalar sistemas de reutilización de aguas grises en edificios.
 - Instalar griferías y sistemas de bajo consumo en edificación y riego.
 - Mejorar los procesos refabricación de elementos constructivos eliminando componentes y residuos contaminantes.
 - Aumentar la revegetación en las ciudades.
 - Diseñar parques y jardines con criterios de adaptación a los tipos de suelo y las condiciones climáticas locales.
 - Utilizar sistemas de aprovechamiento de aguas depuradas para riego, limpieza y necesidades urbanas y edificatorias que lo permitan.
 - Usar materiales fríos en pavimentos y espacios públicos.
 - Mejorar la eficiencia del riego.
 - Instalar sistemas de poco consumo hídrico.
 - Diseñar los espacios públicos y la edificación con criterios de mantenimiento de la biodiversidad de vegetación y fauna.
 - Avanzar en el diseño de materiales a partir de la reutilización y del reciclaje.
 - Comprobar los efectos de nuevos materiales sobre la salud.
 - Mejorar los procesos de fabricación de materiales para la construcción evitando el uso de hidroclorofluorocarburos.
 - Comprobar los efectos de instalaciones para servicios urbanos, edificatorios y de la comunicación.

Con todas las acciones que puedan derivarse de éstas, esperemos conseguir una adecuación positiva.

Y en ese entorno natural, antes citado, el de *Naturaleza en Evolución* nos reconocemos ahora; nunca hemos estado en unas condiciones semejantes ya que las actividades antrópicas nunca han sido tan elevadas ni las alteraciones tan rápidas; por lo tanto no tenemos situaciones anteriores con las que cotejar o buscar semejanzas de los posibles resultados.

Considerando este modelo en continua adaptación, es necesario identificar las variables que debemos tener en cuenta para la adecuación de nuestras edificaciones a los cambios que se producen en nuestro contexto. De esta manera podremos identificar los obstáculos, las estrategias y las inseguridades que permiten una mayor visión sobre la eficiencia energética a largo plazo.

3. Variaciones que dependen de decisiones políticas y normativas

Durante estos años, del 2000 al actual 2013, la legislación y normativa española ha aprobado más de una decena de leyes y decretos a nivel estatal directamente dirigidas a la energía en la edificación, además de todas las normativas autonómicas derivadas; hay también otras muchas, que aparecen continuamente en el campo de la producción energética que le afectan indirectamente, pero con consecuencias importantes.

Sabemos que las exigencias que aparecen en ellas cambian, y que cambiarán aún más hasta el 2020.

Si tenemos en cuenta que un edificio resultará más sostenible si es capaz de ser utilizado eficazmente más tiempo (amortizará más la energía contenida en la construcción y los materiales), a lo largo de su vida útil, supongamos de 50 años, le irán afectando entre 30 y 50 normativas directas sucesivas, con distintas exigencias, calificaciones y niveles en evaluaciones.

Aunque varias de estas normativas en su orientación general de ahorro y eficiencia energética, se derivan de mandatos de la Comunidad Europea, hay muchas disposiciones específicas que se determinan por intereses ideológicos, por “*mantenella y no enmendalla*”, y por presiones de las compañías y componentes de los mercados.

Parte de la valoración económica de los ahorros y del modo de medir la eficiencia energética de las soluciones, depende de las Normativas aplicables y de los intereses políticos, y sus cambios y variaciones son, demasiadas veces, vertiginosos.

Por ejemplo, durante las dos últimas semanas del mes de Julio del 2013, y al socaire de la Reforma Energética, el Ministerio de Industria, Energía y Turismo, hizo públicos 16 documentos con vocación normativa:

- 2 con rango de Ley
- 7 borradores de Reales Decretos
- 6 Órdenes Ministeriales
- 1 Propuesta de Resolución

Los expertos y personas o entidades interesadas, contaron con tan sólo con 10 días para hacer comentarios o alegaciones a 1.000 páginas cargadas de consecuencias y efectos colaterales.

Cada documento supone variaciones en los costes, ayudas, tecnologías más favorables, valores standard, plazos a aplicar para amortizaciones, etc., que hacen que los precios y modo de valorar los gastos energéticos de usuarios y consumidores industriales puedan resultar absolutamente diferentes.

Estas decisiones políticas implican también las distintas posibilidades de soluciones de autoconsumo y sostenibilidad, y pueden desprestigiar datos tan importantes como los intereses finales de los usuarios más comunes o la contaminación derivada de cada una de las tecnologías de producción de la energía.

Ante esta realidad cambiante y a veces ilógica, sólo cabe una mirada atenta, dirigida a la información continuada y crítica, y en una mirada a un plazo medio, apoyada en el sentido común y el conocimiento científico.

4. Variaciones en la composición del mercado energético.

En nuestra actual normativa de Calificación Energética, la evaluación final se mide en emisiones de dióxido de carbono, en KgCO₂/m².año, pero esa emisión es variable en el tiempo y evoluciona año a año, hora a hora, en función de las tecnologías y de la composición del mercado.

Cambia la cantidad de energía necesaria para la obtención y el transporte de combustibles, la eficiencia de los sistemas de bombeo de gas y petróleo.

En periodos cada vez más cortos, aparecen nuevos combustibles, nuevos medios de obtención o sistemas de producción más desarrollados.

Todas estas innovaciones hacen variar las emisiones finales de las energías gastadas en la edificación en:

- extracción de rocas, minerales y materiales de todo tipo.
- gastos energéticos y procedimientos para la fabricación de elementos constructivos.
- gastos energéticos y procedimientos para la fabricación de sistemas y equipos de instalaciones.
- transportes de materiales, elementos y equipos.
- puesta en obra, medios y maquinaria.
- gastos energéticos en climatización e iluminación y contaminación derivada-
- mantenimiento y uso, agua,
- tratamiento de residuos y vertidos.
- reutilización y procedimientos para cambios de uso.
- derribo y derivaciones del abandono de las edificaciones.

Tomando como ejemplo la energía eléctrica, según datos del Operador del Mercado Ibérico de la Electricidad (OMIE), y observando y comparando las gráficas correspondientes a los años 2000 y 2012, podemos ver que no sólo ha aumentado el consumo, sino que la composición por tecnologías es muy distinta. [3]

En el año 2000, las energías de Régimen Especial a Mercado, (que comprende las energías renovables menos la hidráulica), y por lo tanto de menor emisión de CO₂, tenían menos peso, la de centrales de carbón, más contaminantes, eran las predominantes.

En el 2012, las energías de Régimen Especial a Mercado (que como indicábamos anteriormente comprende las energías renovables menos la hidráulica) son las dominantes, la de centrales de carbón han disminuido, y han aparecido las derivadas de centrales de ciclo combinado que no tenían ningún peso en el año 2000.

ENERGÍA MENSUAL POR TECNOLOGÍAS. Sistema: Mibel

2000

2012

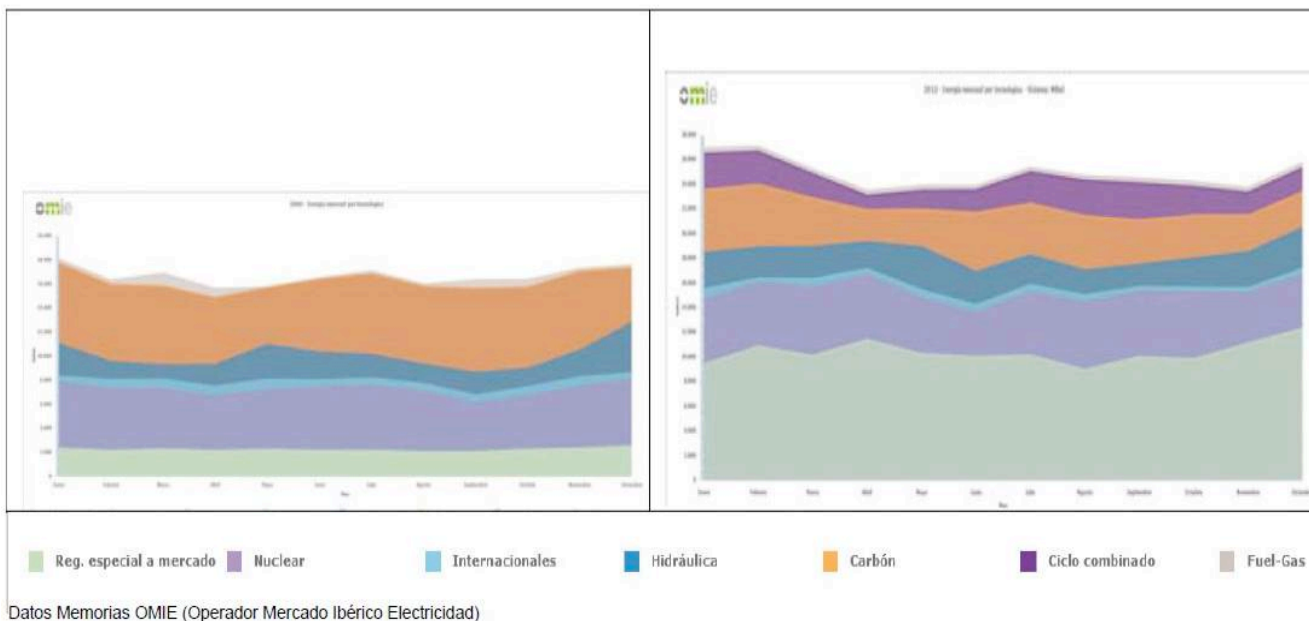


Fig. 2. Energía mensual por tecnologías, comparación de datos de los años 2000-2012. [3]

Es decir, la producción de electricidad se realizaba en el 2012 con menor emisión de CO₂ por KWh.

Estas variaciones son determinantes y de rápida fluctuación.

En el informe de OMIE, del mes de agosto del 2013 [4], se comprueba que las variaciones son apreciables en periodos temporales cortos, como en estos datos de julio y agosto del 2013.

Tabla 1
Composición del mercado energético en España, en julio y agosto de 2013 [4]

| | Mercado diario JULIO | | Mercado diario AGOSTO | |
|-----------------------------|----------------------|------------|-----------------------|------------|
| | GWh | % | GWh | % |
| Fuel-Gas | 291 | 1,3 | 239 | 1,4 |
| Carbón | 4.523 | 19,8 | 2.590 | 15,0 |
| Ciclo combinado | 1.771 | 7,7 | 1.484 | 8,6 |
| Nuclear | 5.158 | 22,5 | 4.220 | 24,4 |
| Hidráulica | 2.489 | 10,9 | 1.604 | 9,3 |
| Importaciones (FR+PT+AD+MA) | 572 | 2,5 | 688 | 4,0 |
| Régimen Especial Eólica | 2.890 | 12,6 | 2.823 | 16,3 |
| Régimen Especial Resto | 5.189 | 22,7 | 3.654 | 21,1 |
| TOTAL | 22.883 | 100 | 17.301 | 100 |

La complejidad de la composición del mercado eléctrico, está además influida por decisiones de máximos y mínimos de cada tecnología: uso de las renovables, condiciones climáticas, limitación del uso del carbón, relaciones con las exigencias de equilibrios con el riego en las cuencas hidráulicas, existencias y transporte de gas exterior, etc., etc.

El cálculo de emisiones derivado de los consumos en los edificios durante su uso a lo largo del tiempo es irreal si no se pueden tener en cuenta estas circunstancias variables, que por otra parte pueden cambiar por decisiones normativas y políticas que influyan en los costes de cada tecnología.

5. Variaciones por efecto rebote

También nos faltan datos sobre el “efecto rebote” derivado de la eficiencia energética comparada de envolventes e instalaciones en la edificación y en otros muchos campos que coincidirían y se superpondrían en estudios complejos.

Como indica Pedro Linares: “El ahorro mide las reducciones en términos absolutos, mientras que la eficiencia lo hace en términos relativos. Y el efecto rebote nos dice que estos dos conceptos no están necesariamente relacionados. Esto es muy importante, porque si bien desde el punto de vista del medio ambiente y del consumo de recursos lo que nos importa es el ahorro, las políticas para

conseguirlo generalmente van por la vía de la eficiencia.” [5]

En edificación, no todas las mejoras en los sistemas de eficiencia energética se convierten en ahorros reales.

Como estudió Jevons, bajadas en los precios de las energías pueden convertirse en un aumento de su consumo.

Para premiar el ahorro, entre dar incentivos para incorporar a lo edificios sistemas más eficientes o dejar que se eleven los costes de los combustibles, no hay una conclusión absolutamente clara, porque los términos con que se comparan no están suficientemente estudiados en su conjunto completo y temporal.

En la actual factura eléctrica de los edificios españoles, la decisión de subir el precio total, pero en distinta proporción en sus componentes, elevando más el término de potencia e IVA y de un modo más reducido el de consumo, minimiza la efectividad de las posibles acciones de ahorro en el modo de uso inmediato (sin mejoras pasivas ni en los sistemas) por parte de los usuarios.

En todo caso, lo que se puede afirmar es que si se quiere reducir el consumo energético, lo más seguro es reducir la demanda.

6. Variaciones en los precios de la energía

Tampoco resulta sencillo elaborar previsiones de amortización ya que los precios de la energía no crecen de modo uniforme ni en paralelo a la subida del resto de los bienes necesarios.

Mientras los precios, desde el 2000 al 2013 crecieron un 37,3%, la energía lo ha hecho en mucho mayor proporción.

Tomando como ejemplo la energía eléctrica, y de nuevo con datos de la OMIE, el alcanzado en las subastas del mercado energético en agosto del 2000 era de 29,91 euros MWh; en agosto del 2013 a sido de 48,09 euros MWh, es decir ha aumentado un 60,78% en la subasta del según datos del Operador del Mercado Ibérico de la Electricidad.

Como le llegan al usuario estos precios, es algo aún más distorsionado por decisiones políticas y económicas antes comentadas; como media, el precio de la electricidad a los usuarios les ha aumentado en un 60% en los últimos 5 años.

Es decir, el tiempo para la amortización monetaria es mucho más corto que el que se podía prever, ya que los retornos son mucho mayores de lo esperado. Y el precio de la energía no deja de aumentar.

AHORRO ENERGÉTICO Y EVOLUCIÓN DE PRECIOS ELECTRICIDAD 2002-2013.

El ahorro energético, con un consumo reducido a la mitad en una vivienda, no se refleja en la factura, que mantiene el mismo coste:

709 kWh cuestan 88,86 euros en 2002; 362 kWh cuestan 88,97 euros en 2013

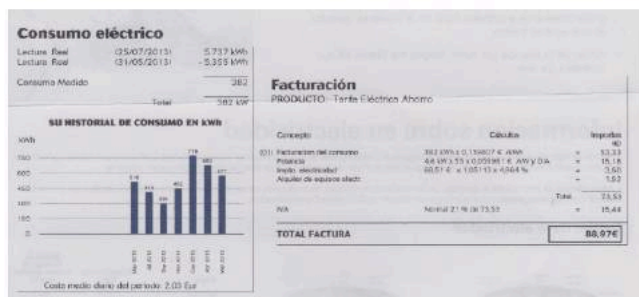
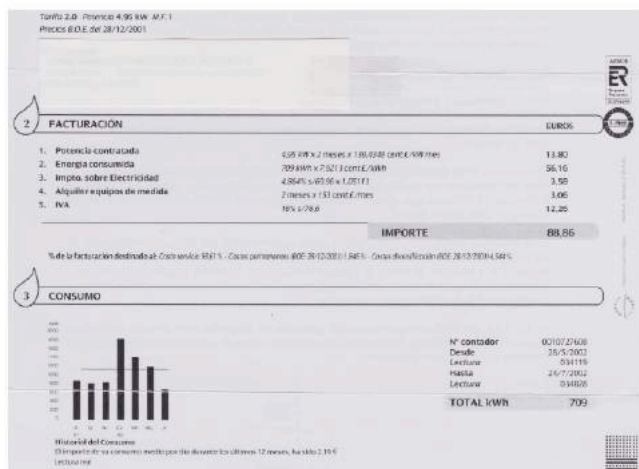


Fig. 3. El aumento del precio de la energía hace desaparecer el ahorro energético desde un punto de vista monetario.

Fuente: M. de Luxán



Fig. 4. Termografía de superficies urbanas en el centro de Atenas.
La zona de solado alcanza los 52°C
Fuente: Mateo Santamouris, Congreso CIBARQ 08, 2008.

PROYECCIONES DEL CAMBIO CLIMÁTICO SRES-A2

Modelo: Had CM3

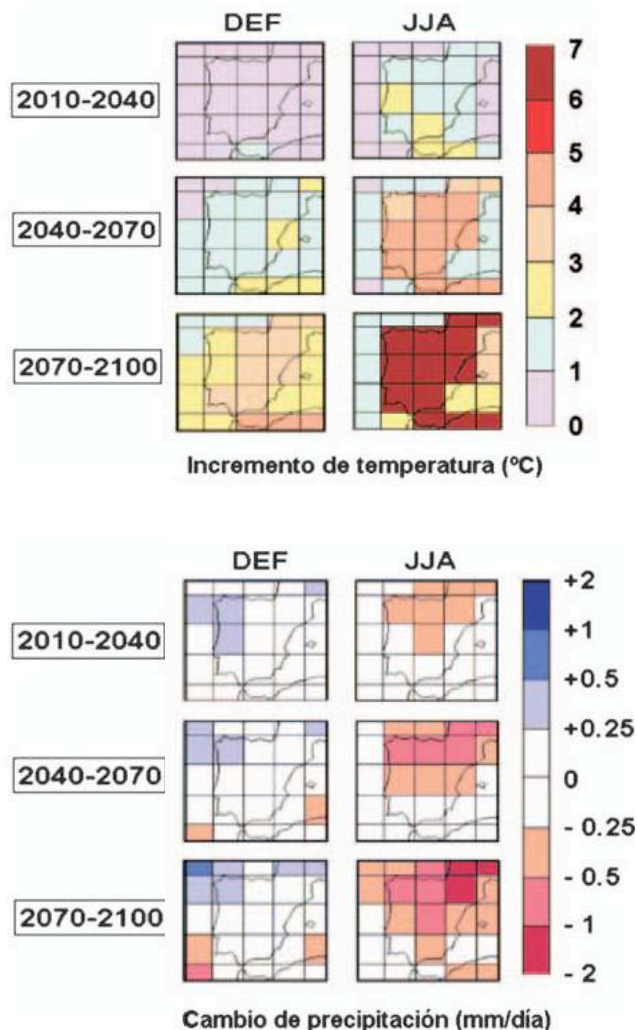


Fig. 5. Proyecciones de cambio climático AEMET [6]

7. Variaciones en el clima

Normalmente, para analizar el comportamiento térmico de un edificio o su certificación energética se usan unos datos de un escenario climático donde las condiciones de partida son las pertenecientes a un periodo previo pasado, derivado de la fecha de aparición del CTE-DB-HE1, basados en diez años de recogida de datos y, por lo tanto, los más actualizados de aquellos corresponderían al periodo de 1995-2005 y cuyas medias serían las aproximadamente las características del año 2000.

No obstante, tanto un edificio de nueva planta como una rehabilitación, se proponen para años venideros por lo que dicho escenario es obsoleto habiendo, por lo tanto, de adoptar también otros que correspondieran a situaciones actuales, y futuras. A tal respecto, la Agencia Estatal de Meteorología [6] [7], ya planteaba los posibles escenarios.

Posteriormente AEMET [6] ha planteado una serie de escenarios regionalizados que serán los que previsiblemente hay que tener en cuenta y en los que haya que gestionar los proyectos que se propongan.

Como ejemplo, avanzamos a continuación, medidas sencillas que respondan a las necesidades de confort teniendo en cuenta un periodo de 15 años (hasta 2030 aproximadamente). Fijamos este periodo como mínimo y realista desde el punto de vista de posibles contratos de servicios energéticos y de vida de las instalaciones.

A partir de estos datos sobre los cambios previsibles en las condiciones climáticas, se pueden extraer las siguientes conclusiones de cara a la valoración de la eficacia de las actuaciones posibles.

Independientemente de las actuaciones sobre los edificios, se prevé una reducción de la demanda de energía para la calefacción en todas las localidades

Por el contrario, se incrementará la demanda de energía para refrigeración, que cada vez tendrá mayor peso e influencia para alcanzar las condiciones de confort.

Este cambio de configuración de las necesidades en la climatización de las viviendas, implica que las estrategias destinadas a impedir el calentamiento del espacio interior y de las envolventes en los meses de verano, principalmente las protecciones solares, adquirirán una mayor eficacia para reducir la demanda energética.

En distintos foros las Empresas de Servicios Energéticos (ESE) han expresado su interés en basar su relación con el usuario más en ofrecerle confort en lugar de energía, sin embargo las cuentas se realizan exclusivamente sobre el ahorro energético de las instalaciones que ya existen en el momento de ofrecer el servicio. La posibilidad de negocio de las ESE pueden diversificarse hacia este aspecto que no se tiene en cuenta en la actualidad pero que va a ser imprescindible en el futuro, y esto implica que estudien sistemas y servicios enfocados hacia la refrigeración.

La mejor adecuación se obtendría calculando las demandas y soluciones de calefacción con las condiciones climáticas actuales, y las de refrigeración con las condiciones futuras.

8. Variaciones en los modelos de confort [8]

Existen numerosos estudios sobre el bienestar térmico de los seres humanos así como métodos para determinar las necesidades de climatización en función de diversos modelos de confort higrotérmico. De forma general, éstos se pueden clasificar en dos categorías: cuantitativos y cualitativos [9]

Los modelos cuantitativos se basan en el planteamiento de que el confort higrotérmico del ser humano se produce cuando existe un equilibrio entre las ganancias y pérdidas térmicas con el entorno, y tiene en cuenta los procesos fisiológicos de regulación que dan respuesta a la radiación, la temperatura, la humedad relativa y el movimiento del aire.

Algunos autores señalan la disparidad de estos modelos con estudios experimentales sobre el confort de personas reales en ambientes concretos [10] [9]. Estas diferencias parecen ser realmente significativas en situaciones en las que los usuarios no están permanentemente en condiciones artificiales, esto es, con climatización continua y en las que se utilizan técnicas como la ventilación natural para el acondicionamiento.

Por otro lado, estos modelos cuantitativos y predictivos no tienen en cuenta la capacidad de los usuarios de acomodarse mediante el arropamiento o la propia tasa metabólica al cambio de las condiciones del ambiente.

Frente a éstos, se han desarrollado los llamados modelos cualitativos que no reducen el confort térmico a la resolución de una ecuación de intercambio de calor, sino que pretenden tener en cuenta otros factores del usuario,

físicos y psíquicos. Se basan en trabajos de campo y encuestas realizadas en diversas condiciones climáticas a partir del siguiente principio *“Si se producen cambios que provocan una situación de desconfort, las personas reaccionan de forma que restauran el confort perdido”* [10].

Estos autores señalan una serie de conclusiones en relación a los estudios realizados para la creación un modelo de confort adaptativo aplicable al diseño de edificios. Por un lado, los estudios de campo sugieren que los índices cuantitativos son difíciles de utilizar en las situaciones reales y son indicadores insuficientes sobre las condiciones de confort en los edificios. Por ello, los experimentos teóricos deberían ser contrastados con la realidad antes de incluirlos en los modelos de cálculo.

Según los estudios de campo de estos autores, existe una diferente respuesta en relación al confort entre los usuarios de edificios con climatización controlada con sistemas convencionales frente a usuarios de edificios acondicionados con sistemas pasivos que el usuario puede controlar.

Un modelo de confort adaptativo permitiría a los proyectistas estimar la temperatura en la que más probablemente los usuarios del edificio alcanzarán el confort, ampliándose la zona de confort permisible, y por tanto reduciendo la necesidad de utilizar sistemas activos de climatización.

El rango de temperaturas en que estiman es posible esta adaptación por parte del usuario se sitúa $\pm 2^{\circ}\text{C}$. Si además a los usuarios se les da la posibilidad de controlar las estrategias de climatización mediante la activación de sistemas de ventilación natural, captación y protección solar, este rango puede aumentar. Por el contrario, la sensación de desconfort aumenta si esto no se produce o el control es ineficaz, inapropiado o inutilizable.

El rango de variación de la temperatura interior de confort de estos modelos se puede caracterizar en función de la evolución de la temperatura exterior. Los primeros estudios indican que el cálculo con estos modelos no incrementan las situaciones de desconfort y suponen un ahorro importante en la energía de uso de los edificios.

El diseño pasivo de los edificios supone que los elementos de la envolvente térmica estén adaptados a las condiciones del clima, por lo que una intervención en las edificaciones en ese sentido, supone mejorar las condiciones para que se produzcan mejores condiciones de confort más flexibles. En el caso del uso residencial, esta diferenciación puede resultar sustancial en cuanto a que evite la instalación o uso de aparatos de climatización que puedan necesitar energía para su funcionamiento.

La utilización de este tipo de modelos para la definición de los condiciones de confort en la edificación supone una asociación directa entre las temperaturas exteriores y las interiores de la edificación. Los autores mencionados señalan que en los edificios climatizados las condiciones interiores no varían con el mismo ritmo que las exteriores debido a la intervención de los sistemas. Esta cuestión puede actuar en contra de la capacidad de adaptación de los

usuarios, ya que no se tiene en cuenta el tiempo y los periodos de cambio de una situación a otra.

En el caso de nuestras viviendas, esta situación suele darse, sobre todo en condiciones de verano, ya que la mayor parte de los alojamientos no cuentan con sistemas de refrigeración, aunque la tendencia es que este tipo de instalación cada vez es más habitual.

El estudio de las perspectivas de cambio del clima y su influencia en las necesidades energéticas de las viviendas se están comenzando a considerar.



Fig. 6. Adecuación volumétrica de bloque de viviendas, fachada captora a mediodía, soleada en invierno y sombreada en verano. Arq. M. de Luxán, F. de Celis, E. Echevarría, F. Da Casa. S. Pedro de Alcántara.
Fuente: Fotografías. M. de Luxán.

Existen algunos estudios sobre el futuro consumo energético de las viviendas considerando las modificaciones del clima [11]. Otras investigaciones en el Reino Unido inciden en que la necesidad de profundizar en los métodos de definición del confort desde el enfoque adaptativo y desarrollar de estrategias pasivas que permitan a los edificios condiciones de confort no sólo en la actualidad sino también en escenarios de futuro de más de 70 años [10].

En el caso del Reino Unido, las perspectivas de cambio climático indican un incremento de temperatura que puede implicar la utilización de sistemas de refrigeración que hasta este momento no han sido necesarios. En caso de prever sistemas pasivos para paliar estas condiciones, se produciría un aumento del consumo de energía en verano, aunque por otro lado, el consumo de energía en invierno se reduciría, tal y como muestra la Fig. 7.

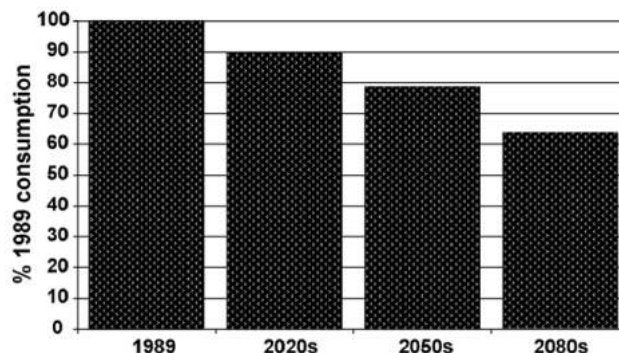


Fig. 7. Posible reducción de demanda de calefacción en base a un escenario medio alto de cambio climático en el Reino Unido, realizado según método de cálculo de los grados día en base 15. [10]

Los escenarios de cambio climático generales implican el incremento de temperaturas y puede resultar fundamental la definición de los límites de confort para el caso del sobrecalentamiento de la época estival. Los modelos de confort adaptativo presentan unos rangos mayores de confort que los modelos cuantitativos tradicionales. En ese sentido, los estudios de Holmes y Hacker [9] que se resumen en la Fig. 8 prevén la temperatura superior admisible de confort en función de estos escenarios de cambio climático.

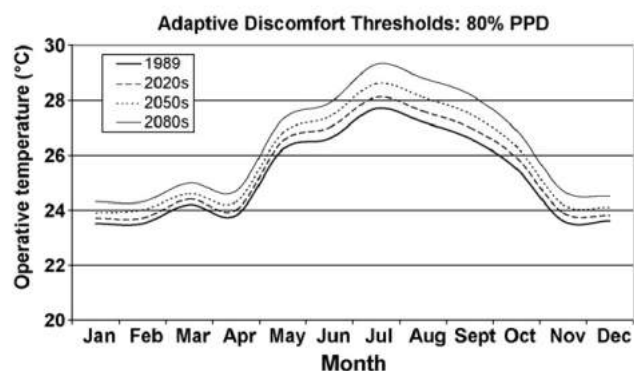


Fig. 8. Evolución del límite superior de temperatura operativa de confort según modelo adaptativo y escenarios de cambio climático para el Reino Unido. [9]

Por tanto, por su influencia de éste en el consumo de energía para el uso del alojamiento, el cambio climático es un factor a considerar en un método de análisis a largo plazo. De igual manera, los modelos de confort utilizados para determinar la demanda y el consumo energético tiene relevancia en la cuantificación de estos indicadores.

Sería necesario un estudio similar al realizado sobre el Reino Unido referido al territorio peninsular, ya que las condiciones insulares, sobre todo de humedad, inducirían una evolución diferente que las continentales, con una mayor diversidad geográfica y de relieve, y de latitud más baja.

9. Variaciones en el consumo energético de los edificios.

La evaluación de los consumos energéticos de los edificios a largo plazo hace necesario considerar las variaciones que se pueden producir en las condiciones ambientales como consecuencia de cambio climático. En ese sentido, debería contemplarse esta variable para la adecuación y diseño de los edificios, especialmente en las zonas que, debido a este cambio climático, empiezan a demandar energía para refrigeración que en las condiciones actuales no es necesario.

Si hiciéramos un análisis a largo plazo sobre el consumo energético de un edificio, aunque supusiéramos que la normativa sobre limitación de la demanda energética (CTE DB HE1 2006) se mantuviera en sus exigencias, el cambio climático haría variar las predicciones de consumo energético de futuro.

Supongamos que se propone rehabilitar energéticamente una serie de edificios (este análisis está realizado inicialmente a partir de casos reales) situados en diferentes zonas climáticas según el CTE. [11]

En origen, en el 2006,

- La zona C1 correspondería a poblaciones como Santander
- La zona D1 correspondería a una población como Pamplona
- La zona A3 correspondería a una zona cálida como Málaga

Para estimar las variaciones en el consumo energético a largo plazo, podemos tener en cuenta los escenarios de cambio climático que ha identificado la AEMET [5] [6] para definir en un horizonte de 15 años como se modificaría el contexto climático en el que está ubicado el edificio. Las zonas climáticas cambiarían de la siguiente manera

- La zona C1 pasaría a ser B3,
- La zona D1 pasaría a ser C2
- La zona A3 pasaría a ser A4

La Tabla 1, incluye los datos de tres edificios de vivienda ubicados en las zonas climáticas propuestas con los consumos actuales y ahorros previsibles según un escenario a 15 años que contemple los cambios en las condiciones climáticas de las localidades escogidas.

Una primera conclusión de estos datos es la variación de las estimaciones en los consumos en función no sólo de las actuaciones sobre el edificio, sino del cambio en las condiciones del clima.

En todas las áreas cambiaría la zona climática asignada por la normativa del 2006, y por tanto la demanda de energía para alcanzar el confort.

Independientemente de las actuaciones que se realicen en la envolvente disminuye el consumo de energía para calefacción en todos los casos.

Por el contrario, el consumo de energía para refrigeración en todos los edificios se incrementa, aunque es más significativo en los casos en los que no se prevea algún tipo de actuación, sobre todo la protección solar de huecos y la volumetría que facilitase el sombreado de las envolventes.

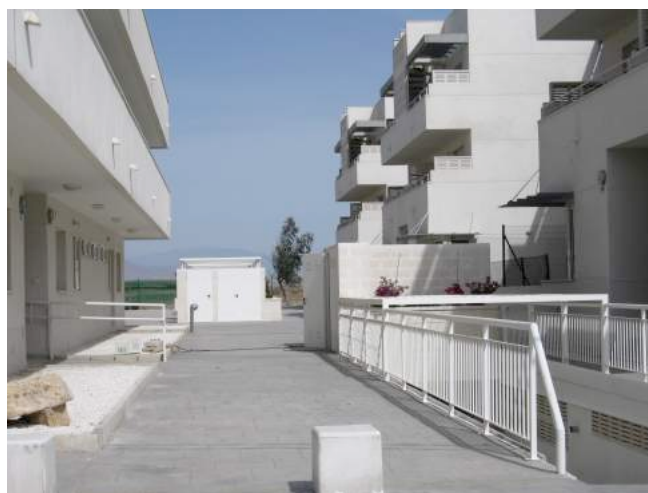


Fig. 9. Complejo residencial para los Juegos del Mediterráneo 2005 Almería. El diseño permite el sombreado de fachas opuestas.
Arq. M. de Luxán, R. Tendero, P. Nau
Fuente: Fotografía M. de Luxán 2007

Si no se interviene, es decir, si no se efectúan mejoras en la envolvente, este incremento del consumo de energía para refrigeración oscila entre 6 y 12 kWh/m².

Si se prevén protecciones solares, el consumo de energía para refrigeración se sitúa entre alrededor de los 7 kWh/m², es decir, la necesidad de refrigeración se disminuye a la mitad.

En el caso de no intervenir sobre los edificios, el cambio de las condiciones climáticas implicaría una reducción del consumo entre el 18% y el 40%.

Los mayores ahorros en calefacción se producen en la zona climática C1 (localidades costeras en la franja del Cantábrico como Santander) porque inicialmente todo el consumo energético en climatización corresponde a la calefacción y al producirse un incremento de temperaturas este consumo se reduce considerablemente y aunque es necesario en esta situación un consumo de energía para refrigeración, nunca es tan elevado como el que se reduce en la calefacción.

Sin embargo, es necesario que las intervenciones sobre los edificios existentes consideren medidas para reducir el consumo de refrigeración, ya que sería la única manera de mejorar la eficiencia energética de las edificaciones, especialmente aquellas situadas en zonas en las que en estos momentos la normativa no limita este consumo en el diseño del edificio.

Se puede suponer que, al cambiar las condiciones climáticas en 15 años, los ahorros previstos mediante la rehabilitación de los edificios existentes serán mayores en las edificaciones más antiguas, ya que están en peores condiciones de eficiencia energética.

Por tanto, los escenarios de cambio climático previsto pueden suponer en un plazo medio de tiempo una variación importante de los consumos asociados al uso de los edificios. Por ello, en la adecuación energética de los edificios que tienen una vida útil dilatada, es necesario tener en cuenta este factor de carácter variable para proponer soluciones que no sólo reduzcan el consumo energético en el momento actual, sino también en el futuro.

De otra manera, las estimaciones de ahorros energéticos previstas no se producirán por el cambio de las condiciones exteriores.

Podemos observar que los ahorros en demanda energética pueden ser muy superiores a los previstos si éstos se han realizado sin tener en cuenta las condiciones del cambio climático.

Otra cuestión a considerar en relación a los aspectos energéticos asociados a las edificaciones, es la consideración de toda la vida útil de éstas.

Si bien, el cambio climático puede tener un impacto importante a largo plazo, el resto de fases del proceso (fabricación, construcción y demolición) pueden adquirir

mayor o menor relevancia en función de tiempo en que el edificio esté en funcionamiento.

De esta manera, si la adecuación ambiental se realiza considerando una vida útil corta, el porcentaje del consumo energético anual asociado al uso decrece a favor del resto de fases, porque la energía invertida en la construcción del edificio no se ha amortizado aún.

Si se considera una vida útil dilatada, estos porcentajes cambian y, por tanto, la edad de las edificaciones es otro factor variable a considerar en la adecuación energética. Esto implica que las estrategias de intervención sean diferentes en función del horizonte que se maneje.

De esta manera se podría valorar si con unas condiciones definidas y para reducir, por ejemplo, el consumo energético global en una edificación determinada a lo largo de toda su vida útil, resultaría más adecuada una estrategia de rehabilitación, de sustitución por un soporte más eficiente o de demolición.

Estas conclusiones aplicadas al conjunto del parque edificado permitirían establecer políticas a largo plazo de intervención sobre las viviendas, y ampliando el conjunto de los indicadores evaluados, obtener información compleja que permita actuaciones integrales en las viviendas.

Tabla 1

Tendencias de consumo energético según zonas climáticas y rehabilitación energética prevista para adaptarla a exigencias del CTE HE1 2006

Situación actual

| Zona climática actual | Antes de intervención | | | Después de intervención | | | | % variación respecto a la situación actual |
|-----------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|---------------------------------------|--|--|------------------------------|--|
| | CAEFC (kWh/m ²) | CAEFR (kWh/m ²) | CAEFCR (kWh/m ²) | Variación CAEFC (kWh/m ²) | Variación CAEFCR (kWh/m ²) | Variación CAEFCR (kWh/m ²) | CAEFCR (kWh/m ²) | |
| C1 | 72,08 | 0 | 72,08 | -15,81 | 0 | -15,81 | 56,27 | -21,93% |
| D1 | 147,17 | 0 | 147,17 | -15,14 | 0 | -15,14 | 132,03 | -10,29% |
| A3 | 27,54 | 8,86 | 36,4 | -15,7 | -4,35 | -20,05 | 16,35 | -55,08% |

Previsión cambio climático en 15 años

| Zona climática 15 años | Antes de intervención | | | Después de intervención | | | | % variación respecto a la situación actual |
|------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|---------------------------------------|--|--|------------------------------|--|
| | CAEFC (kWh/m ²) | CAEFR (kWh/m ²) | CAEFCR (kWh/m ²) | Variación CAEFC (kWh/m ²) | Variación CAEFCR (kWh/m ²) | Variación CAEFCR (kWh/m ²) | CAEFCR (kWh/m ²) | |
| B3 | 30,90 | 12,68 | -39,54% | -3,33 | -6,10 | -9,43 | 34,15 | -52,62% |
| C2 | 88,62 | 11,61 | -31,90% | -24,24 | -5,13 | -29,37 | 70,86 | -51,85% |
| A4 | 17,87 | 11,97 | -18,01% | -9,42 | -5,64 | -15,06 | 14,78 | -59,39% |

CAEFC Consumo anual de energía final en calefacción

CAEFR Consumo anual de energía final en refrigeración

CAEFCR Consumo anual de energía final en calefacción y refrigeración

10. Variaciones en la población

La adecuación energética de los edificios como conjunto requiere considerar también las variaciones que se producen en la población y en el uso que ésta hace del soporte construido, especialmente de las viviendas ya que constituyen el mayor porcentaje del uso en las ciudades.

Para la mejorar la eficiencia energética de los edificios sería necesario establecer métodos de intervención basados en la consideración del consumo de recursos asociado a su funcionamiento con otras variables relacionadas con la población como el número de viviendas, su tamaño o el número de hogares.

El análisis debería contemplar no sólo las condiciones actuales de estas variables, sino que al igual que los escenarios de cambio climático; la evolución de la población, la composición y estructura de los hogares son factores que evolucionan y que pueden implicar que la adaptación energética sea más o menos eficaz.

Además de la estructura y composición personal de las viviendas, un factor en el consumo energético son las posibilidades económicas de los usuarios, que determinan los medios que pueden dedicar a su confortabilidad.

En territorios con problemas prioritariamente de frío, se manejan los términos de *pobreza energética* para los usuarios que tienen que dedicar más del 10% de sus ganancias a la climatización, y *pobreza energética severa* para los que tienen que dedicar más del 20%.

Las condiciones actuales sociales, en nuestro territorio, relativamente cálido durante gran parte del año, llevan a muchos usuarios con bajos ingresos a renunciar al uso de sistemas de climatización. Como ejemplo, dentro del Proyecto LIFE New4Old, para un edificio de bloque de viviendas públicas de alquiler en Zaragoza, en una encuesta a los vecinos, el 44% de los usuarios de las viviendas afirman que no utilizan calefacción porque no pueden pagarla.

Las estrategias pasivas son muy importantes cuando se interviene en viviendas sociales, especialmente en aquellas en régimen de alquiler social, donde viven inquilinos con ingresos muy limitados. En ese sentido, la intervención sobre la envolvente del edificio es más duradera y menos costosa en su mantenimiento y gastos de consumo para el usuario que el cambio de las instalaciones de climatización en las viviendas y, por tanto, más adecuadas en situaciones como la descrita.

Escoger soluciones de arquitectura y sistemas de climatización sin tener en cuenta estas circunstancias sociales, no lleva más que a decisiones inútiles o no aprovechables por sus vecindarios.

De esta manera, la adecuación energética puede no sólo referirse a las condiciones de la envolvente térmica o la eficiencia de las instalaciones de climatización, sino que puede trabajarse en la priorización de soluciones pasivas o activas, y en otro tipo de medidas como la superficie y los tipos habitacionales, el número de viviendas o la densidad urbana que impliquen un uso más eficiente de los edificios.



Fig. 10. Ciclo de vida de materiales en la edificación, de la mina al vertedero

Fuente: Fotografías. M. de Luxán 2009

11. Conclusiones

A lo largo del capítulo se han descrito una serie de factores variables que determinan a largo plazo la adecuación energética de los edificios. La definición de escenarios de futuro ha permitido estimar márgenes y límites para alguno de estos indicadores.

Sin embargo es evidente que todos estos elementos variables y complejos hacen imposible cuantificar la eficiencia energética, costes dinerarios, periodos de amortización, o emisiones, derivados de la edificación y su uso en el tiempo con absoluta seguridad y exactitud; en todo caso podemos proponer estimaciones.

La consideración del tiempo en el análisis de la adecuación es una línea de investigación [8] que puede ayudar a mejorar la eficiencia de nuestras edificaciones a largo plazo, y por tanto, contribuir a reducir la insostenibilidad de nuestros sistemas urbanos.

En este sentido, resulta de enorme interés la reflexión del Premio Nobel Ilya Prigogine sobre que sólo “*podemos tener la certeza de que el carácter temporal y evolutivo de este mundo ocupará de ahora en adelante un lugar central*” en la descripción física de la compleja realidad que nos rodea” [12]; por tanto, cualquier actividad humana ligada a los procesos físicos y energéticos, como es el caso de la construcción y uso de los edificios, necesita contar con métodos que aborden esa complejidad y en los que el tiempo y la variación de diversos factores tienen un papel fundamental para definir la sostenibilidad de las actuaciones sobre los edificios.

La descripción de algunos de los factores variables relacionados con los edificios a lo largo de su periodo de uso, demuestra la necesidad de profundizar en la valoración de la adecuación energética de los edificios, incorporando indicadores que permitan caracterizar la complejidad del proceso a lo largo del tiempo y estimando su evolución, para determinar la actuación más adecuada en cada momento.

Listado de acrónimos y abreviaciones

AEMET: Agencia Española de Meteorología
CAEFC: Consumo anual de energía final en calefacción
CAEFR: Consumo anual de energía final en refrigeración
CAEFCR: Consumo anual de energía final en calefacción y refrigeración
CTE: Código Técnico de la Edificación
ESE: Empresas de Servicios Energéticos

Referencias

- [1] C. S. Holling (1994) "Investing in Natural Capital: The Ecological Economics Approach to Sustainability"
- [2] Jonathan Foley (2010) "Límites de un planeta sano" Rev. Investigación y Ciencia, junio 2010, Págs. 46-49.
- [3] Memorias OMIE. Disponible en <http://www.omel.es>
- [4] http://www.omel.es/files/informe_mensual_agosto_2013_pag_11.pdf
- [5] Linares, Pedro "El efecto rebote de la eficiencia energética" Energía, consumo, Pedro Linares, medio ambiente
- [6] AEMET (2009) "Generación de escenarios regionalizados de cambio climático en España"
- [7] AEMET (2011) "Informe de escenarios climáticos regionalizados" www.aemet.es/documentos/es/.../escenarios/Informe_Escenarios.pdf
- [8] Gómez Muñoz, G. (2013) Método de análisis diacrónico para la intervención en el alojamiento con criterios ecológicos. El caso de Madrid 1940-2100 Tesis doctoral en desarrollo. Dirección Javier Neila y Margarita de Luxán. ETSAM. UPM
- [9] Gómez Azpeitia, G., Bojórquez Morales, G., & Ruiz Torres, R. (2007). El confort térmico: dos enfoques teóricos enfrentados. Palapa, 2(001), 44-57
- [10] Nicol, J., & Humphreys, M. (2002). Adaptive thermal comfort and sustainable thermal comfort. Energy and Buildings (34), 563-572.
- [11] M. de Luxán, G. Gómez, M. Barbero, E. Román (2011) "Estudio UPGRADE Confort" para Energylab. Sin publicar www.masterconstruccionsostenible.org/descarga.html
- [12] Prigogine, Ilya (1995) ¿Qué es lo que no sabemos? A parte Rei. Revista de Filosofía. Nº10.

Climatización por superficies radiantes mediante tramas capilares

Radiant heating and cooling systems with capillary tubing

Víctor Echarri Iribarren ^{a*}, Ramón Sánchez Ribechini ^b

^a Dr. Arquitecto, Profesor Titular, Tecnología y Sostenibilidad en Arquitectura, Universidad de Alicante, ^b Ingeniero Industrial. Dynamobel Clima.

Resumen

Los sistemas de climatización por superficies radiantes mediante agua que circula por tubos capilares proporcionan un alto nivel de confort en el usuario y un importante ahorro energético. Frente a los sistemas de distribución energética mediante aire acondicionado, producen una reducción de hasta seis veces en el consumo de energía de transporte, un mayor confort al no necesitar impulsar aire a velocidades no deseadas, un bajo nivel sonoro, y una reducción de las cargas térmicas al permitir una temperatura media del aire interior con menor salto térmico respecto de la temperatura exterior. La distribución energética del sistema mediante agua a temperaturas más moderadas permite el uso de energía solar y geotérmica, con un mejor rendimiento de los equipos de producción, e importantes ahorros energéticos. Por todo ello son sistemas respetuosos con la salud y el medioambiente. Se muestran algunos ejemplos de aplicación con análisis comparativo de consumos energéticos frente a sistemas convencionales.

Palabras clave: Eficiencia Energética, climatización saludable, respeto medioambiental, calidad del aire interior, nivel sonoro, energías alternativas

Abstract

Radiant heating and cooling systems operated by water circulating through capillary tubing provide high comfort levels and significant energy savings for the user. Compared with energy-distribution systems based on conventional air conditioning units, radiant systems reduce the consumption of transformation energy by up to six times. Furthermore, since air is not propelled at unnecessary speeds, this type of system provides greater comfort and lower noise levels. It also reduces thermal loads as the difference between indoor and outdoor temperatures is less significant. By distributing energy through water at more moderate temperatures, solar and geothermal energy can be used, resulting in improved equipment performance and significant energy savings. As a result, these are healthy and eco-friendly systems. This paper describes several possible applications of such systems, comparing their energy consumption with conventional systems.

Keywords: energy efficiency, healthy climate control, eco-friendly, interior air quality, sound level, alternative energies

1. Introducción

Desde antaño el uso del calentamiento de masas de materiales de la edificación para conseguir el confort térmico supuso una alternativa a la aplicación de sistemas de calefacción convencionales. Sin embargo, el uso de materiales de cerramiento, suelos o techos más fríos, con el fin de ofrecer un buen acondicionamiento en periodo estival, es bastante reciente. El término empleado para estos sistemas es el de refrescamiento o –por la superior capacidad en frío de los sistemas capilares- refrigeración por superficies radiantes, dejando constancia de su radical

diferencia frente a los sistemas de aire acondicionado o de aire forzado. El intercambio energético de nuestro sistema se realiza en su mayor parte, entre el usuario y las superficies del local, por radiación, y en menor medida por convección entre éste y el aire circundante.

Como autores de este texto no podemos dejar de señalar desde un principio que tenemos una especial preferencia por los sistemas de climatización por superficies radiantes. Y además entendemos que tiene perfecto encaje en la publicación de este segundo tomo de Arquitectura Ecoeficiente por varias razones principales. La primera se debe al probado ahorro energético de estos sistemas cuando

* victor.echarri@ua.es

Citar como: Echarri Iribarren V., Sánchez Ribechini R. (2019). Climatización por superficies radiantes mediante tramas capilares. En R. Hernández, O. Irulegi, M. Aranjuelo (Eds.), *Arquitectura Ecoeficiente* (Tomo II, pp. 66 - 97). San Sebastián, España. Servicio Editorial de la UPV/EHU.

están bien proyectados, dimensionados, ejecutados y mantenidos. Frente a sistemas de aire tratado y forzado, se han llegado a obtener ahorros de hasta un 35 % en edificios de oficinas en Centro Europa utilizando techos fríos y calientes a base de tubos capilares por los que circula agua a baja velocidad.

En segundo lugar la calidad del ambiente interior se hace más saludable, con un nivel sonoro imperceptible por el ser humano, y una velocidad del aire en la zona de ocupación reducida a la provocada por corrientes de convección. Se evitan así molestias habituales ocasionadas por un exceso en la velocidad del aire recomendada cuando la geometría no permite su salvaguarda, o por otras razones, como una demanda excesiva de potencia, con aire a muy baja temperatura, o un mal diseño de la instalación en su red de aire de impulsión. También el acondicionamiento climático mediante estos sistemas redundará en una mayor calidad. La gráfica de gradiente de temperatura del aire interior desde el suelo hasta la altura de una persona se aproxima enormemente a la curva ideal desarrollada por algunos ensayos validados [1].

A estas importantes aportaciones del sistema se añade el hecho de que las temperaturas a las que se distribuye el agua son más moderadas respecto a sistemas de fan-coils, tanto por compresión como por máquina frigorífica de absorción, y a calefacción por radiadores de agua. Efectivamente, el hecho de disponer de una gran superficie de intercambio por radiación, que provoca además unas continuas corrientes de convección, permite distribuir agua a temperaturas más moderadas. De esta forma, se puede utilizar la energía solar en paneles térmicos para calefacción, la geotermia, el uso de agua de mar o de acuíferos cuando la edificación tenga estas fuentes próximas, o las recientes máquinas de absorción por cloruro de litio, que utilizan la energía solar en paneles térmicos para producir un salto térmico de enfriamiento del agua de distribución de 5 °C. Estos recientes sistemas, en los que se está realizando una esperanzadora investigación, junto con las torres de evaporación que enfrían el agua a través del aire exterior para climas más atenuados, permiten refrescar en verano locales a través de superficies radiantes con unos reducidos consumos energéticos y una alta calidad en el confort del usuario.

El lector comprobará en los próximos apartados cómo se cuenta ya con sistemas de tramas capilares de aplicación en suelos, techos o paredes con una contrastada garantía de confort en base a la transferencia de calor del cuerpo humano en su continuo metabolismo, que lo hacen el más excelente de todos los sistemas de climatización, al tiempo que supone un salto cualitativo en la búsqueda de la eficiencia energética y la sostenibilidad de los edificios.

2. Fundamentos físicos de la climatización por superficies radiantes

Para que un individuo se encuentre con sensación de bienestar en un local, es necesario determinar y analizar

cuidadosamente todos aquellos parámetros que lo determinan. Cabe destacar los siguientes:

- Temperatura seca del aire envolvente.
- Humedad relativa.
- Velocidad del aire envolvente.
- Temperatura superficial de cada uno de los paramentos que configuran el local, teniendo en cuenta que podrá ser variable en cada diferencial de superficie.
- Actividad física o intelectual del individuo.
- Características de la vestimenta.
- Calidad o pureza del aire envolvente.
- Temperatura del aire alrededor de la cabeza.
- Nivel sonoro.

El objetivo en nuestro caso es establecer aquellos que tienen una incidencia directa sobre el bienestar térmico, además de apuntar aquellos indirectos como la pureza del aire envolvente o el nivel sonoro. El individuo se ve sujeto a un metabolismo corporal, que guarda estrecha relación con el tipo de actividad al que antes nos referíamos. El cuerpo humano utiliza energía química para alimentar procesos en los que se genera trabajo y calor, y necesita al mismo tiempo mantener una temperatura corporal prácticamente constante entre 36,5 y 37 °C. Así es necesario disipar el excedente de calor generado para evitar riesgos para la salud, o incluso la muerte. Para ello es necesario el mantenimiento del balance energético según la expresión:

$$\sum q = q_{met} - q_{ev} \pm q_{ci} \pm q_{cvi} \pm q_{rdi} = 0 \quad [E. 1]$$

Donde:

- Σq es el balance de calor corporal;
- q_{met} es el calor debido a la actividad metabólica;
- q_{ev} es el calor cedido por evaporación (respiración y sudoración);
- q_{ci} es el calor cedido o adquirido por conducción;
- q_{cvi} es el calor cedido o adquirido por convección;
- q_{rdi} es el calor cedido o adquirido por radiación.

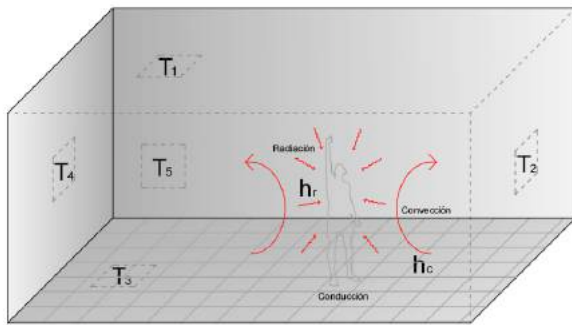


Fig. 1. Esquema de principio de instalación a dos tubos con subestaciones.

La determinación de las condiciones ideales de temperatura y humedad relativa que garanticen las actividades habituales de los individuos en espacios interiores es una tarea compleja, que ha motivado numerosas investigaciones [2]. La American Society of Heating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE) elaboró un interesante gráfico para aproximarnos a la cuestión, en el que se establece en las abscisas la temperatura de bulbo seco y en las ordenadas la temperatura de bulbo húmedo. Se representan las gráficas de humedad relativa, y la temperatura efectiva, es decir, la sensación debida a la combinación de temperatura seca y humedad relativa.

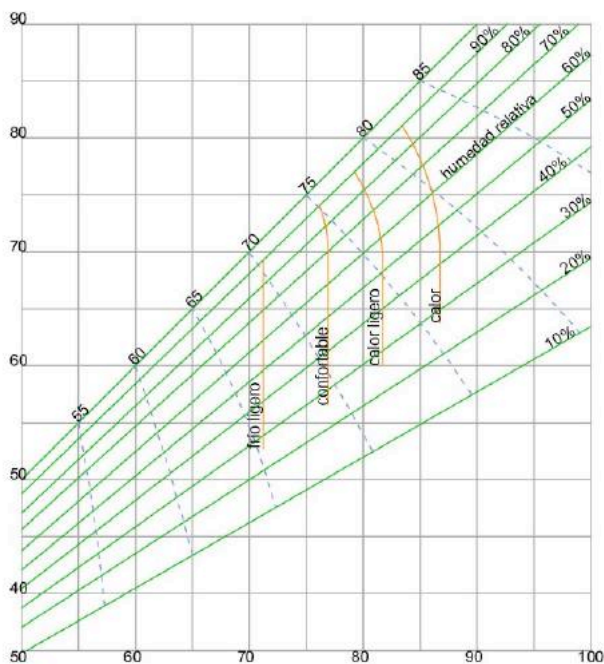


Fig. 2. Gráfico de condiciones de confort. ASHRAE.

Hay que tener en cuenta que la incidencia de la temperatura en la sensación de confort se manifiesta principalmente en la cesión de calor que experimenta el individuo por convección y radiación, ya que la cesión de calor por conducción es de magnitud inferior. Hablamos de cesión de calor, ya que el individuo se encuentra en los

espacios habitados a mayor temperatura que el aire el aire interior y las paredes que le envuelven. Las pérdidas de calor por convección se obtienen a través de la expresión:

$$q_{cvi} = h_c (T_p - T_a) \quad [E. 2]$$

Donde:

- q_{cvi} : flujo de calor por convección por m^2 de superficie corporal.
- h_c : coeficiente de termotransferencia.
- T_p : temperatura superficial de la pared.
- T_a : temperatura del aire del ambiente.

El factor h_c está directamente relacionado con la velocidad del aire, y la posición en que se encuentre el individuo. Cuando se encuentra sentado la expresión es:

$$h_c = 8,3 \cdot v^{0,6} \quad [E. 3]$$

Cuando se encuentra de pie:

$$h_c = 8,3 \cdot v^{0,24} \quad [E. 4]$$

Donde:

- h_c : Coeficiente de termotransferencia por convección.
- v : velocidad del aire que lo rodea.

Habitualmente dicho factor tiene un valor medio de $3,5 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$, con una velocidad del aire de $0,1 \text{ m/s}$, y $4,5 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$, con una velocidad del aire de $0,2 \text{ m/s}$.

Las pérdidas por radiación son más difíciles de obtener. Se basan en la ley de Stefan-Boltzman:

$$q_{rd} = \sigma \epsilon (T_1^4 - T_2^4) \quad [E. 5]$$

Donde:

- q_{rd} : flujo de calor intercambiado por radiación entre dos planos infinitos y paralelos.
- T_1 y T_2 : temperaturas absolutas (siempre en grados K) superficiales de los planos paralelos e infinitos 1 y 2.
- σ es la constante de Stefan-Boltzman de valor $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$
- ϵ es la emisividad de las superficies, obtenida a través de las emisividades ϵ_1 y ϵ_2 de cada una de ellas.

La radiación se produce en todas las direcciones del espacio. Al trabajar con planos finitos, en diversas posiciones respecto del individuo, la determinación de la

transferencia de calor por radiación se hace extremadamente compleja. De forma experimental, para espacios de dimensiones habituales, con superficie entre 20 y 30 m², y altura aproximada de 2.6 m a 3 m el factor forma de suelo a techo y de pared a suelo o techo están alrededor de 0,4 y 0,15 respectivamente.

Dado que los diversos paramentos del espacio que aloja al individuo estarán habitualmente a temperaturas diferentes, el individuo intercambiará calor por radiación de forma variable en cada dirección. El problema se simplifica estableciendo una temperatura radiante media, que tenga además en cuenta la incidencia del factor forma, según la expresión:

$$T_{rm} = \frac{T_s + 0,15 \cdot (T_{p1} + T_{p2} + T_{p3} + T_{p4}) + 0,4 \cdot T_t}{2} \quad [\text{E. 6}]$$

Donde:

- T_{rm} : temperatura media del entorno.
- T_s : temperatura superficial del suelo
- T_p : temperatura superficial de las paredes 1, 2, 3 y 4.
- T_t : temperatura superficial del techo

A través de la temperatura radiante media así obtenida y del valor de la temperatura de la piel y/o la ropa del individuo, de forma experimental se puede obtener el valor de la transferencia de calor por radiación, sabiendo que el coeficiente de pérdidas por radiación adopta valores aproximados de 4,7 W/m² °C con temperatura estimable del cuerpo humano de 30 °C.

$$q_{rdi} = h_r (T_r - T_{rm}) \quad [\text{E. 7}]$$

Donde:

- q_{rdi} : flujo de calor intercambiado por radiación entre el cuerpo humano y las superficies que lo rodean.
- h_r : coeficiente de pérdidas por radiación.
- T_r : temperatura radiante.
- T_{rm} : temperatura media del entorno.

Una vez determinados de forma experimental con suficiente aproximación los coeficientes de convección y de pérdidas por radiación, y obtener la temperatura operativa de confort T_o para el cuerpo humano, que podría definirse como “la temperatura uniforme de un recinto imaginario en el que el cuerpo intercambia el mismo calor seco (sin tener en cuenta las cargas latentes) por radiación y convección que en un mismo ambiente real” [3].

$$T_o = \frac{h_r T_{rm} + h_c T_a}{h_r + h_c} \quad [\text{E. 8}]$$

Donde:

- T_o : temperatura operativa de confort para el cuerpo humano.
- T_{rm} : temperatura radiante media.
- T_a : temperatura del aire del ambiente.

La interpretación de esta expresión resulta relevante para comprender la forma de trabajo de los sistemas de climatización por superficies radiantes. La sensación de confort del individuo en espacios cerrados, si consideramos a priori un control de la humedad relativa y la velocidad del aire en el marco que establece el RITE (entre un 40 y un 60 %, y 0,15 a 0,24 m/s respectivamente, según se trate de régimen de invierno o verano), depende tanto de la temperatura del aire que le envuelve como de la temperatura superficial de todos los paramentos que conforman el espacio. Y además en una proporción similar, o incluso un poco más relevante en lo que se refiere a la temperatura radiante media T_{rm} . Esto se traduce en que, en los sistemas de superficies radiantes, la variación de la temperatura superficial de alguno de los paramentos, permite obtener una sensación de confort óptima manteniendo una temperatura del aire superior en verano e inferior en invierno. Esta significativa diferencia respecto de los sistemas convectivos (radiadores) y soluciones de aire forzado repercute en una importante reducción de los picos de cargas térmicas, una mejora del confort con temperaturas moderadas, homogéneas, velocidad del aire imperceptible, y preserva la salud de las personas al no existir focos excesivamente fríos, nivel sonoro imperceptible, no existencia de polvo o bacterias en el aire ambiente al no mover aire el sistema, etc.

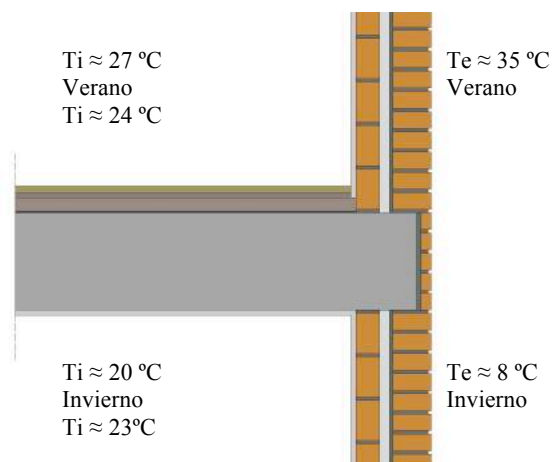


Fig. 3. Esquema de temperaturas exteriores e interiores en cerramientos con sistemas convencionales y superficies radiantes.

En efecto, las cargas térmicas por transmisión de calor a través de los cerramientos, según la ley de Fourier, se ven disminuidas de forma importante al disminuir el salto térmico de diferencia de temperaturas entre el aire interior y el exterior. En verano, el aire interior puede llegar a estar 3 °C más caliente que en los sistemas de aire forzado, con una disminución de estas cargas térmicas en torno a un 25% [4]. Algo similar sucede en invierno, al estar la temperatura más baja que en los sistemas convectivos y de aire forzado.

Al procurar un foco térmico de gran superficie en estos sistemas, en suelo, techo o pared, las temperaturas superficiales del foco emisor de calor o frío son más moderadas, consiguiendo la misma potencia de emisión que en los otros sistemas, y con similar temperatura operativa. Esta diferencia conlleva, como veremos, sustanciales ahorros energéticos, y permite el uso de energías alternativas, como la solar o la geotermia.

3. Sistemas hidrónicos de tubo capilar

Los sistemas de climatización por tubo capilar utilizan el agua como materia de transporte de energía. Las temperaturas de distribución del agua son moderadas: 15 a 17 °C en verano, 29 a 35 °C en invierno, aunque en última estancia dependen de las necesidades del local estudiado y de la superficie capilar instalada. Las unidades de producción energética, a través de un circuito primario, se conectan a un intercambiador de calor, habitualmente de tipo placas, y calientan o enfrían el agua del circuito secundario que transportará la energía hasta las superficies que se van a acondicionar mediante los tubos capilares. Para una mejor comprensión del sistema comenzaremos por describir las características físicas de las tramas de tubos capilares, su disposición constructiva en los paramentos de los espacios acondicionados, y sus ventajas frente a sistemas de tubo grueso.



Fig. 4. Entramados de tubos capilares.

Los tubos capilares se fabrican de polipropileno, de diámetro de 2 a 3 mm., y se disponen en entramados en los que los tubos están espaciados entre 10 y hasta 30 mm, dependiendo del modelo y del uso al que vayan destinados.

Contienen estos entramados un tubo colector de ida y otro de retorno, de diámetro aproximado de 20 mm. En la figura 4 se muestran las posibles formas de confeccionar la trama según la disposición de los tubos colectores. Las dimensiones de los entramados son variables, admitiéndose anchuras de 150 mm hasta 1.210 mm y longitudes de 600 mm hasta 6.000 mm.

La flexibilidad de estos entramados admite muy diversos sistemas de colocación. Pueden disponerse directamente sobre la superficie receptora, para posteriormente proyectar un enlucido de yeso o de cal (aplicaciones en techos y paredes). También pueden colocarse en placas de falso techo desmontable metálicos (bandejas prefabricadas climáticas). Otra posibilidad es disponerlos entre la perfilera secundaria necesaria para formar un techo continuo de placa de yeso seca, para posteriormente resolver el acabado con un trasdosado de cartón-yeso convencional. Esta misma ejecución se puede realizar en paredes de cartón-yeso. Por supuesto que las tramas capilares son aplicables a suelos para la creación de suelos radiantes mucho más efectivos y con menor altura de construcción que los convencionales de tubo grueso. Las soluciones son muy variadas, habiéndose incluso realizado paneles prefabricados de cerámica de gran formato para paredes y techos [5], que incluyen en su alma los entramados de tubo capilar de polipropileno.

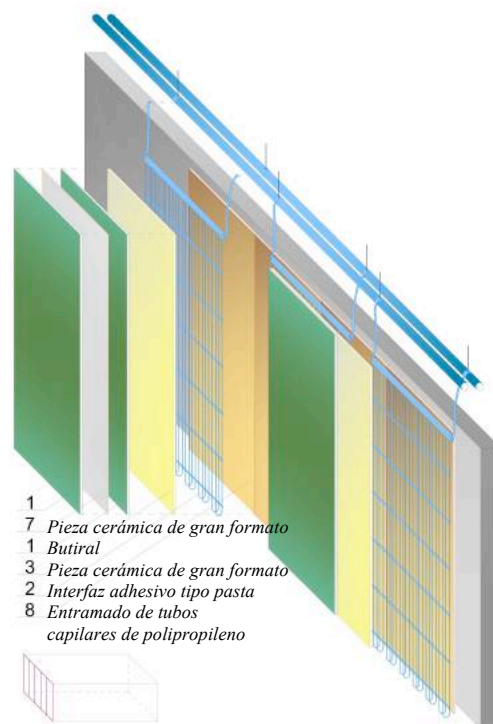


Fig. 5. Patente de nº solicitud P201001626. Panel de Acondicionamiento Térmico Cerámico. Echarrri V., et al. Solución en pared.

La alimentación de agua fría o caliente a los entramados de tubo capilar, aunque cada instalación se realiza a medida y puede adaptarse a las necesidades de cada proyecto, se puede realizar de tres formas principalmente:

- Distribución centralizada: en ella aglutinamos en una subestación hidráulica todos los elementos como intercambiador de placas, bomba de distribución hidráulica, vaso de expansión, válvula de seguridad, purgador, llenado, vaciado y también los colectores de impulsión y retorno. Desde esta subestación hidráulica partirán las tuberías de distribución hasta cada circuito de tramas capilares. Esta tubería será generalmente de diámetro 20 mm y tendremos dos tuberías –ida-retorno– por circuito.
- Distribución con colectores: es muy similar al caso anterior, la única diferencia es que los colectores se “descentralizan” de la subestación hidráulica de cara a tener un menor recorrido de tubería de diámetro 20 mm de cada circuito de tramas, hasta el punto de consumo.

- Distribución tipo bucle: la distribución tipo bucle elimina los colectores tanto de la subestación, como de un armario adicional. En este caso partimos desde la subestación con un bucle de distribución hidráulica del diámetro que corresponda al caudal transportado. Este bucle de distribución dejará a la entrada de cada estancia las tuberías de distribución de esa zona, ya en tubería de diámetro 20 mm. Será en este punto donde ubiquemos los elementos de control de zona y equilibrado y no en colectores como en los casos anteriores.

La distribución de un conjunto de circuitos, uno por cada estancia, facilita el equilibrado hidráulico de la instalación, a la vez que el mantenimiento. Los circuitos, tal y como se ha comentado, parten de un colector de ida, y retornan a un colector de retorno, salvo en los casos tipo bucle. A la salida del colector de ida, se dispone una válvula termostática, controlada por termostato ambiente en cada estancia. En el retorno se dispone una válvula de equilibrado o caudalímetro. Todos estos elementos, junto con el o los intercambiadores, depósito de expansión, etc., se disponen en subestaciones prefabricadas en planta, que garantizan una correcta y fiable instalación. En la Figura 7 se representa un esquema de principio tipo de la instalación, para un solo intercambiador, sistema denominado a dos tubos, con dos subestaciones, y fuente energética bomba de calor.

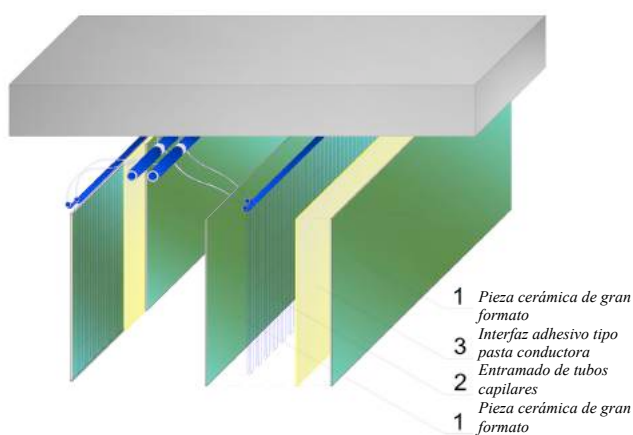


Fig. 6. Patente de nº solicitud P201001626. Panel de Acondicionamiento Térmico Cerámico. Echarri V., et al. Solución tipo baffle.

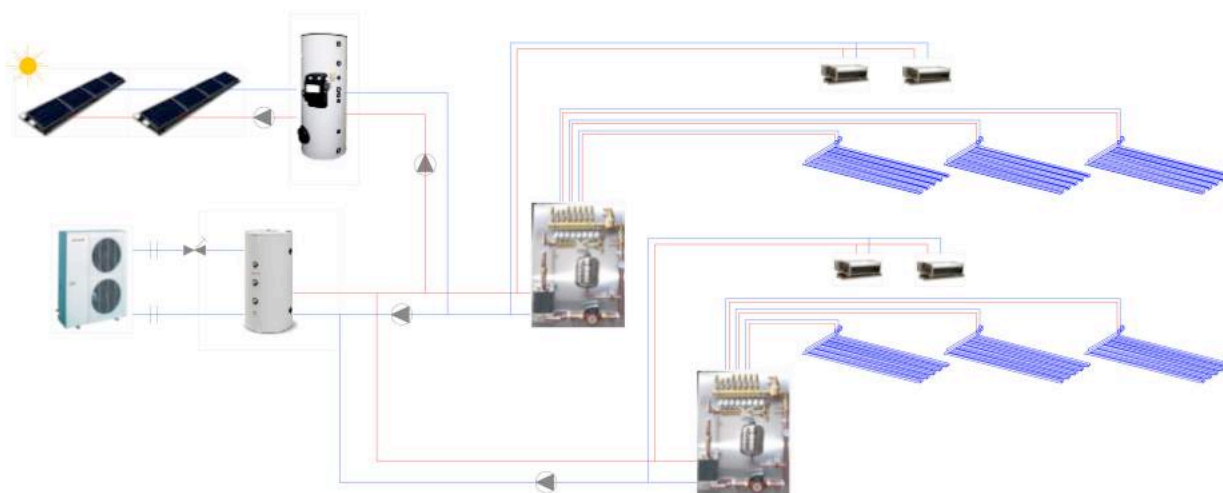


Fig. 7. Esquema de principio de instalación a dos tubos con subestaciones.

En el tercer caso descrito, la distribución tipo bucle obliga a disponer las válvulas termostáticas en las derivaciones a cada circuito de entramado, y las válvulas de equilibrado y caudalímetros en el retorno, antes de la acometida a la tubería de retorno principal. Dicho de otra

manera, estas válvulas están descentralizadas, y no pueden prefabricarse, sino que han de realizarse en obra. En la Figura 8 se presenta un esquema de principio tipo de esta instalación.

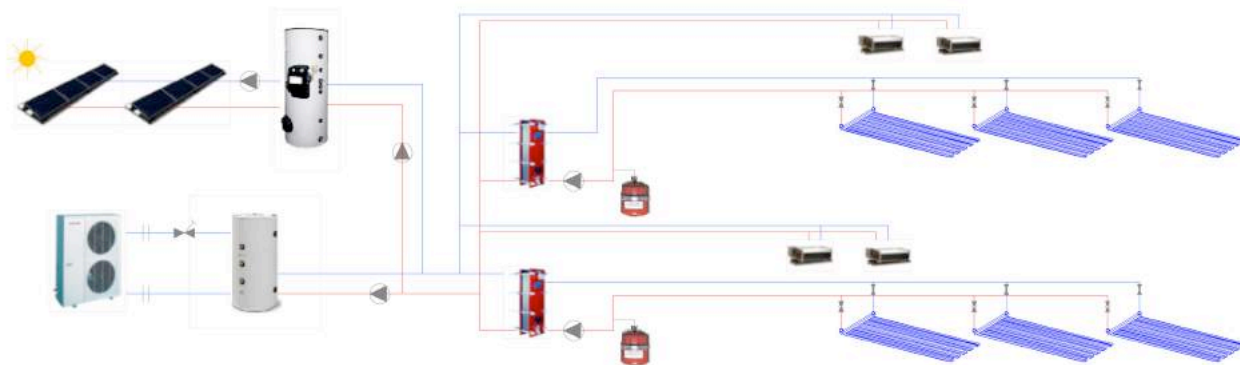


Fig. 8. Esquema de principio de instalación a dos tubos con sistema por bucle periférico.

En el caso de inversión térmica simultánea en los edificios en que se haya dispuesto esta climatización, se necesitaría a un mismo tiempo calefactar algunas dependencias, y refrescar otras. Una posibilidad sería realizar instalaciones independientes con diversas fuentes energéticas, pero en la mayoría de los casos esto no es viable, tanto por el coste de instalación, como por la imposibilidad de asegurar una adecuada zonificación que sirva para todos los periodos anuales. En los sistemas radiantes capilares como en otro tipo de instalaciones, es perfectamente posible ejecutar instalaciones a 2, 3 ó 4 tubos. Es decir, podemos contar con frío o calor en todas las zonas climatizadas (instalaciones a 2 tubos) o con frío y calor simultáneamente en cualquiera de las zonas climatizadas (instalaciones a 3 y 4 tubos).

Las instalaciones a 2 y 4 tubos son bien conocidas por la mayoría. Las instalaciones a 3 tubos es una variante intermedia, no muy extendida y que se utiliza en casos puntuales con una estacionalidad muy marcada y con simultaneidades reducidas. Es sencillo ejecutar cualquiera de estas opciones. En los casos centralizados y con colectores, las subestaciones son fabricadas para el diseño requerido y el resto de la instalación es similar a una de 2 tubos. En el caso de distribución tipo bucle, tendremos que realizar la distribución hidráulica de este bucle de acuerdo a las necesidades con distribuciones de agua caliente y fría y uno o dos retornos (según sea una instalación a 3 ó 4 tubos). Se requieren obviamente dos fuentes energéticas y dos circuitos primarios. Este esquema se describe en la Figura 9.

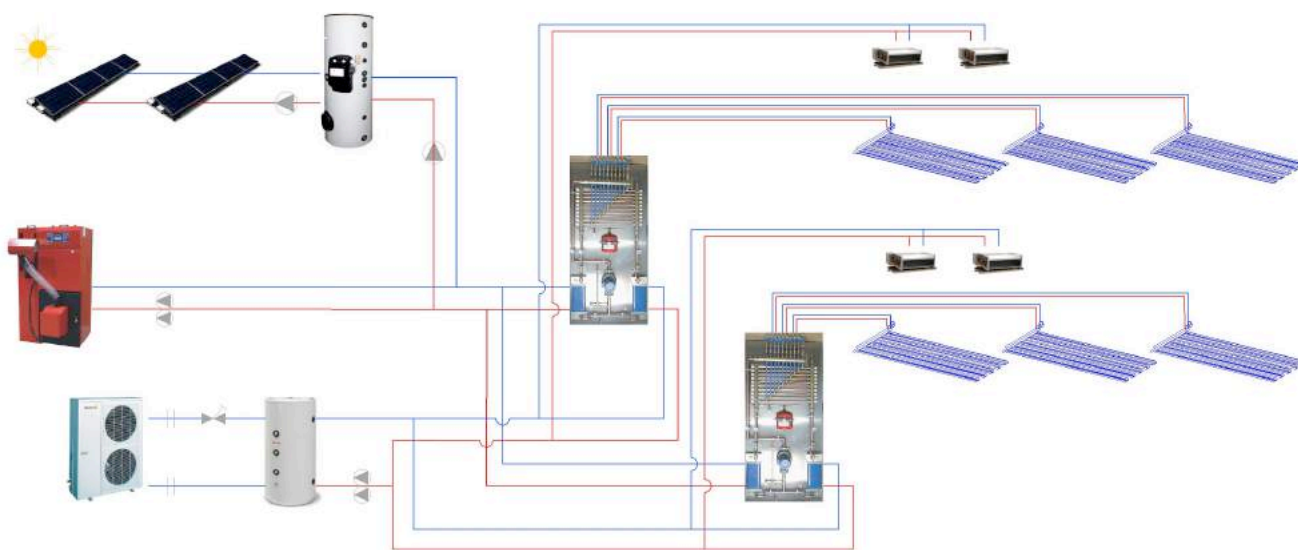


Fig. 9. Esquema de principio de instalación a tres tubos con subestaciones.

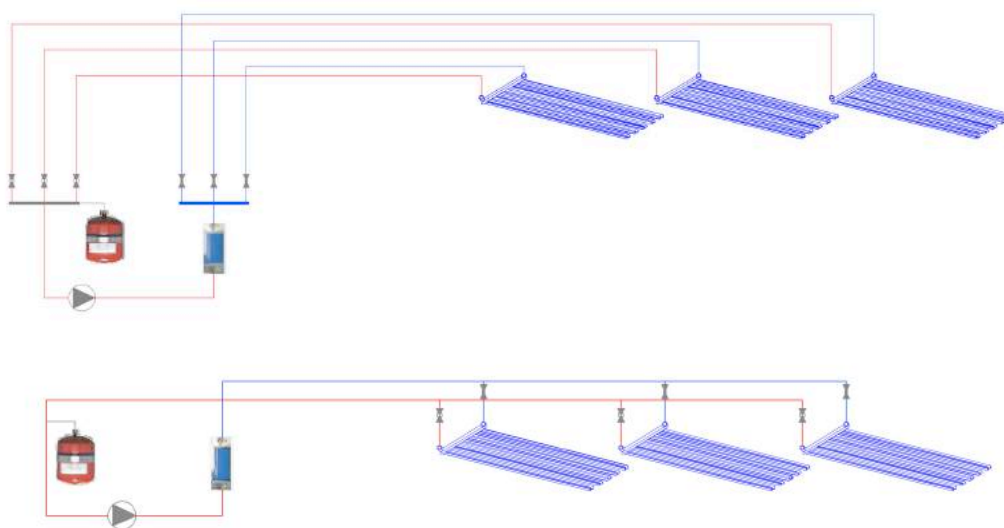


Fig. 10. Comparativa de sistemas a 2 tubos con válvulas centralizadas en subestación y sistemas por bucle periférico. Elementos y válvulas.

3.1. Regulación del sistema y control de humedad

Hasta ahora hemos considerado cómo funciona el sistema de climatización por superficies radiantes en lo que se refiere a las cargas térmicas sensibles. Ya se indicó que lo referente al control de la humedad relativa y cargas latentes, al tratarse de un sistema que no funciona por aire forzado, debía resolverse mediante otro sistema. Las cargas latentes producidas principalmente por las personas, el aire de renovación y el aire de infiltración requieren valorar los niveles de humedad relativa para estar dentro de los límites de diseño marcados por la normativa y para que en funcionamiento en modo refrigeración podamos tener un rendimiento adecuado del sistema radiante. Dependiendo del proyecto, la ocupación, el uso y la localidad puede ser necesario el tratamiento de la humedad relativa del aire interior. Hay que tener en cuenta que se debe mantener una calidad de aire interior óptima y dependiendo del uso y tipo de proyecto estos niveles vienen establecidos por el Código Técnico de la Edificación (CTE) [6] ó por el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE) [3]. Si, por ejemplo, estamos climatizando una vivienda y esta se encuentra en una localidad en la que la humedad relativa pueda suponer un incorrecto rendimiento del sistema radiante en verano (por ejemplo Barcelona), podríamos utilizar un pequeño deshumidificador colocado en falso techo del baño, para deshumidificar lo necesario el ambiente e incluso aportar algo de aire exterior en caso de que así lo busquemos. Otro caso podrían ser unas oficinas. Aquí aprovecharíamos el caudal de ventilación que nos marca RITE, para realizar el tratamiento de deshumidificación necesario para esos locales. Es preciso señalar que la función no es contrarrestar las cargas sensibles, sino las latentes, por lo que el caudal tratado es muy bajo, así como el nivel sonoro generado, la velocidad del aire interior y además a una temperatura neutra.

Como hemos comentado, el control de la humedad relativa, además de la incidencia que tiene en el confort del usuario, es un punto que debemos controlar con un sistema radiante en régimen de verano. Una excesiva baja temperatura superficial en cualquiera de los paramentos que aloja los tubos capilares podría llegar a producir condensaciones superficiales. En el caso de tener un sistema de deshumidificación, o en ambientes secos, con humedades relativas entre el 40 y el 60%, la temperatura de rocío se encuentra en torno a las 13-14 °C. Esta será el límite que normalmente usaremos para encontrar el rendimiento máximo en la potencia emisora del sistema.

En este sentido, las soluciones radiantes capilares que estamos tratando tienen dos sistemas para, por un lado maximizar el rendimiento y por otro anular cualquier posibilidad de condensación:

- Sistema de control: compuesto por una sonda combinada de temperatura y humedad, una sonda de inmersión y una centralita de control. El objetivo es impulsar el agua en modo verano siempre por encima de punto de rocío, eliminando cualquier riesgo de condensación y maximizando el rendimiento.
- Sistema de seguridad: consta de una sonda de rocío que, en caso de que pudiera llegar a fallar el sistema de control, elimina cualquier riesgo de condensación cortando la alimentación de agua al circuito.

Dado que dicho control de humedad es en la práctica complejo, y podría existir riesgo real de condensaciones superficiales, se dispone además en el sistema sondas de humedad que, en cuanto detectan la presencia de dichas humedades, cierran automáticamente las válvulas termostáticas, y por tanto la circulación del agua fría a través de los tubos capilares.

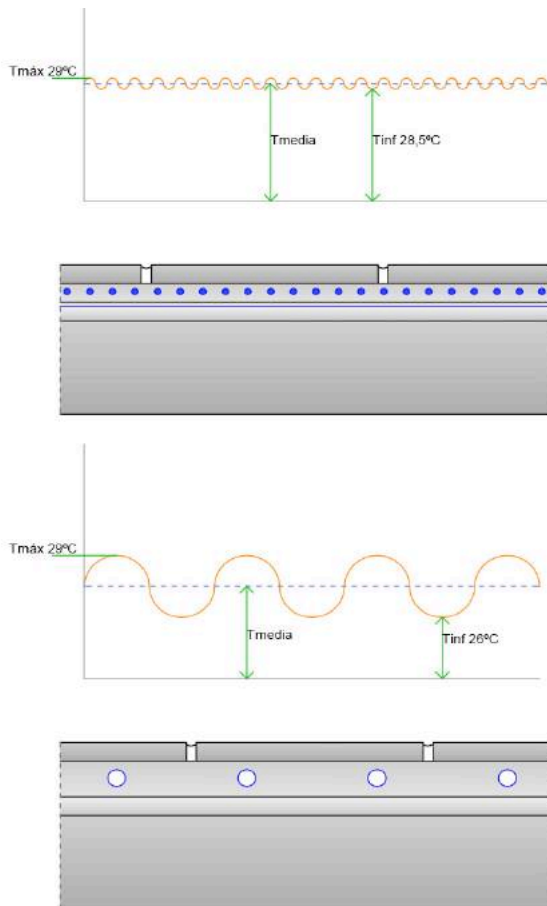


Fig. 11. Comparativa de gráficas de temperaturas para suelos en tubo capilar y tubo grueso.

Es preciso resaltar que esta limitación de la potencia emisora debido a la imposibilidad de descender por debajo de la temperatura de rocío es muy importante en el caso de las instalaciones de tubo grueso (en ellas normalmente se habla de refrescamiento y no refrigeración). En efecto, debido a la importante separación –o módulo- entre tubos, que suele estar entre 10 y 30 cm y el espesor de hormigón por encima de éstos, el gradiente de temperatura producido en algunas bandas de la superficie es inferior a la que se produce en el caso de los tubos capilares, ya que la separación entre tubos es escasamente de 1 o 1,5 cm y éstos están muy próximos a la superficie (véase Fig. 11).

3.2. Limitación de las pérdidas de carga

En los sistemas de refrescamiento o calefacción por tubo grueso, con diámetros exteriores de tuberías de polietileno reticulado de 16 mm. ó 20 mm., el efecto de las pérdidas de carga del agua en el recorrido a lo largo de los circuitos es crítico. Se imponen limitaciones a las longitudes máximas del tubo, que conllevan una limitación en la superficie máxima que un circuito puede acondicionar. Dicha pérdida de carga, al ser distinta en cada circuito, conlleva una tendencia al desequilibrio de caudales en la red.

En el caso de los tubos capilares, al trabajar con diámetros interiores de escasamente 2 ó 3 mm., el valor J

de pérdidas de carga por metro lineal es muy superior. A priori éste sería un grave inconveniente. Pero existe una diferencia notable: el recorrido que experimenta el agua es escasamente de pocos metros lineales, en función de la anchura de la trama, y de si los colectores de ida y retorno están en el mismo lado del entramado o enfrentados. Además, la velocidad de circulación es inferior a la de los sistemas de tubo grueso. En la práctica, la pérdida de carga es inferior en el caso del tubo capilar. Así puede observarse en la Tabla 1.

Tabla 1

Comparativa de pérdidas de carga entre sistemas de tubo grueso y tubo capilar

| | Tubos capilares | | Tubo grueso | |
|------------------------------------|-----------------|------|-------------|------|
| Diámetro de los tubos mm | 3,4 | | 20 | |
| Espacio entre tubos mm | 10 | | 150 | |
| Espesor de los tubos mm | 0,55 | | 2 | |
| Contenido de agua l/m ² | 0,39 | | 1,70 | |
| Longitud de trama m | 2 | 4 | 2 | 4 |
| Caudal de agua para $\Delta T=3$ | 40 | 80 | 40 | 80 |
| Pérdida de carga m.c.a | 0,2 | 0,55 | 0,03 | 0,12 |
| Velocidad del agua m/s | 0,27 | 0,53 | 0,06 | 0,13 |
| Número de Reynolds | 540 | 1080 | 910 | 1820 |

Nota: comparación realizada para una emisión de frío de 70 W/m² con un panel de 1 m de ancho y longitud de 2 ó 4 m.

Fuente: Manual Movinord Climatización. Climatización Tranquila. Tramas KaRo.

3.3. Purgado y posible obstrucción de los tubos

Por lo que respecta a la posibilidad de obstrucción por formación de sarro, o a los efectos negativos de presencia de aire en el interior de los circuitos cerrados, ambos problemas están resueltos por diseño del sistema. Por un lado, el circuito secundario es un circuito cerrado y formado por materiales todos ellos no oxidables, por lo que, a pesar de ser un material permeable al oxígeno, no debemos preocuparnos por cualquier posibilidad de corrupción de éstos. Además, al trabajar a temperaturas moderadas (35°C en modo calor), tampoco debemos preocuparnos de la posibilidad de que exista algún tipo de precipitación de cal.

Por otro lado todas las subestaciones están equipadas con purgadores automáticos que facilitan la extracción de aire de los circuitos. El flujo laminar existente en los capilares y la instrucción de llenado de la instalación para la puesta en marcha del sistema, hacen que no debamos preocuparnos por la presencia de aire en los circuitos y tubos capilares del mismo.

4. Paneles radiantes y paneles a convección

Hemos expuesto anteriormente parte del abanico de posibilidades de sistemas constructivos de ubicación de los entramados de tubos capilares. También se ha expuesto cómo dichos sistemas acondicionan el ambiente y

contrarrestan las cargas térmicas principalmente por radiación, y de forma secundaria por convección. Efectivamente, la superficie o superficies que se han enfriado o calentado intercambian energía radiante con las personas y resto de paramentos, y al mismo tiempo enfrían o calientan el aire interior a través de corrientes de convección. Habitualmente los entramados son continuos y paralelos al plano que los soportan. En este caso, la experiencia permite cuantificar que el sistema aporta al acondicionamiento aproximadamente un 60% por radiación, y un 40% por convección. En otras ocasiones los entramados se disponen en plano paralelo al techo, pero de forma discontinua, o en posición vertical descolgadas del techo, con alguna placa de otro material que la soporte. De esta forma se favorece el efecto de las corrientes de convección. El intercambio energético con el entorno y el usuario se realiza en este caso aproximadamente entre un 60 y un 80% por convección, y entre un 40 y un 20% por radiación.

4.1. Paneles radiantes

Las tipologías constructivas habituales son:

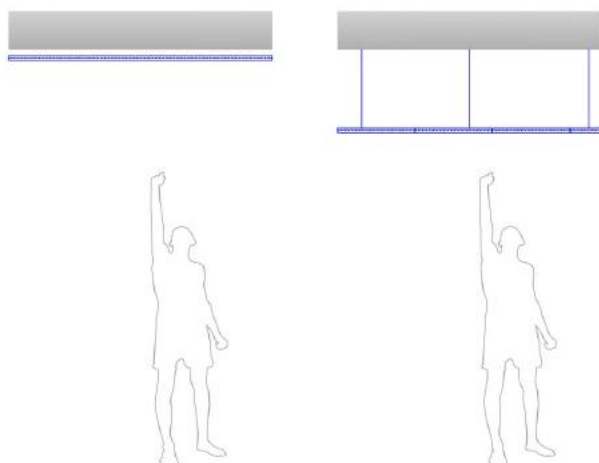


Fig. 12. Soluciones en techo para paneles radiantes.

- Disposición de las tramas capilares adheridos directamente al soporte y posterior enlucido de yeso proyectado. No se requiere por tanto disponer una capa de aislante térmico entre las tramas y el soporte.
- Falso techo suspendido, desmontable o no. Habitualmente los entramados se disponen sobre placas de yeso seco o sobre placas metálicas o cerámicas de sistemas convencionales modulados. Las modulaciones más frecuentes son de 60 x 60 cm. o de 60 x 120 cm y existen módulos de bandejas metálicas climáticas de hasta 3 m de longitud por 30 cm de ancho. Las placas, en el caso de falsos techos desmontables, continúan siendo totalmente desmontables y permiten realizar cualquier tarea de mantenimiento de la instalación o incluso desmontarlo totalmente (véase Fig. 12).

- Solución para trasdosado de paredes o techos con placa de cartón-yeso, en sistemas convencionales con perfilera metálica para anclaje de la placa (véase Figs. 5 y 13).

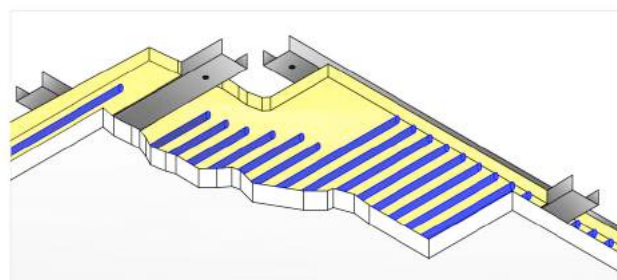


Fig. 13. Soluciones de ubicación de los entramados capilares con trasdosados de cartón-yeso y similares..

4.2. Paneles a convección

Los paneles a convección se sitúan en techo. Son aplicaciones especiales que buscan conseguir rendimientos muy superiores en modo refrigeración. Existen dos variantes principales de este sistema que se muestran en la Figura 14:

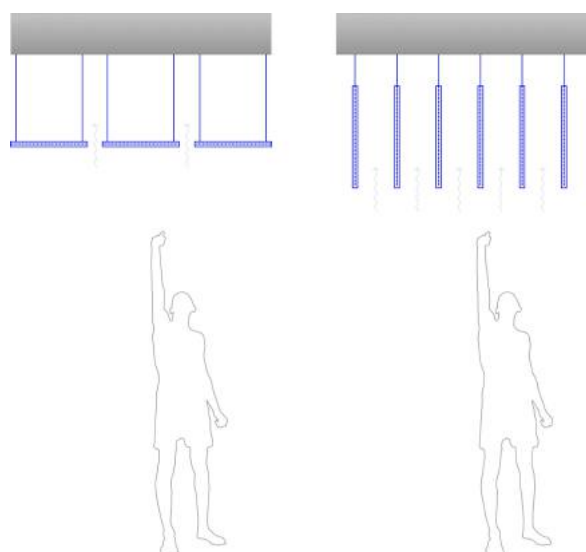


Fig. 14. Soluciones en techo para paneles a convección.

- Panel multi placas. Van descolgados del techo, a una cierta separación de dimensión variable. Se produce una discontinuidad en el plano de los paneles que contiene los entramados de tubos capilares, de forma que el aire del interior puede ascender por encima del nivel de los paneles, reforzando el efecto de la convección. El resultado se traduce en un importante incremento del intercambio energético del agua que circula por los tubos con el aire del interior. Con este sistema se han llegado a alcanzar potencias totales de emisión del

sistema de hasta 180 W/m^2 , frente a las habituales cuantías de $80\text{-}90 \text{ W/m}^2$ de emisión en techo.

- Panel baffle. Se disponen verticalmente descolgados del techo. El efecto de la convección varía en función de la altura del panel, su separación respecto del techo, y de la separación entre paneles. Se logran, al igual que en el sistema anterior, importantes incrementos de la potencia emisora del sistema. Son soluciones especiales en las que se debe resolver su aplicación. Recientemente se ha incorporado también el panel de piezas de gres porcelánico de gran formato, $100 \times 300 \text{ cm.}$, y bajo espesor, de 3 a 5 mm [5].

5. Confort térmico

El confort térmico es un criterio decisivo para la salud, ya que el cuerpo humano mantiene intercambios térmicos permanentes con su entorno, mediante radiación, convección, conducción y transpiración. Si mediante el metabolismo se produce más calor que el necesario, el exceso de calor debe ser transmitido al entorno. Si existe un déficit térmico, deben reducirse las pérdidas térmicas y aumentar la producción de calor.

La idea de que los seres humanos prefieren diferentes entornos térmicos, debido a edad, sexo u origen, lo cual implica que el bienestar sería solo una cuestión subjetiva, no es una verdad total desde el punto de vista científico. El confort depende de factores que influyen entre sí. Una coordinación óptima entre estos factores, tendrá como consecuencia que el 95% de las personas sentirán confort en las mismas condiciones. Estas influencias pueden ser clasificadas considerándose para una persona o para un determinado local.

Según ISO 7730, el confort térmico se calcula utilizando una extensa ecuación. En esta ecuación (investigaciones del Profesor Ole Fanger) deben considerarse los siguientes valores, varios de los cuales ya conocemos de apartados anteriores:

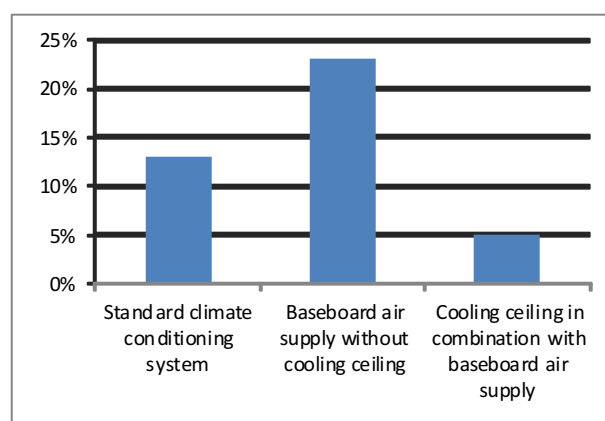
- Temperatura del aire del local.
- Temperatura media de radiación de las superficies del entorno.
- Velocidad relativa del aire del local.
- Presión parcial del vapor del aire del local.
- Resistencia del vestido a la transmisión térmica.
- Nivel metabólico para la superficie del cuerpo humano.

Existiría un séptimo parámetro, el trabajo externo, que puede ser despreciado ya que para la mayoría de actividades, resulta cercano a 0.

En función de estos parámetros llegaríamos a una ecuación comúnmente admitida para la previsión de la sensación térmica global. Se referencia a un índice, el PMV (Predicted Mean Vote) que refleja la opinión de un

numeroso grupo de personas sobre la sensación térmica experimentada durante estancias prolongadas en determinadas condiciones termo-higrométricas. En este caso, no vamos a centrarnos en desarrollar esta complicada fórmula, sino en acercarles la importante herramienta que supone el poder valorar cuantitativamente el beneficio que los sistemas radiantes tienen en lo relacionado a confort térmico.

Ligado al índice PMV, encontramos el llamado índice de insatisfacción PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) que forma parte del anterior. El índice PPD nos muestra el valor porcentual probable de personas insatisfechas en las condiciones de estudio. Es importante destacar que existe un límite inferior que no es posible mejorar ya que, incluso en una situación óptima, habrá un 5% de personas insatisfechas.



Fuente: Technical information G01, Beka Heiz-undKülmatten.

Fig.15. Comparación de tres sistemas de climatización en base a porcentaje estadístico de insatisfechos según Prof. Fanger.

Como podemos comprobar en la fig. 15 según los estudios realizados por el profesor Povl Ole Fanger (Copenhague, 1934-2006), el porcentaje estadístico de personas insatisfechas para un sistema radiante más ventilación es de un 5%, lo que significaría el óptimo alcanzable. Además, si lo comparamos con sistemas de aire, éstos alcanzan niveles muy superiores de insatisfacción que varían entre un 13% y un 23%.

Así pues encontramos en los índices PMV y PPD herramientas que nos permiten medir y expresar numéricamente la gran diferencia de confort y niveles de satisfacción existente entre sistemas radiantes y sistemas de aire.

6. Ahorros energéticos frente a otros sistemas de climatización

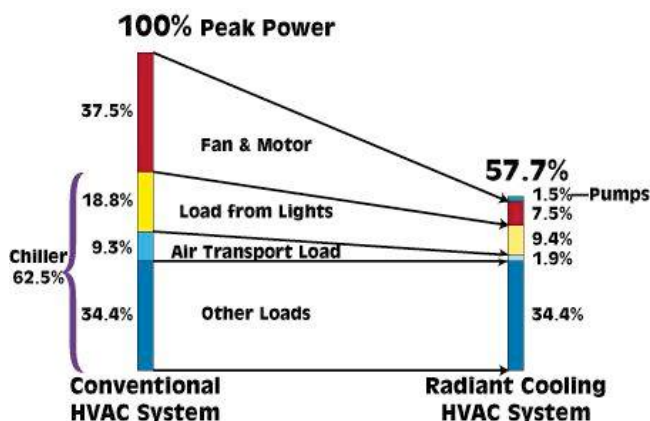
El consumo de energía es uno de los puntos más importantes a valorar dentro de los sistemas de climatización y un factor en el que recientemente, motivado la normativa y legislación así como por la conciencia social y de diseño, se ha avanzado significativamente.

Existen numerosos estudios y publicaciones en las que se atestiguan reducciones de entre un 20% y un 30% en el consumo de energía de sistemas radiantes frente a sistemas de aire forzado [4], [7]. Encontramos también casos en los que este ahorro en el consumo puede llegar al 40% con soluciones capilares, si lo comparamos con un sistema de volumen de aire variable [8].

En este capítulo nos centraremos en cuáles son los motivos por los cuales los sistemas radiantes capilares, son capaces de conseguir estos significativos ahorros frente a otros sistemas o, dicho de otra forma, cómo tienen la virtud de alcanzar un consumo tan contenido de energía.

6.1. El agua como medio de transporte de energía

Si tenemos en cuenta dos magnitudes de las propiedades físicas del agua y las comparamos con las del aire, encontramos que, el calor específico de agua es cuatro veces superior al calor específico del aire. Esto quiere decir que, para transportar una determinada cantidad de calor, con el mismo salto térmico, se requiere más cantidad de aire y en consecuencia más potencia del elemento electromecánico.



Fuente. CBS Newsletter. Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California.

Fig. 16. Comparación de cargas y consumos entre sistemas sólo aire y sistemas radiantes.

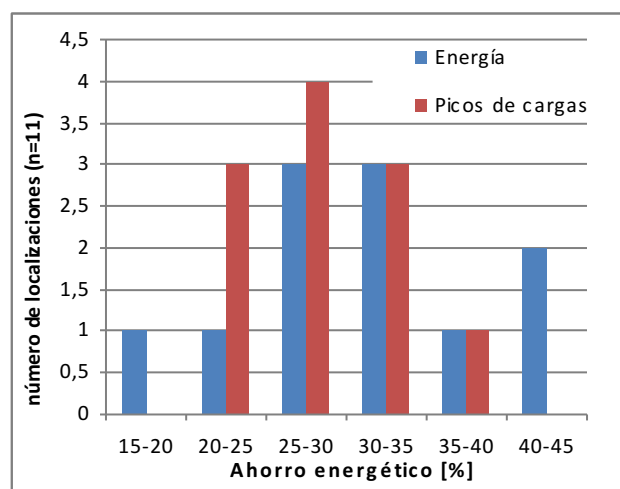
La segunda magnitud a comparar sería la densidad. La densidad del aire a 25°C es aproximadamente 1,19 Kg/m³ (depende de la composición exacta del aire) y la del agua a la misma temperatura de 1000 Kg/m³. Esto supone que cuando decidamos transportar una determinada cantidad de energía, los volúmenes necesarios son 1000 veces superiores con aire que con agua.

La consecuencia es que la energía eléctrica que necesitaremos para mover motores y ventiladores en un sistema de aire forzado es un 80% superior a la que sería necesaria con un sistema radiante.

6.2. Disminución de los picos de carga

Los sistemas radiantes capilares son soluciones activas. Con esto queremos decir que este tipo de sistemas, durante su funcionamiento actúan constantemente, no sólo sobre el aire que contiene la estancia sino sobre todos los cerramientos del local, modificando la temperatura de éstos por acción del paramento radiante.

Esto tiene un efecto sobre los picos de carga que hace que las necesidades punta se vean amortiguadas y reduzcan su valor un 27% respecto a sistemas de “todo aire”. Además de esto, es interesante comentar que los picos de cargas normalmente se producen más tarde, en torno a dos horas, respecto a soluciones de aire forzado [4].



Fuente. Energy and Buildings.. Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California.

Fig. 17. Distribución de la disminución de picos de cargas y ahorro de energía para un sistema radiante, frente a un sistema de aire forzado, en las 11 diferentes localizaciones de US estudiadas.

Es importante destacar que en el 100% de los casos analizados y estudiados (tenemos un ejemplo en la fig.17), un sistema radiante correctamente ejecutado ahorra energía y disminuye los picos de carga y de consumo, frente a sistemas de aire. Estos valores pueden variar dependiendo del tipo de local, clima, etc. El rango en picos de carga varía entre un 20% y un 40%.

Una ventaja adicional y muy destacable que podemos obtener de esta cualidad es reducir la potencia instalada para el sistema de producción elegido, ya que esto (dependiendo si elegimos aerotermia, geotermia, caldera, etc.) va a añadir un ahorro adicional frente a la misma solución con una mayor potencia instalada.

6.3. Tubos capilares para la distribución hidráulica

Los sistemas radiantes capilares utilizan una red muy tupida de tubos capilares. Estos tubos capilares están muy próximos entre si, la separación va desde 10 mm en los casos más próximos, hasta 30 mm en los modelos de trama con un mayor espaciado. Además de esto, estos elementos

emisores están muy cercanos a la superficie (0,6 mm en un techo metálico, 10 mm en un enlucido, 13 mm en un acabado de placa de yeso seca y en suelos puede variar entre 10 mm y 30mm).

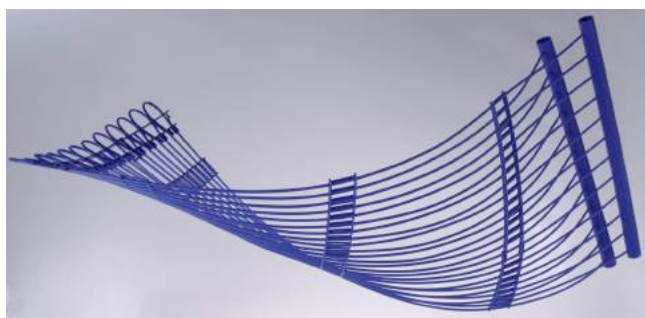


Fig. 18. Trama capilar KaRo fabricada por Beka y distribuida en España por dynamobel climatización.

Éste es uno de los principales motivos para poder impulsar el agua a temperaturas tan moderadas y conseguir una alta eficiencia energética. Además, si valoramos el funcionamiento en modo frío que tiene limitada la temperatura de impulsión por el punto de rocío, no sólo nos aporta un ahorro energético frente a otros sistemas de aire forzado, radiantes y convectivos, sino que nos permite conseguir potencias de 75-90 W/m² en modo refrigeración, que otros sistemas radiantes no son capaces de alcanzar.

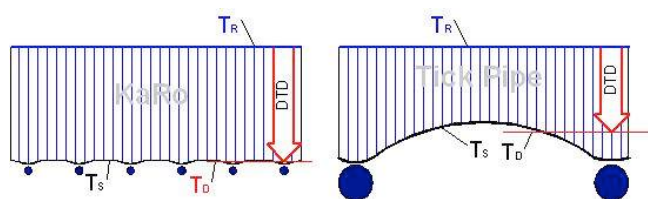


Fig. 19. Temperatura superficial de suelo radiante frío. (T_s) Temperatura superficial. (T_R) Temperatura ambiente. (T_D) Temperatura de Punto de Rocío.

Podemos comprobar en la Figura 19 que, el suelo ejecutado con tramas capilares forma solo una micro onda en el perfil de su temperatura superficial. Los sistemas radiantes de tubo grueso (derecha) forman ondas profundas. Por esto disponemos de una mayor capacidad de frío con sistemas capilares y conseguimos una mayor eficiencia y un menor consumo que con soluciones de tubo grueso.

Por otro lado, el tener las tramas capilares tan cerca de la superficie del paramento que queremos utilizar como paramento radiante, tiene la gran ventaja de reducir las inercias propias de sistemas radiantes convencionales y consecuencia de esto reducir consumo evitando horas de funcionamiento (encender varias horas antes el sistema y disipar todo el calor almacenado en el hormigón después del apagado).

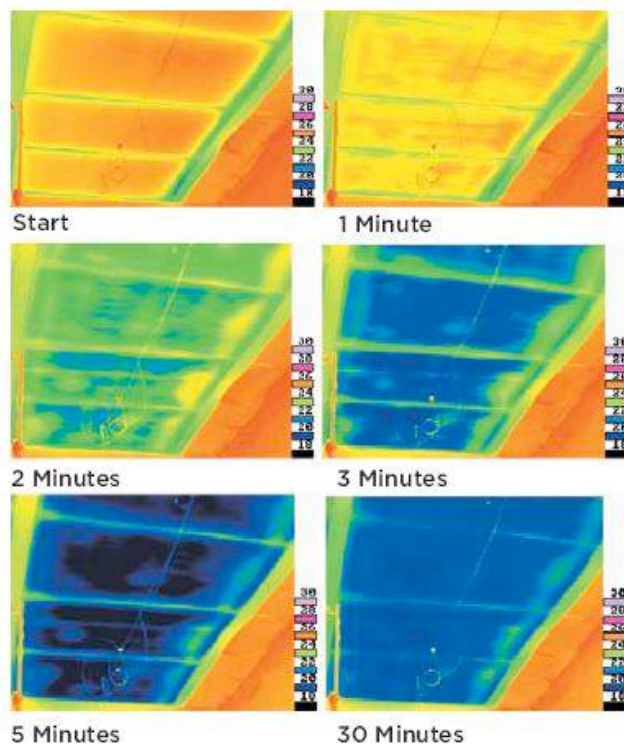


Fig. 20. Puesta en marcha de un techo radiante metálico dynamobel en modo refrigeración. El techo libera lo esencial de su potencia frigorífica a partir del 3^{er} minuto.

6.4. Rendimiento térmico de la instalación

Las temperaturas a las que se necesita preparar el agua para su utilización en las mallas capilares, como ya hemos comentado anteriormente, son muy moderadas (unos 15°C para funcionamiento en modo frío y 35°C para su uso en modo calor) y esto nos permite mejorar el rendimiento de la fuente de producción frente a otros sistemas con mayores necesidades de preparación.

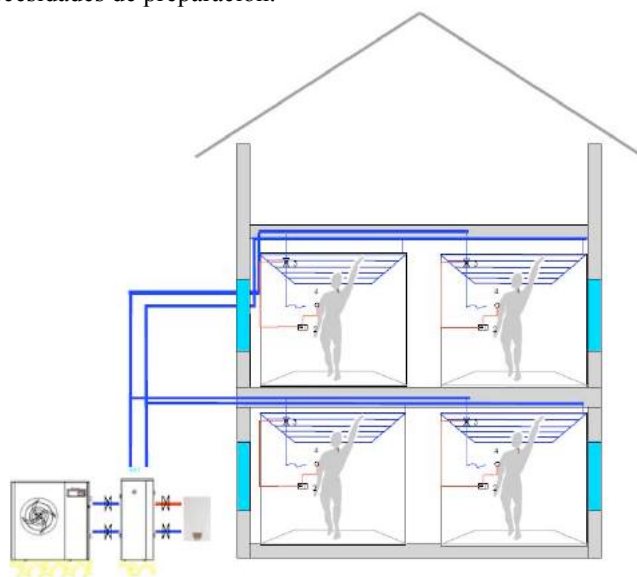


Fig. 21. Esquema de techos radiantes con una producción de una bomba de calor de aerotermia.

En caso de que la fuente elegida sea una bomba de calor (aeroterminia o geoterminia por ejemplo), obtendremos un menor consumo de ella, ya que mejoraremos el COP de la máquina pudiendo impulsar el agua a temperaturas más moderadas que con otros sistemas. Es decir obtendremos mejores rendimientos térmicos que con otros sistemas.

Si la fuente elegida fuera una caldera (para el funcionamiento del sistema en modo calor), conseguiremos el mismo efecto gracias a la necesidad de preparar el agua a, aproximadamente, 35°C. Y no sólo esto, sino que los tiempos de funcionamiento se verán reducidos y la eficiencia será máxima en casos de calderas de condensación con temperaturas de preparación óptimas de 40°C.

También podemos maximizar el rendimiento global de la instalación a partir de un masivo aprovechamiento de energías alternativas. Por ejemplo, en el caso de tener una instalación solar con un depósito de solar preparado a 40°C en invierno, no necesitaríamos dar un salto térmico adicional a esa agua, ya que ésta sería suficiente para calefactar los locales.

En general y sea cual sea la solución de producción elegida, obtendremos un mayor rendimiento térmico de la instalación y consecuentemente disminuirémos el gasto energético para cualquier fuente de energía.

Tabla 2

Comparativa de consumos energéticos entre sistema sólo aire y tubos capilares en edificio de oficinas.

Fuente: Manual Técnico dm climatización. Climatización tranquila.

| | | Sistema 1 Tramas KaRo | Sistema 2 Sólo aire |
|---------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|------------------------|
| Area efectiva | m ² | 4.000 | 4.000 |
| Máxima carga térmica | W/m ² | 60 | 60 |
| Caudal mínimo de aire | m ³ /m ² h | 4 | 4 |
| Salto térmico del agua | k | 3 | 6 |
| Total horas funcionamiento frío | h/año | 200 | 600 |
| Ventilación | | | |
| Volumen de aire impulsión | m ³ /h | 16.000 | 88.235 |
| Volumen de aire retorno | m ³ /h | 11.200 | 83.435 |
| Potencia | kW | 2 | 24,8 |
| Consumo de potencia | MWh/año | 31 | 309 |
| Comparación | % | 10% | 100% |
| Bomba de frío | | | |
| Caudal de agua | l/ m ² h | 17,24 | 8,62 |
| Consumo de potencia | MWh/año | 17,2 | 8,6 |
| Comparación | % | 200% | 100% |
| Ventiladores y bombas | | | |
| Consumo de potencia | MWh/año | 48 | 318 |
| Comparación | % | 15% | 100% |
| Sistema de refrigeración | | | |
| Demanda de potencia | | 0,25 | 0,3 |
| Potencia | kW | 60 | 72 |
| Consumo de potencia | MWh/año | 12 | 43 |
| Comparación | % | 28% | 100% |
| Consumo total | MWh/año | 60 | 361 |
| Comparación | % | 17% | 100% |

6.5. Ahorro de costos de construcción y mantenimiento de la instalación

Es importante tener una visión global de cualquier proyecto, tener un objetivo común y ser capaz de poner todos los recursos disponibles en manos de arquitectos e ingenieros para conseguir un proyecto eco-eficiente. En esta línea podemos encontrar otro tipo de ahorros que en un primer momento pueden parecer únicamente económicos, pero que analizados des un punto de vista global, también suponen un ahorro de energía para su ejecución.

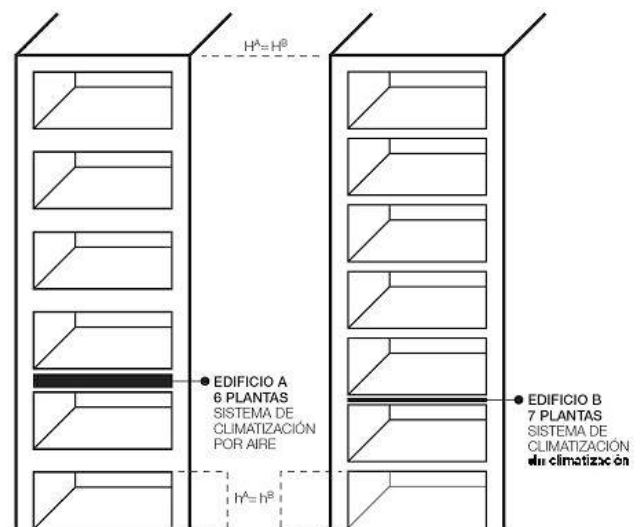


Fig. 22. Ahorro de altura edificable: añadida planta extra.

Por esto es importante nombrar también el ahorro que podemos conseguir en los costos y materiales de construcción, teniendo en cuenta desde un primer momento que utilizamos en nuestro diseño un sistema capilar. Éste nos permite reducir la altura final del edificio si tenemos en cuenta el espacio necesario para instalaciones comparado, por ejemplo, con un sistema de aire.

El otro punto a tener en cuenta, sería la explotación de la instalación ejecutada. En este caso, las instalaciones radiantes tienen un mantenimiento mucho menos costoso que una instalación de aire forzado, por lo que encontramos un ahorro adicional que añadir a lo anteriormente valorado.

7. Utilización de energía solar y geotérmica. Sistemas de absorción, de energía química y adsorción

La eficiencia energética del sistema y su respeto medioambiental se ven incrementados por la particularidad de que, al trabajar con agua a temperaturas moderadas respecto de los sistemas de aire forzado o convectivos, la energía solar y la energía geotérmica, con las tecnologías y rendimientos actuales, son idóneas para el sistema, y lo serán aún más sin duda en el futuro.

7.1. Energía solar

La energía solar térmica de baja temperatura se adapta perfectamente a los requerimientos de temperatura del agua de circulación de una calefacción radiante. Los paneles de placa plana o colectores solares térmicos calientan el agua, en función de la latitud y del asoleo, a temperaturas inferiores a los 100 °C, para su posterior distribución a circuitos cerrados. Es evidente que el sistema requerirá la implantación de otra fuente de energía de apoyo para momentos en que el salto térmico del agua no garantice suficiente potencia para contrarrestar las cargas térmicas de los espacios servidos. El rendimiento de los captadores solares aumenta cuanto más baja sea su temperatura de trabajo. Para temperaturas medias de circulación del agua como fluido caloportador de entre 35 °C y 45 °C, rendimientos del orden del 40 % son normales en invierno [9].

En el caso del régimen de invierno, la calefacción se realiza preferentemente por suelo, al producir un gradiente de temperaturas del aire que envuelve al individuo más ajustado a la curva ideal. La temperatura superficial no debe sobrepasar los 29 °C, ya que podría ocasionar problemas de circulación de la sangre en las personas. En el caso de techos y paredes podría ser superior, y lograr una mayor potencia de emisión. En el caso de suelo radiante por tubo grueso, habitualmente de polietileno reticulado de diámetro exterior 20 ó 16 mm, el sistema incorpora inercia térmica en una masa de mortero de cemento de aproximadamente 6 cm de espesor. Un circulador hace discurrir el agua por los circuitos cuando un termostato diferencial, que recibe información de las temperaturas de las sondas ubicadas en los paneles solares y en el mortero del suelo, determina que el aporte energético será mayor que las pérdidas por las tuberías generales. Cuando se alcanzan 30 °C en la capa de mortero de cemento, dicho termostato diferencial hace parar el circulador. Estos sistemas no necesitan acumular energía en un depósito de agua, debido a la inercia que posee la capa de mortero. A la caída de la tarde se producirá el momento de máxima temperatura en la superficie del suelo, e irá enfriándose progresivamente durante la noche hasta que el sol comience a calentar de nuevo los colectores a la mañana siguiente.

En el caso de los sistemas por tubos capilares, ya sea en suelo o en techo, podría no disponerse la capa de mortero de cemento, por lo que en ese caso no tendría inercia térmica. Debería entonces disponerse depósitos acumuladores, a partir de los cuales, mediante un circuito secundario, se distribuiría el agua caliente hacia los intercambiadores de las subestaciones. Una bomba de calor o una caldera de apoyo o sistema auxiliar resuelven la demanda energética cuando no hay suficiente salto térmico. En la península ibérica un día soleado de invierno no suele tener más de 5 horas de potencia solar suficiente.

Aunque no sea objeto de este trabajo exponer el método de cálculo de estas instalaciones, se exponen las expresiones que definen el rendimiento de un colector solar y la superficie de captación necesaria, que suele requerir un

colector de 2 m² por cada 5-8 m² de superficie de la vivienda:

$$\eta = a + b \left[\frac{T_s - T_a}{I} \right] \quad \text{E 9}$$

Donde:

- η : rendimiento en tanto por uno
- a : constante que depende de las características ópticas de la cubierta del panel.
- b : constante que depende del número de cubiertas del panel y sus características térmicas.
- T_s : temperatura de salida del colector
- T_a : temperatura ambiente
- I : intensidad de radiación solar incidente en W/m²

$$S_{\text{captadora}} = \frac{Q_{\text{diarias}}}{I \cdot \eta} \cdot f \quad \text{E 10}$$

Donde:

- $S_{\text{captadora}}$: superficie necesaria de colectores en m²
- Q_{diarias} : necesidades energéticas diarias en Wh
- I : intensidad de radiación solar incidente en W/m²
- η : rendimiento del colector según curva del fabricante para Tm de 40°C
- f : factor de cobertura de las necesidades energéticas en tanto por uno

Tal y como se expuso en el esquema de principio de la Figura 7, el agua de los paneles térmicos solares podría calentar el agua de un depósito hasta los 60-80 °C. Según el volumen de este depósito, se podría tener una mayor inercia en el sistema para resolver el periodo nocturno. A partir de éste, se distribuye un circuito primario hasta los intercambiadores de las subestaciones. El consumo energético sería únicamente el de los dos circuladores de agua. El consumo anual de energía de calefacción tendría relación directa con las horas de salto térmico adecuado, en las que se aprovecha la energía solar, y las horas en que entraría la fuente alternativa de energía. Se deberían por tanto evaluar estos porcentajes de uso de uno y otro sistema.

7.2. Energía geotérmica

El uso de la energía geotérmica para sistemas de climatización ha experimentado un crecimiento importante en los últimos años. Dicha energía se aplica en sistemas por compresión, en los que en vez de intercambiar energía con el aire exterior, lo hace con el terreno o, en su caso, agua de

mar, pozos de infiltración de agua de nivel freático o de mar, piscinas, cimentación de la propia edificación, etc. Se trata de una bomba de calor geotérmica agua-agua frente a una aire-agua. La estabilidad de temperatura del terreno frente al del aire exterior, que experimenta habitualmente una importante variación a lo largo del ciclo anual, estacional, o incluso diario, reporta importantes ventajas. Estas se traducen en la práctica en un consumo energético inferior, un mayor rendimiento de la instalación, y una mayor estabilidad en el consumo, con menor oscilación.

En régimen de verano la función del terreno es la de disipar el calor que el refrigerante ha robado al agua que circula en el circuito secundario, que discurre por los circuitos y los entramados capilares. El hecho de contar con una temperatura más estable que la del aire exterior favorece el rendimiento de la bomba de calor, así como su vida útil. La temperatura de distribución hacia los intercambiadores de placas de los entramados es de 7°C, con un salto térmico de 5°C. La temperatura de distribución en el secundario, por las razones ya expuestas, estará en torno a los 17°C.

Es preciso señalar que en verano se podría disponer el circuito de agua de intercambio energético con el terreno de forma que, en vez de pasar al condensador de la bomba de calor, intercambiara energía directamente con el circuito de distribución hacia las subestaciones. En función de la temperatura del terreno, se podría conseguir potencia

suficiente para la climatización sin necesidad de aplicar energía en el compresor.

En invierno, el sistema, a través de un circuito cerrado o abierto comunicado con el evaporador de la bomba de calor geotérmica, roba energía al terreno en vez de hacerlo con el aire exterior. Esto implica que el sistema puede implantarse en zonas geográficas de baja temperatura exterior, en las que las bombas de calor aire agua no son eficientes o incluso no funcionan. Los rendimientos del sistema han hecho que la Unión Europea la haya clasificado como energía renovable [10]. Los coeficientes de rendimiento COP y rendimientos medios estacionales SPF obtenidos varían en función de la profundidad del terreno en que se realiza el intercambio energético, de si se trata de pozos de gran profundidad, de pozos de nivel freático, etc. [11]. Pero se puede estimar que alcanzan valores francamente favorables, como se muestran en la tabla 3, frente a bombas de calor aire-agua. Los saltos térmicos que producen en el circuito secundario también presentan ligeras variaciones, pero se aproximan a los valores de la tabla 4. Se puede llegar a distribuir agua a 45°C, con un salto térmico de 5°C. Esta temperatura permite conectar el circuito primario a los intercambiadores de placas de las subestaciones, a partir de las cuales se distribuirá agua caliente a los entramados a temperatura de servicio de 32°C en el caso de suelos radiantes, y temperaturas incluso superiores en el caso de paredes o techos radiantes cuando se requieran potencias mayores de emisión.

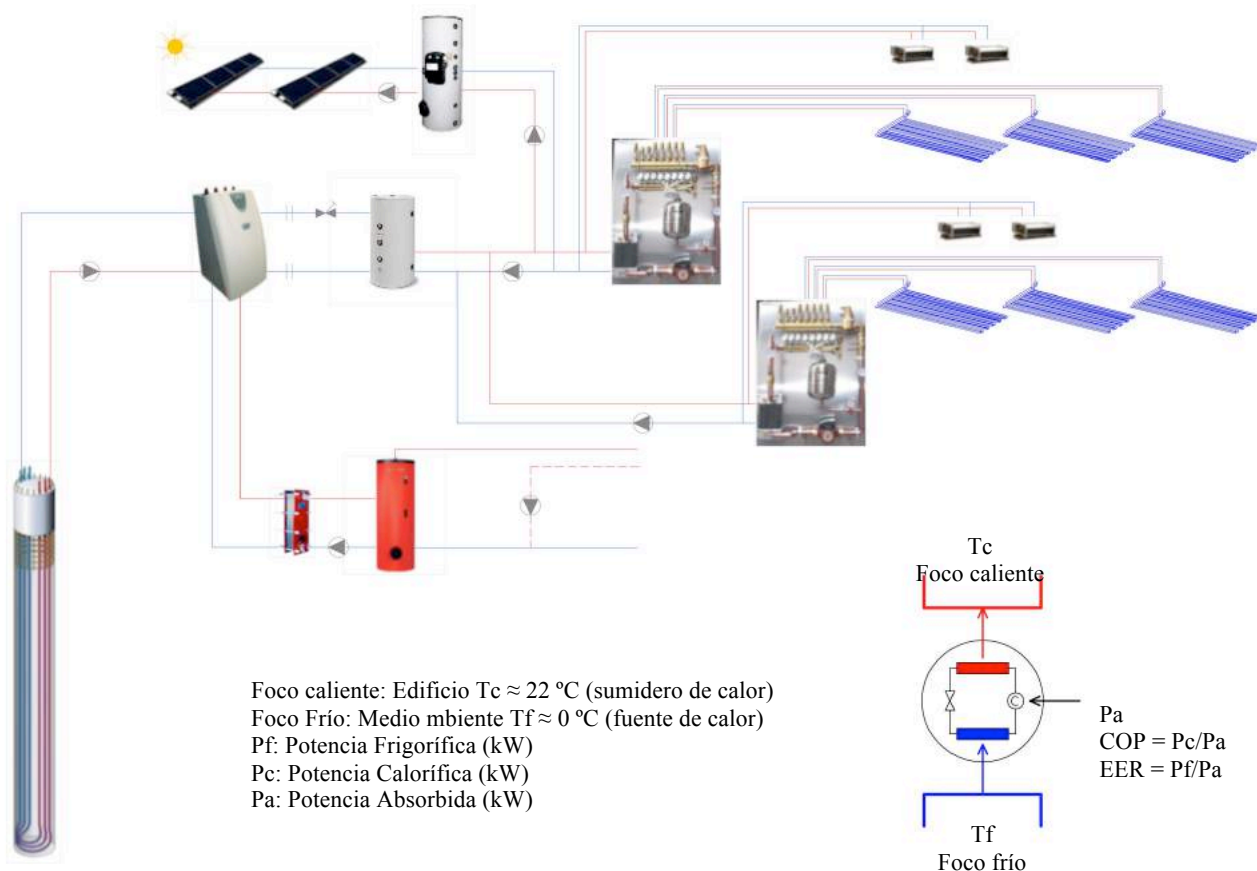


Fig. 23. Esquema de principio de instalación de geotermia. Posible combinación con colectores solares.

Tabla 3

Valores comparativos de consumos de energía y emisiones de CO₂.
Fuente: Proyectos emblemáticos en el ámbito de la energía geotérmica

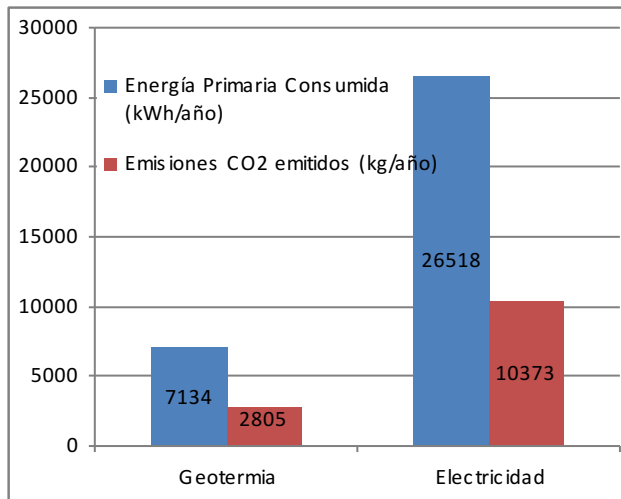


Tabla 4

Temperaturas de ida y retorno del circuito primario en verano e invierno

| | Refrigeración | | Calefacción | |
|---------------------------|---------------|--------|-------------|--------|
| | Entrada | Salida | Entrada | Salida |
| Bomba calor agua-agua | | | | |
| Tª agua circuito interior | 12 | 7 | 10 | 5 |
| Tª agua circuito exterior | 30 | 35 | 40 | 45 |

Los ahorros energéticos frente a sistemas de calefacción eléctrica por efecto joule, o calderas de gas natural, son significativos, así como las reducciones de emisiones de CO₂. En la tabla 4 se exponen datos de tres viviendas situadas en el área de Madrid, de diferentes superficies construidas, con pozos geotérmicos de aproximadamente 120 m de profundidad.

Tabla 5

Ahorros energéticos en viviendas unifamiliares con pozos geotérmicos

| Vivienda | 1 | 2 | 3 |
|--|--------------------|--------------------|--------------------|
| Superficie construida | 200 m ² | 450 m ² | 780 m ² |
| Consumo energético previsto kWh/año | 22.598 | 55.597 | 83.415 |
| Consumo bomba geotérmica kWh/año | 5.756 | 14.683 | 25.118 |
| Consumo bombas circulación kWh/año | 1.438 | 3.180 | 8.372 |
| Ahorro energético kWh/año | 19.404 | 42.734 | 49.926 |
| Porcentaje ahorro energético | 85 % | 77 % | 63 % |
| Reducción emisiones CO ₂ kg | 7.568 | 6.275 | 18.500 |
| Porcentaje reducción CO ₂ | 73 % | 50 % | 71 % |

Nota: Los porcentajes de ahorros energéticos en las viviendas 1 y 3 se ha hecho frente a calefacción por efecto joule. En el caso de la vivienda 2 frente a caldera de gas natural.

Fuente: AANV. Proyectos emblemáticos en el ámbito de la energía geotérmica.

En el caso de los pozos geotérmicos, de más fácil aplicación que la disposición de intercambiadores superficiales en el terreno por las dificultades de disponer de suelo y las posibilidades de rotura, además de alcanzar potencias reducidas, el cálculo de la longitud de dichos

pozos dependa de la resistencia térmica del suelo, del factor de utilización, la temperatura del terreno. Partiendo de la expresión del flujo de calor, podríamos determinar dicha longitud a través de las siguientes expresiones:

$$q = \frac{T_f - T_s}{R_t + R_s} \quad [\text{E.11}]$$

Donde:

- q : Flujo de calor recogido en sentido radial, con espesor pequeño y longitud infinita
- R_t : Resistencia térmica tubería.
- R_s : Resistencia térmica suelo.

$$R_s^* = R_s \cdot Fu \quad [\text{E.12}]$$

Donde:

- R_s : Resistencia térmica suelo.
- Fu : Factor de utilización según climatología y equipo de climatización.

$$T_s(y,t) = T_m - A \cdot e^{-y \sqrt{\frac{\pi}{365\alpha}}} \cos \left[\frac{2\pi}{365} \left(t - t_0 - T_s \frac{y}{2} \sqrt{\frac{365}{\pi \cdot \alpha}} \right) \right] \quad [\text{E.13}]$$

Donde:

- $T_s(y,t)$: La temperatura del terreno a cierta profundidad y tiempo.
- y : profundidad.
- A : amplitud de la oscilación de la temperatura de la superficie.
- T_m : temperatura media.
- α : difusividad.
- t_0 : tiempo con la temperatura media más baja en todo el año.

Para obtener la longitud de intercambiador necesario para satisfacer la máxima carga de refrigeración se tomara el instante de máxima temperatura anual. Viceversa para el caso de calefacción.

$$\Delta L_R = \frac{P_f}{T_{fR} - T_{\min}} (R_t + R_s + Fu_R) \quad [\text{E.14}]$$

$$\Delta L_C = \frac{P_C}{T_{\max} - T_{fC}} (R_t + R_s + Fu_C) \quad [\text{E.15}]$$

Donde:

- T_{\min} : instante de mínima temperatura anual.
- T_{\max} : instante de máxima temperatura anual.
- Fu_R : factor de utilización en refrigeración según la climatología y equipo de climatización.
- Fu_C : factor de utilización en calefacción según la climatología y equipo de climatización.
- R_t : Resistencia térmica tubería.
- R_s : Resistencia térmica suelo.

Existe un gran abanico de potencias de bombas de calor geotérmicas, que oscilan entre 4 KW y más de 1 MW. Permiten la inversión del ciclo frigorífico, utilizan compresores tipo scroll, y refrigerantes actuales HFC como el R-410a y el R-407C. Se lleva tiempo investigando en la implantación de refrigerantes sin potencial efecto invernadero, y por tanto más ecológicos, como propano R-290, CO₂ R-744 y NH₃ R-717. La instalación permite producción de refrescamiento y calefacción por superficies radiantes, y producción de agua caliente sanitaria.

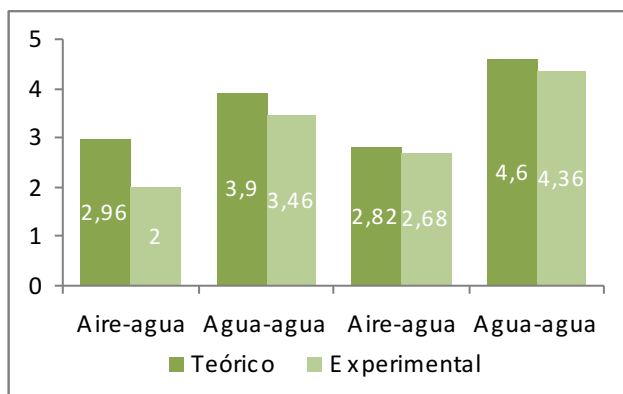


Fig. 24. SPF comparativos entre bombas de calor agua-agua y aire agua. Fuente: Proyecto Geocool

7.3. Energía solar: sistemas de absorción y adsorción

Los sistemas denominados “frío solar” se basan en el aprovechamiento de la energía radiante solar para conseguir enfriar el agua de un circuito cerrado, a partir del cual realizar una adecuada climatización. Consiste básicamente en transformar la energía solar para climatizar en verano, obteniendo agua caliente sanitaria durante todo el año y reforzando la calefacción en invierno. Este sistema garantiza un ahorro de hasta un 70% ya que, por un lado, se utiliza una fuente de energía renovable, y por otro, se reduce el consumo de electricidad. Con estos sistemas se minimiza el impacto ambiental, reduciendo las emisiones de gases a la atmósfera (CO₂, SO₂ y NO_x), así como las materias primas no renovables, tales como los combustibles fósiles.

Los sistemas de refrigeración solar tienen la gran ventaja de que se utilizan cuando coinciden los niveles máximos de demanda y de producción, ya que las necesidades de

climatización de un edificio se producen en la época de más radiación solar. Son especialmente eficientes y adecuadas para edificios que precisan de refrigeración y calefacción intensivas, como es el caso del sector residencial y terciario (hoteles, centros comerciales, oficinas, viviendas unifamiliares, etc.), cada vez con más demanda de confort. Con el fin de evitar los problemas de sobrecalentamiento de los paneles solares en verano, se disponen de sistemas de disipación de calor que producen la suficiente dispersión energética que estas instalaciones requieren. Habitualmente se hace a través de una torre de refrigeración, la piscina en el caso de viviendas, un aerogenerador para refrigeración, etc.

Los colectores se seleccionarán en función de las características de la máquina que vaya a utilizarse pudiendo emplearse tanto colectores solares planos como colectores solares con tecnología de tubos de vacío. Con objeto de estabilizar el caudal y la temperatura del agua que se suministra a la máquina se colocan depósitos acumuladores. El caudal y dimensionado depende en cada caso de la potencia de la instalación.

En función de las características de la máquina y del tipo de colector solar que se haya elegido para la instalación puede ser conveniente utilizar en el sistema una caldera de apoyo que sobrecaliente el agua proveniente del sistema de captación solar. Lo habitual es utilizar para este fin una caldera que facilite agua caliente para calefacción en invierno. Es habitual en este tipo de instalaciones contar con una o varias enfriadoras de apoyo al sistema de producción de frío solar en previsión de situaciones en las que la producción solar de agua caliente no sea suficiente. Todo el sistema debe disponer de un equipo de regulación electrónico, con sondas, electroválvulas y otros dispositivos de control.

Existen dos tecnologías desarrolladas para la producción solar: absorción y adsorción. El primero de ellos, a su vez, se divide en sistemas de absorción con bromuro de litio, y sistemas de triple fase sin refrigerante, que utilizan cloruro de litio.

7.3.1. Refrigeración por absorción

La máquina de absorción es un equipo que permite traspasar energía de una fuente a baja temperatura a otra fuente a alta temperatura, con un pequeño consumo de energía adicional. Es una bomba de calor, pero a diferencia de los sistemas de compresión mecánica, en que el trasvase energético se realiza mediante el cambio de estado de algunas sustancias al pasar de gas a líquido y viceversa, su funcionamiento se basa en la capacidad de determinadas sustancias para absorber un fluido refrigerante. En este sentido se trata de una compresión térmica en vez de una compresión mecánica. A diferencia de las bombas de calor eléctricas, la energía aportada es térmica, por lo que, son adecuadas para acoplarlas con colectores solares u otras fuentes caloríficas: calderas de biomasa, calderas de gas natural, cogeneración, sistemas de recuperación de calor, etc.

En función del fluido refrigerante y absorbente, las máquinas de absorción pueden dividirse en:

- Bromuro de litio: Agua (refrigerante) y bromuro de litio (absorbente).
- Amoniaco: Amoniaco (refrigerante) y agua (absorbente).

La eficiencia de las máquinas de absorción en producción de refrigeración viene determinada por el COP: la relación entre el frío producido y la energía térmica empleada para producirlo. Producen un salto térmico, de aproximadamente 5 °C, entre la ida y el retorno del circuito de distribución de agua hasta los intercambiadores de las subestaciones de los entramados de tubos capilares y los fan-coils encargados de realizar la deshumidificación. En el caso de sistemas de bromuro de litio, la temperatura de ida está en torno a 10 °C por 15 °C en el retorno.

Como se ha indicado anteriormente, se requiere disponer de una fuente de calor alternativa para momentos en que la energía solar es insuficiente, así como la manera de disipar la energía sobrante del sistema cuando no se aplica en la climatización de la vivienda, la climatización de la piscina, u otros servicios.

Se puede distinguir entre las máquinas de absorción de simple efecto y las de doble efecto. Las de doble efecto requieren agua sobrecalentada (120-190 °C) o vapor para su funcionamiento (3-10 bar), mientras que las de simple efecto pueden funcionar con agua caliente (80-95 °C). En función de este parámetro vendrá condicionada la tecnología de colectores solares apropiada para suministrar la energía térmica que la máquina de absorción precisa para su funcionamiento. En el caso de las máquinas de simple efecto la utilización de colectores planos selectivos o colectores CPC (Compound Parabolic Collector) ofrecen un buen aprovechamiento de la energía solar, y el coste respecto a otras tecnologías es significativamente más económico. Sin embargo, para la conexión a máquinas de doble efecto es preciso considerar colectores parabólicos con seguimiento solar. Hoy en día hay máquinas de absorción de doble efecto que permiten el apoyo de energía solar a $T^a < 100$ °C, utilizando la energía de los colectores solares en el intercambio y no en el generador de la máquina.

Actualmente, los sistemas de refrigeración solar basados en máquina de simple efecto son competitivos frente a sistemas de compresión eléctrica convencionales, obteniéndose significativos ahorros energéticos. En el caso de equipos de doble efecto, aunque existe un sobrecoste en la inversión, las ventajas energéticas y medioambientales son significativas. Reduce las emisiones de CO₂ a la atmósfera en la misma proporción que la energía eléctrica que ahorra, pudiendo estimarse esta reducción en unos 230 gr de CO₂ por cada kW de refrigeración obtenido. Utiliza energía verde, renovable, y por tanto reduce la dependencia del uso de combustibles fósiles.

Tabla 6
Comparativa de consumos energéticos absorción solar frente a compresión

| | Sistema 1 Absorción solar MWh/año | Sistema 2 Compresión eléctrica MWh/año |
|---|---|--|
| Frío | 1.500 | 1.500 |
| Consumo energético | | |
| Solar | 642.857 | 0 |
| Calor residual | 1.285.714 | 0 |
| Gas natural | 238.095 | 0 |
| Electricidad | 0 | 428.571 |
| Energía primaria | 238.095 | 1.285.714 |
| Ahorro de Energía Primaria | 81% | |
| Balance económico comparativo en € | | |
| Inversión total € | 450.180 | 192.177 |
| Coste energía total €/año | | |
| Gas natural | 7.146 | 0 |
| Electricidad | 0 | 23.152 |
| Ahorro sistema 1/sistema 2 | 16.006 | |
| Pay back años | 16,12 años | |

Nota: comparación realizada para un edificio con una demanda de 1.500 MWh/año y potencia de 1 MW. El COP de absorción es 0,7, y el COP en sistema de compresión es de 3,5. La cobertura solar es de un 30%, con calor residual del 60%.

Fuente: Sistemas de frío solar por absorción para la industria y para redes de frío de distrito. Aiguasol Ingeniería.

7.3.2. Refrigeración por absorción. Energía química

La tecnología de triple fase de absorción permite conseguir un almacenamiento e integración de la energía solar de forma diferente al anterior, de forma que se almacena energía química. El proceso alterna un ciclo entre tres estados de agregación –sólido, líquido y gaseoso– permitiendo una potencia continua de refrigeración o de calefacción. Estos equipos pueden operar en tres modos diferentes: carga, calefacción y refrigeración. El modo de carga almacena energía secando una sal (Cloruro de Litio - LiCl) que puede ser utilizada posteriormente cuando sea necesario. Es importante resaltar que la máquina puede cargar y descargar simultáneamente. Esto quiere decir que siempre puede recibir energía térmica y al mismo tiempo suministrar calor o frío (calefacción y refrigeración). El sistema también puede calentar simultáneamente agua caliente sanitaria (ACS) o una piscina.

Estas máquinas de absorción modular se distinguen de las máquinas estándar de absorción de tipo bromuro de litio básicamente en tres aspectos:

- Cuentan con un depósito almacén interno en cada uno de los dos acumuladores. De esta forma la máquina puede almacenar energía química con una gran densidad. Esta energía puede ser utilizada por consiguiente tanto para refrigerar como para calentar. Es importante señalar que lo que se almacena es energía química, y no energía térmica.
- Funcionan de manera intermitente con dos acumuladores o barriles en paralelo.

- Han sido diseñadas para emplear unas temperaturas relativamente bajas, con lo que está optimizado para su empleo con colectores térmicos solares. También funcionan con una temperatura estable en el interior de los acumuladores, lo que permite un uso eficaz de los colectores térmicos solares.

La máquina lleva conectados tres circuitos externos: fuente térmica (por ejemplo colectores solares), sistema de distribución de agua fría o caliente para los entramados de tubos capilares, y disipador de calor para carga y descarga. Existen equipos diseñados para resolver la climatización en viviendas unifamiliares, a base de dos barriles en paralelo, con potencia máxima de refrigeración de 20 kW y de calefacción de 25 kW, con sólo 30 W de potencia de entrada. En la tabla 6 se exponen algunos de sus parámetros. En el proceso de carga el líquido procedente de la fuente térmica ha de estar al menos a 50 °C por encima de la temperatura del disipador de calor para su carga. Al entrar en el intercambiador de calor del reactor, la solución LiCl del reactor entra en ebullición, volviendo entonces el LiCl a su forma cristalina. Al mismo tiempo se evapora el agua y se libera vapor al condensador/evaporador, donde se condensa en el intercambiador de calor con la temperatura relativamente inferior. La temperatura de carga continua máxima es de 95 °C, pero en algunos momentos se pueden alcanzar temperaturas de hasta 120 °C si los paneles solares no están bien dimensionados. En la figura 25 se muestra un ejemplo de proceso de carga, con aportación simultánea de calefacción y climatización de piscina, con equilibrio energético durante la carga. Se requieren en torno a 44 kWh para cargar un barril, proporcionando unos 33 kWh de energía. La potencia máxima es de 26 kW por barril. Al contar con dos barriles en paralelo, se obtiene 52 kW en total si se cargan a la vez. Como ejemplo de carga, si tuviéramos 83 °C desde la fuente térmica y 30 °C desde el disipador de calor, la capacidad de carga sería de 15 kW por barril. El tiempo de carga de los barriles, con la potencia antes expresada, sería de unas 3 horas.

Tabla 7

Parámetros de un ejemplo de reactor de almacenamiento de energía química por LiCl

| Modo | Capacidad almacenamiento * | Potencia máxima Capacidad ** | COP eléctrico *** | Eficiencia térmica |
|-------|----------------------------|------------------------------|-------------------|--------------------|
| Frío | 60 kWh | 10/20 kW | 714 | 68 % |
| Calor | 76 kWh | 25 kW | 1786 | 160 % |

* Capacidad máxima de almacenamiento incluyendo dos barriles.

** Capacidad de refrigeración por barril de 10 kW. Si hay dos barriles, la potencia máxima de refrigeración es de 20 kW, y la de calefacción de 25 kW.

*** Coeficiente de rendimiento: potencia de refrigeración o de calefacción en kW dividida entre la potencia eléctrica consumida. La única entrada de potencia eléctrica existente es la de los controles internos.

Fuente: Manual de ClimateWell™ Frío Solar, www.climatewell.com

En el proceso de refrigeración, cuanto mayor sea la temperatura hacia el sistema de distribución, mayor eficacia tendrá. Resulta así ideal para aplicaciones de suelos, techos o paredes radiantes en las que se utilicen temperaturas en torno a 17°C, como son los tubos capilares. El agua retorna a una temperatura superior a la del condensador / evaporador, y este calor hace que el agua del evaporador entre en ebullición, pasando el vapor al reactor, donde se condensa, diluyendo la solución de LiCl. El COP térmico está en torno a 0,68. Como ejemplo de funcionamiento, si tuviéramos una temperatura de 30°C desde el disipador de calor, y suministramos 15°C al circuito de refrigeración de tubos capilares, entonces la potencia por cada barril sería de 9 kW, en total 18 kW. Cuando se descarga un 70 % de la energía, la potencia de refrigeración será de 14 kW, 4 unidades inferior.



Fig. 25. Procesos de carga, calefacción refrigeración de un reactor Climate Well 10 de un barril. Fuente: Manual de ClimateWell™ Frío Solar, www.climatewell.com

En el proceso de calefacción se produce el fenómeno inverso a la refrigeración. La energía cargada es extraída en forma de calor. El agua retorna del sistema de distribución de los tubos capilares a una temperatura inferior a la que deja el reactor, y hace que el condensador / evaporador entre en ebullición y el vapor pase al reactor. El vapor se condensa en agua, diluyendo en una solución LiCl en el reactor. Durante la descarga, la energía térmica es extraída. En modo de carga, también puede extraerse calor mediante la conexión del condensador al sistema de distribución en el modo de carga. Cuanto menor es la temperatura hacia el sistema de distribución, mejor trabaja la máquina en modo calefacción. Resulta así ideal para aplicaciones de suelo, techo o paredes radiantes, con temperaturas en torno a 27°C. El COP térmico es de 0,85 aproximadamente. Una fuente de calor de apoyo debe emplearse para días muy fríos, o cuando no hay suficiente salto térmico en los colectores solares. Si se tiene una temperatura de 10°C desde el disipador de calor y se suministran 30°C al circuito

de calefacción por radiación, la potencia de calefacción sería de 7,5 kW

Estos sistemas se encuentran en continua investigación con el objetivo de mejorar sus rendimientos, y resolver el inconveniente de la disipación de la energía sobrante de forma eficaz y técnicamente viable. En el caso de viviendas unifamiliares, se resuelve fácilmente a través del agua de la piscina, de la cimentación o del terreno, pero en el caso de edificios de viviendas plurifamiliares la solución se complica enormemente, al no contar con los medios anteriores, o al requerir una superficie de intercambio inviable o de un coste no amortizable mediante los ahorros energéticos previstos. En la Figura 26 se muestra un esquema de principio de esta instalación, con los circuitos de distribución de agua fría hacia los tubos capilares y fan-coils. Es preciso señalar que, entre las aplicaciones que tienen los entramados capilares, se incluye su idoneidad para realizar la transferencia de energía sobrante con piscinas, cimentaciones, o el terreno.

Podemos concluir recomendando estos sistemas con energía solar térmica para climatizar edificios con sistemas de suelo, paredes o techos radiantes. Sería también recomendable el empleo de un sistema de control que regule la temperatura del agua distribuida, en función de la temperatura y humedad relativa interior. Es preciso indicar también que la fuente térmica podría conectarse también directamente al sistema de distribución, y calefactar las estancias sin necesidad de pasar por el reactor de

almacenamiento de energía química por LiCl, tal y como se ha expuesto en el apartado 7.1.

Tabla 8
Ejemplo de ahorros energéticos y calificación energética en vivienda

| Vivienda en Chiclana | Situación inicial | Calificación |
|---|-------------------------|--------------|
| 315 m2 superficie útil | | |
| Superficie de captadores solares 36 m2 | Calefacción+ACS | |
| Azimut 0° | ACS | A |
| Distribución por suelo radiante | Calefacción | E |
| Sistema por compresión, electricidad | Refrigeración | D |
| Disipación de calor por piscina | Calificación | D |
| <hr/> | | |
| Situación final con frío solar por LiCl Climate Well | Porcentaje de cobertura | Calificación |
| 315 m2 superficie útil | | |
| Superficie de captadores solares 36 m2 | Calefacción+ACS | |
| ACS | 97 % | A |
| Distribución por suelo radiante | 87 % | B |
| Refrigeración frío solar | 90 % | A |
| Cobertura total | 92 % | |
| Ahorro emisiones CO ₂ 15.000 kg/año | | |
| | Calificación | B |

Fuente: Manual de ClimateWell™ Frío Solar, www.climatewell.com

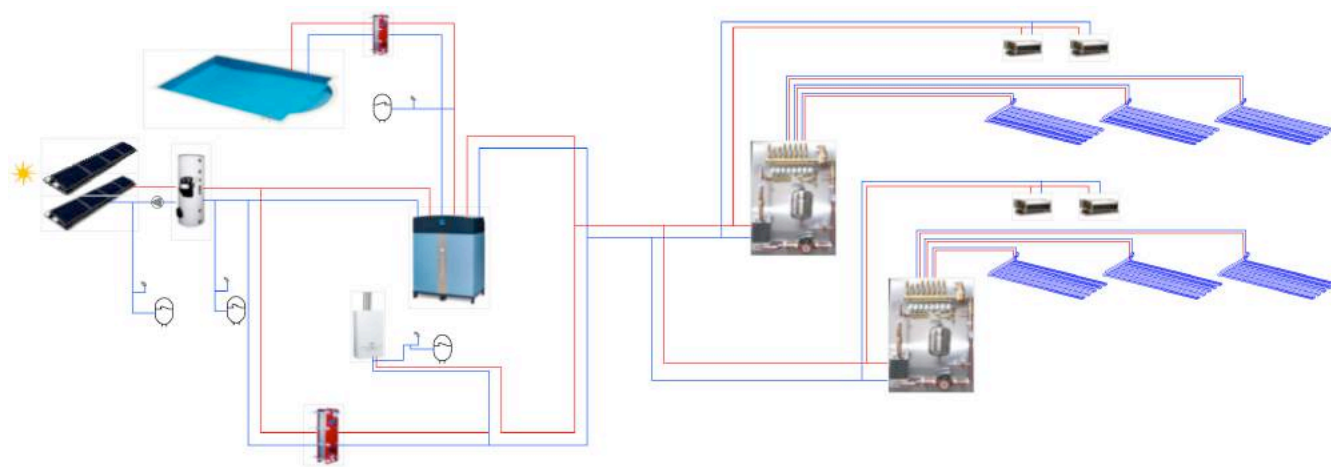


Fig. 26. Esquema de principio de instalación con acumulación de energía química por cloruro de litio.

Este sistema conlleva importantes ahorros energéticos frente a bombas de calor convencionales por compresor, ya que al carecer de éste no requiere apenas consumo de energía eléctrica. Teniendo en cuenta que la mayor parte de la energía eléctrica se produce mediante la quema de combustibles fósiles, con sus consecuentes emisiones de CO₂, estas emisiones se reducen de manera importante. Un hogar estándar español podría ahorrar con este sistema en torno a 15 toneladas de CO₂ al año. Parece razonable que las autoridades competentes deberían prestar atención a estas nuevas tecnologías, y favorecer su implantación a

través de ayudas proporcionadas a los beneficios obtenidos en cuotas de emisiones.

7.3.3. Refrigeración por adsorción

A diferencia de las máquinas de absorción, en las de adsorción para aire acondicionado y refrigeración, en vez de un absorbente líquido se utiliza un adsorbente sólido. Su ciclo de funcionamiento no es continuo y tiene una fase de carga y otra de descarga. El COP de estas máquinas se encuentra entre 0.55-0.65 y la temperatura de la fuente

caliente puede ser inferior a la de las máquinas de absorción, a partir de 55°C, lo que permite el uso de captadores solares planos.

La máquina de adsorción trabaja con agua como refrigerante y silica-gel como adsorbente. Estos equipos están constituidos por cuatro elementos: 1 evaporador, 2 cámaras adsorbentes y 1 condensador. En el evaporador, el agua a baja presión se evapora, enfriando agua de 11,7°C a 6,7°C, o a las temperaturas que se requieran, pudiendo enfriar agua de hasta 6°C a 3°C. La evaporación de agua producida, se adsorbe en una de las cámaras de adsorción mediante el deshidratante (silica gel), el cual se va saturando. Mientras, en la otra cámara de adsorción, el agua caliente pasa a través del intercambiador de calor, regenerando el deshidratante que con anterioridad había adsorbido el vapor de agua.

El agua evaporada al regenerar el deshidratante es condensada mediante el agua de refrigeración en el condensador para ser devuelta de nuevo al evaporador. El agua de refrigeración del equipo pasa por el intercambiador de la cámara de adsorción, absorbiendo la potencia cedida por la condensación del vapor de agua y después pasa a través del condensador. Mediante una torre de refrigeración se enfría hasta la temperatura necesaria para poder ser introducida de nuevo en el equipo.

7.4. El agua de mar como fuente natural energética

Si hasta ahora nos hemos referido a fuentes naturales de energía como el sol o el terreno, otras fuentes naturales como el agua de mar o aguas termales pueden ser idóneas para llevar a cabo una climatización por tubos capilares. Teniendo en cuenta que la mayor parte de la población reside en zonas próximas a la costa marítima, la posibilidad de contar con este tipo de sistemas es interesante. Si pensáramos en términos de instalación individual para una

vivienda o un edificio del sector terciario, las posibilidades serían pequeñas. Pero hay que tener en cuenta que podrían realizarse instalaciones a escala urbana, como ya se han venido haciendo en determinadas poblaciones [12], [13].

La ventaja de los sistemas que utilizan agua de mar es principalmente que ésta se encuentra, incluso a poca profundidad, a una temperatura con poca variación a lo largo del ciclo anual. En el caso del Mediterráneo, en el invierno, a una profundidad adecuada, el agua está aproximadamente entre 10°C y 13°C, por una temperatura en torno a los 18°C y 25°C en verano. En otros casos estudiados la temperatura puede fluctuar, a unos 3 m de profundidad, entre 21°C y 26°C a lo largo del verano [14]. En el caso de encontrarnos con temperaturas suaves en verano, entre 15 y 17°C, se podría llevar a cabo una distribución del agua de mar al sistema de entramados de tubo capilar, a través de un intercambiador térmico. Al no tener que disponer máquinas frigoríficas con compresor para disminuir la temperatura del agua de distribución, la reducción del consumo eléctrico es sustancial. El único consumo es el producido por las bombas de circulación, para vencer las pérdidas de carga y dotar de caudal y velocidad adecuados.

Si la temperatura fuera superior a la indicada para el refrescamiento de los espacios de los edificios, se podría conducir el agua de mar hasta una bomba de calor agua-agua. El sistema se denomina SWHP. Con un consumo de energía eléctrica moderado, se podría bajar la temperatura del agua en el evaporador hasta los valores indicados de 15°C a 17°C del agua de distribución de los circuitos. Se producirían ahorros energéticos frente a los sistemas de compresión convencionales por contar en el condensador con un medio de temperatura constante e inferior a la del aire exterior. Además, como se dijo al considerar la energía geotérmica, esta estabilidad en el condensador mejora el rendimiento y la vida útil de la bomba de calor [15].

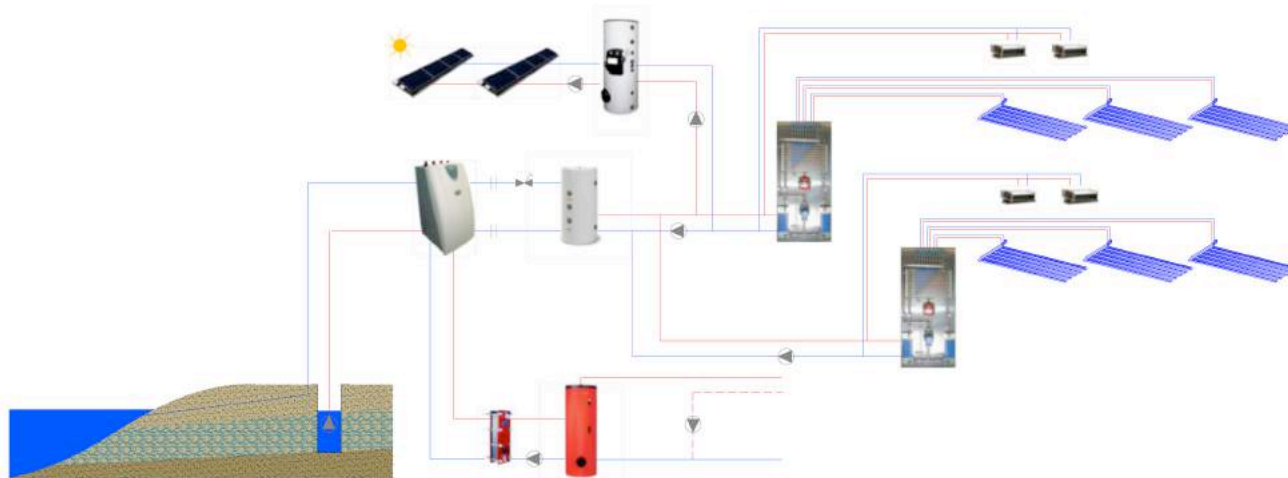


Fig. 27. Esquema de principio de instalación con distribución de agua de mar directa o para bomba de calor agua-agua.

Como decíamos al comienzo de este apartado, la distancia de la edificación a la toma de agua de mar es crítica por las dificultades de servidumbres y coste de la instalación de captación. Una posible vía es la implantación de sistemas de agua de mar combinados con geotermia como fuente para una bomba de calor agua-agua. Se denominan sistemas HSWGHP. Se trata de localizar o disponer constructivamente una capa de subsuelo permeable al agua de mar. Se realiza un pozo en un área próxima a la edificación tal que, a través de una bomba normalmente sumergida en él, el agua de mar entra por infiltración a través del lecho permeable. En función de la temperatura del agua de mar y del terreno, el agua del pozo tendrá una temperatura con la que será bombeada hasta la bomba de calor para la transferencia energética, o para ser distribuida directamente a los entramados capilares. Habitualmente, al inicio, el agua de mar está a mayor temperatura que el terreno. Entrará en el pozo a una temperatura más baja. Pero con el paso de los días y del uso de la instalación, la temperatura del terreno irá creciendo progresivamente hasta estabilizarse durante las últimas semanas del verano. Si por ejemplo la temperatura del agua de mar fuera de 21°C para ascender hasta 26°C en agosto, y descender a 24°C en septiembre, la temperatura del agua de bombeo del pozo de infiltración sería de 16°C al comienzo, para crecer y estabilizarse hasta unos 24°C. Estos valores se dan por ejemplo en la costa de China, donde se han implantado muchos de estos sistemas [16].

Hasta ahora nos hemos referido al régimen de verano. En el caso del invierno, la temperatura del agua de mar será insuficiente para distribuirla directamente en los entramados a través de un intercambiador y conseguir calefactar el edificio. Se precisará de una SWHP, con consumo de energía eléctrica en el compresor, pero con la ventaja de alcanzar valores de COP muy satisfactorios. En efecto, al tratarse de un medio con temperatura estable a lo largo del invierno, entre 10°C y 13°C en el caso del Mediterráneo, la bomba de calor robará energía al agua de mar con un excelente rendimiento, muy estable además, y con las ventajas señaladas de vida útil del equipo.

8. Proyectos

A continuación, analizaremos tres proyectos diseñados con soluciones radiantes capilares. Se han elegido tres casos ejecutados con diferentes aplicaciones de tramas capilares (aunque existen más) para comprobar que este tipo de sistema se puede adaptar a diferentes soluciones gracias a su flexibilidad. Por otro lado, esta muestra abarca también tres usos completamente diferentes (oficinas, aulas de música y hotel) de cara a comprobar los múltiples beneficios que obtenemos en todo tipo de locales.

8.1. Edificio Corporativo Gamesa

Edificio Corporativo Gamesa
Arquitectos: Vaillo + Irigaray Arquitectos
Localización: Sarriguren, Navarra
Año: 2012

Analizaremos este proyecto con el objeto de conocer las soluciones de climatización elegidas, así como sus motivos y haremos hincapié en el sistema radiante, tipos de tramas capilares seleccionadas y cómo es su aplicación.

El proyecto se ubica en un parque tecnológico denominado La Ciudad de la Innovación. El edificio se conforma como un gran cilindro de vidrio de casi 50 m de diámetro. Este diseño circular de la planta tiene el objetivo, entre otros, de optimizar el factor de forma. Esto reduce la superficie de la fachada del edificio en un 35% frente a edificaciones con una planta rectangular y similares características y en consecuencia, también los costes energéticos.



Fig. 28. Edificio Corporativo Gamesa. Fuente. Vaillo+Irigaray Arquitectos.

La instalación de climatización consta de un techo radiante capilar para frío y calor (instalación a 4 tubos) más ventilación distribuida por suelo técnico. El objetivo que condujo a elegir una instalación de este tipo fue buscar los más altos parámetros en cuanto a eficiencia energética y confort para los usuarios.



Fig. 29. Interior del Edificio Corporativo Gamesa dónde podemos diferenciar los anillos interior y exterior. Fuente. Vaillo+Irigaray Arquitectos.

La arquitectura y diseño del interior del edificio han conjugado varias soluciones capilares y de diseño. Por un lado tenemos un techo enlucido en el anillo exterior del que se descuelga una estructura metálica que tiene funciones de diseño (ocultar instalaciones y crear un determinado ambiente) y técnicas (favorecer el porcentaje de intercambio que se realiza por convección). Este anillo deja una superficie central abierta y totalmente diáfana. Por otro lado tenemos un anillo interior donde se ubican los despachos y para el que se optó por una solución capilar para un acabado de placa de yeso seca continua.

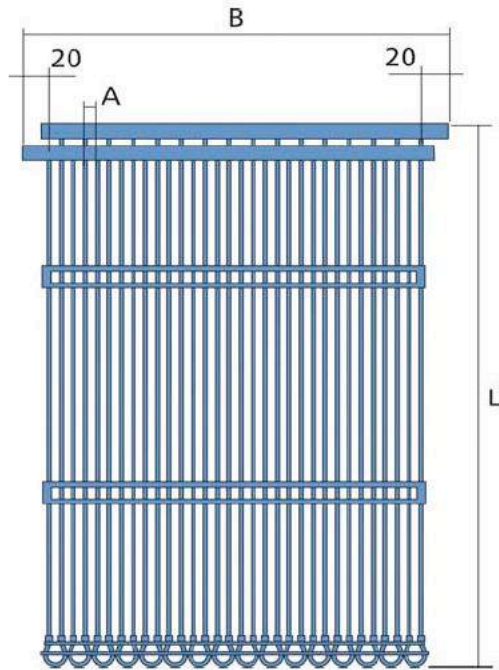


Fig. 30. Trama capilar modelo K.S15 para enlucido. A=15mm.

Las tramas capilares elegidas para el anillo exterior del edificio son el modelo K.S15. Se caracterizan por tener una separación entre tubos capilares de 15 mm. No es necesario un paso menos entre tubos capilares, ya que esos 15 mm nos permiten alcanzar una efectividad térmica superior al 98%. Esto significa que si existiera bajo el enlucido de yeso una lámina continua por la que circulara agua (lo cuál es imposible desde el punto de vista técnico y constructivo), esta alcanzaría una efectividad sólo un 2% superior a la trama capilar elegida.

Para el anillo interior de despachos y con acabado de techo realizado mediante placa de yeso seca continua, se seleccionó el modelo de trama capilar que menor separación tiene entre tubos capilares, el K.S10. El motivo es que en este tipo de solución tenemos un espesor de 13 mm de cartón yeso por debajo del capilar y el capilar está en contacto con él mediante su generatriz y no totalmente embebido como en el caso del enlucido. Por esto buscamos una trama lo más tupida posible de capilares. El análisis del montaje de este tipo de aplicación será profundizado en el segundo proyecto analizado.

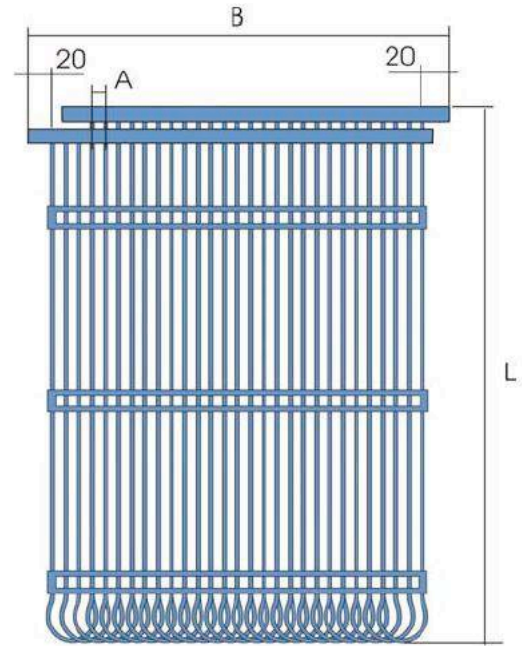


Fig. 31. Trama capilar mod. K.S10 para placa de yeso seca. A=10mm

En proyectos como el que estamos describiendo, es muy importante realizar un detallado plano de interferencias, ya que, buscamos tener la máxima cobertura radiante, pero hay que respetar una serie de espacios necesarios para la ubicación de iluminación, soporte de estructura, soportaje de instalaciones, etc. Una vez planteado el plano definitivo, cada trama capilar se fabricará a medida para cada proyecto y de las dimensiones necesarias.

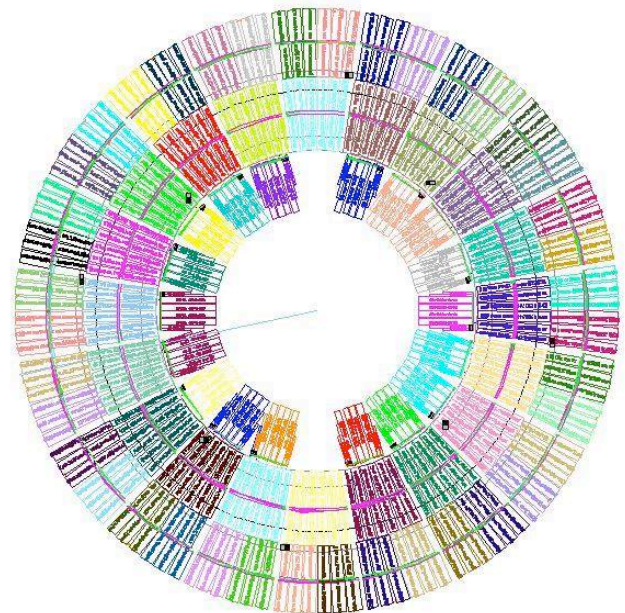


Fig. 32. Plano de distribución de zonas, circuitos y trama capilar.

El montaje y la aplicación de las tramas capilares es sencillo. En el caso del anillo exterior, las tramas capilares se montaron directamente sobre el forjado. Éste está compuesto por prelosas prefabricadas Leca. Estas tienen un recubrimiento inferior con arlita que le confiere un excelente aislamiento térmico y que se utilizó también para ubicar los colectores y no ser necesario un espesor de enlucido adicional para cubrir los capilares.

Para fijar las tramas capilares a la prelosa, se solicitó que las tramas vinieran equipadas de fábrica con una cinta de doble cara adhesiva en la zona de los separadores de los tubos capilares para facilitar el montaje. De esta manera, una vez soldados los colectores por termofusión y fijados al techo, únicamente queda estirar las tramas capilares y pegarlas con este adhesivo sobre la prelosa de hormigón.



Fig. 33. Fase de montaje de tramas capilares en Edificio Gamesa.

La siguiente fase es cubrir las tramas capilares con el enlucido de yeso (son válidos los enlucidos de yeso, así como los enlucidos de cal). Este enlucido no requiere de ningún tipo de aditivo especial y sólo se debe evitar aquellos con una granulometría muy grande que podrían llegar a dañar mecánicamente a los tubos capilares. El pequeño diámetro de los tubos capilares (3,35 mm) permite capas delgadas de enlucido (10 mm) con las que se logra una muy elevada eficiencia.



Fig. 34. Fase de enlucido del techo en Edificio Gamesa.

Una vez finalizado el montaje del techo radiante, en este caso vienen las fases de instalación del resto de componentes de distribución hidráulica, creación de circuitos, zonificación y regulación para el sistema radiante, así como todos los demás componentes que se deben instalar en techo, tanto elementos funcionales como de diseño.

El resultado final es un techo enlucido sin ninguna diferencia aparente respecto a un techo enlucido sin un sistema radiante capilar incluido.



Fig. 35. Fase de enlucido del techo en Edificio Gamesa.

La revisión de la instalación de este edificio nos da una idea clara de una aplicación y ejecución de un sistema radiante capilar en un edificio destinado a uso de oficinas cumpliendo los estándares más altos en cuanto a confort de sus usuarios, eficiencia energética y combinando estos con diseño y funcionalidad.

8.2. Conservatorio de Navarra

Conservatorio Profesional y Superior y Sede de la Orquesta Sinfónica de Navarra
Arquitectos: TYM Arquitectos
Localización: Pamplona, Navarra
Año: 2011



Fig. 36. Conservatorio Profesional y Superior, Sede de la Orquesta Sinfónica de Navarra.

Analizaremos este proyecto con el objeto de conocer las soluciones de climatización elegidas, así como sus motivos y haremos hincapié en el sistema radiante, tipos de tramas capilares seleccionadas y cómo es su aplicación.

El edificio se ubica en el barrio pamplonés de Mendabaldea. El proyecto presenta una serie de volúmenes rectangulares y paralelos. La ocupación de los volúmenes se efectúa en planta sótano, baja y dos alturas. Esta distribución responde eficientemente a la búsqueda de luz natural y junto con una jerarquización de usos, a reducir los recorridos verticales de los usuarios.

La instalación de climatización consta de un techo radiante capilar para frío y calor (instalación a 4 tubos) más ventilación (instalación a 4 tubos). La elección de una solución de climatización radiante capilar en este proyecto, se basó en conseguir un entorno climatizado sin ruidos y sin corrientes de aire (el aire introducido es sólo el necesario para tener una calidad de aire interior sano, 100% aire exterior, a temperatura muy moderada y a muy baja velocidad), además de optimizar el espacio disponible y el consumo energético.

Existen varios locales de los edificios que conforman este proyecto que han sido climatizados con sistemas de aire por el tipo de uso y ocupación de los mismos. Estas excepciones contemplan las zonas comunes, auditorio, determinadas salas en planta baja (biblioteca, informática, etc.) y la sala principal de ensayo de la sede.



Fig. 37. Detalle del techo con acabado de placa de yeso seca perforada en Conservatorio de Navarra.

La arquitectura y condiciones de diseño de los locales a climatizar con el sistema radiante, condujeron a elegir una solución por techo con un acabado de placa de yeso seca acústica para alcanzar las condiciones necesarias para el uso de los diferentes locales.

Las tramas capilares elegidas para este tipo de construcción de techo son el modelo K.S10, con una separación entre capilares de 10 mm. El ancho de la trama se modulará al hueco libre que nos deja la perfilera secundaria de la placa de yeso seca.

En proyectos con techos de placa de yeso seca, un factor que determinará la cobertura final de trama capilar es la modulación de la estructura de placa de yeso seca. Se debe decidir cuál será esta distancia buscando el compromiso entre el modelo de placa elegido y las indicaciones del fabricante y el objetivo de conseguir la máxima área activa posible. Con la modulación elegida se preparan y dibujan todas las tramas del proyecto y los planos de interferencias con iluminación, ventilación, incendios, etc



Fig. 38. Plano de distribución de zonas, circuitos y trama capilar en Conservatorio de Navarra.

La instalación y aplicación de las tramas capilares es sencilla. La primera fase contempla el montaje de la perfilera necesaria para la formación de la estructura que soportará la placa de yeso seca. Esta perfilera no difiere en absoluto de la que se montaría para un techo de placa de yeso seca sin tramas capilares (se deben evitar los perfiles en forma de diente de sierra que podrían llegar a dañar a los capilares). En este caso, por el tipo de placa acústica perforada elegida, se proyectó una separación entre ejes de perfiles de 400 mm (esta separación suele variar entre 400 mm y 600 mm dependiendo del tipo de placa elegida). En la Fig.39 se pueden apreciar también los carriles destinados a la instalación de las luminarias seleccionadas para este tipo de aula.

No es necesario diseñar la iluminación mediante luminarias como las elegidas en este proyecto. Se puede integrar cualquier tipo de luminaria suspendida, de superficie o empotrada. Las tramas serán separadas para dejar el espacio necesario para la luminaria, que posteriormente se instalará como en cualquier otro techo de placa de yeso seca.

En las aplicaciones de este tipo es necesaria la utilización de un aislante colocado entre los perfiles de la placa de yeso seca. No es necesaria ninguna especificación concreta para el aislamiento, aunque generalmente se utiliza lana de roca de unos 30 mm de espesor y con una de las caras de aluminio, ya que este mejora algo el rendimiento. Éste aislamiento tiene una doble función, ya que, por un lado evita pérdidas de calor hacia el falso techo y por otro lado permite que exista un buen contacto entre las tramas capilares y la placa de yeso seca. El buen contacto asegura que la transferencia de calor desde la

superficie del techo al agua (que se realiza por conducción térmica), se efectúa de manera correcta.



Fig. 39. Fase de montaje de perfilera para placa de yeso seca en Conservatorio de Navarra.

La conexión de los colectores de las tramas y las líneas de distribución hidráulica se realiza por termofusión, y una vez tengamos todas las tramas preparadas, sólo nos queda estirarlas bajo el aislamiento. En este caso no se utilizó cinta de doble cara (como en el proyecto anterior), sino bridas y cinta de plata para su fijación.



Fig. 40. Fase de montaje de aislamiento en Conservatorio de Navarra.

Un punto de suma importancia y que no había sido comentado hasta el momento, es la fase de pruebas. Existe un protocolo de pruebas con diferentes fases y espacios de tiempo a distintas presiones, que nos asegurará la perfecta estanqueidad del circuito hidráulico antes de la fijación de las placas de yeso. Una vez fijadas las placas de yeso (proceso idéntico al de cualquier techo de placa de yeso seca), la instalación permanecerá con 3 bares de presión durante el resto de la obra. El motivo es detectar cualquier posible fuga que se produzca por una actuación externa, para que sea reparada inmediatamente.



Fig. 41. Tramas capilares estiradas en Conservatorio de Navarra.



Fig. 42. Fase de montaje de placa de yeso en Conservatorio de Navarra.



Fig. 43. Aspecto de un aula con el techo terminado en Conservatorio de Navarra.

Una vez finalizado el montaje, la aplicación de pasta para las juntas o pintado del techo, no difiere respecto a cualquier techo de placa de yeso. El aspecto exterior no nos indicaría que existe una instalación de tramas capilares que nos convierte el paramento en un paramento radiante.

La revisión de la instalación radiante del Conservatorio y Sede de la Orquesta sinfónica de Navarra, nos muestra la aplicación de una solución capilar destinada a un uso docente y profesional en el que un ambiente silencioso y con un alto nivel de confort es primordial. Además de esto conseguimos niveles de consumo de la instalación de climatización radiantes muy contenidos, algo imprescindible en un conjunto de edificios con una superficie superior a los 6.000 m² de superficie total.

8.3. Hotel Alma Pamplona

Alma Pamplona – Hotel Muga de Beloso

Arquitectos: TZ Arquitectos

Localización: Pamplona, Navarra

Año: 2010



Fuente. Hotel Muga de Beloso.

Fig. 44. Alam Pamplona, Hotel Muga de Beloso.

Analizaremos este proyecto con el objeto de conocer las soluciones de climatización elegidas, así como sus motivos y nos centrándonos en el sistema radiante, analizaremos las ventajas que aporta en un proyecto de esta tipología.

El edificio está localizado a unos minutos del centro de Pamplona. Su diseño le confiere un aire modernista en los alrededores de una ciudad histórica. Se ha logrado en habitaciones y suites una sencilla pureza de líneas mezclados con el uso de materiales nobles. Pero en este hotel el diseño no va en detrimento de las comodidades y la funcionalidad.

En un proyecto de estas características el sistema de climatización es un factor clave, ya que es una de las llaves para conseguir el máximo confort por parte de los huéspedes en sus estancias. Con este claro objetivo se decidió equipar las 10 suites del hotel con un sistema de climatización radiante capilar.

Los beneficios que vamos a encontrar en un proyecto destinado a uso como hotel con un sistema radiante son claros. Por un lado evitamos corrientes de aire que puedan penalizar el confort. Por otro reducimos la sequedad en el ambiente que provocan los sistemas de aire forzado. Y además de esto, conseguimos temperaturas mucho más homogéneas, sin focos excesivamente fríos o calientes que

mermen nuestra satisfacción y sin molestos ruidos que interfieran en nuestro descanso. Como hemos indicado en el punto dedicado al confort, los resultados indican que, la combinación de estos factores, permite a la solución radiante ser la mejor opción en niveles de satisfacción ligados con el confort.

La instalación de climatización de las 10 suites analizadas en este proyecto, cuenta con un techo radiante para frío y calor (instalación a 3 tubos) más ventilación (instalación mediante un fan-coil por habitación a 4 tubos). La elección de una solución de climatización radiante capilar en este proyecto, se basó en dotar a las habitaciones del máximo bienestar térmico y salubridad.

La arquitectura y objetivos en el diseño de los espacios seleccionados hacía necesario un techo de placa de yeso seca continua que permitiera el paso de instalaciones por su faso techo, la creación de fosas de iluminación y una limpieza y continuidad que se alineara con el objetivo de calidez y pureza interior.

Las tramas capilares elegidas para este tipo de construcción de techo son el modelo K.S10, con una separación entre capilares de 10 mm. El ancho de la trama, como ya hemos comentado anteriormente, se modula al hueco libre que nos deja la perfilería secundaria de la placa de yeso seca. En este caso, por el tipo de placa elegida y su montaje, la separación entre ejes de perfiles secundarios es de 600 mm. Esto permite seleccionar tramas de 550 mm de ancho y conseguir una cobertura capilar algo superior que con modulaciones de perfilería menores.

Cada local cuenta con su plano de trama, las medidas de éstas, modelo y cómo se realiza la conexión entre tramas. También se indican los caudales y circuitos. Cada trama será fabricada y empaquetada de acuerdo a los planos e información facilitada. No sólo se busca eficiencia en la solución radiante, sino también en el proceso de instalación, ya que es el que permitirá al sistema rendir según los parámetros de diseño proyectados.

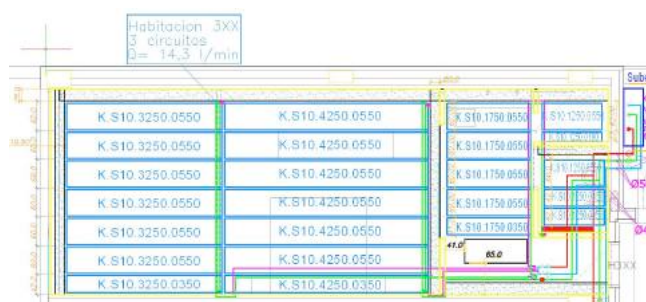


Fig. 45. Plano de trama capilar en Hotel Muga de Beloso.

El proceso para la instalación y montaje del techo radiante capilar, es similar al mostrado en el proyecto anterior. Sólo cambia el tipo de placa de yeso seca seleccionada y la modulación ente perfiles secundarios que ya hemos explicado. En la figura 46 nos encontramos con una fase intermedia del montaje. Observamos las tramas ya soldadas (por termofusión) en la parte inferior de la imagen, el aislamiento montado parcialmente y los dos

sprinklers que serán integrados en el techo de la habitación, junto con un detector de incendios (a la derecha de la imagen vemos el macarrón del que asoma un cable color rojo encargado de la señal de incendios).



Fig. 46. Fase de montaje en Hotel Muga de Beloso.

Como ya hemos comentado, después de realizar el montaje completo y una vez realizado el protocolo de pruebas de presión que indica el fabricante en sus instrucciones, se procede a la colocación de las placas de yeso seca, sellado de juntas y pintado del techo. El resultado es el que observamos en la Fig. 47 y el único indicativo de que nos encontramos en una habitación con un techo radiante capilar, son las figuras y planos que hemos presentado antes de estas líneas.

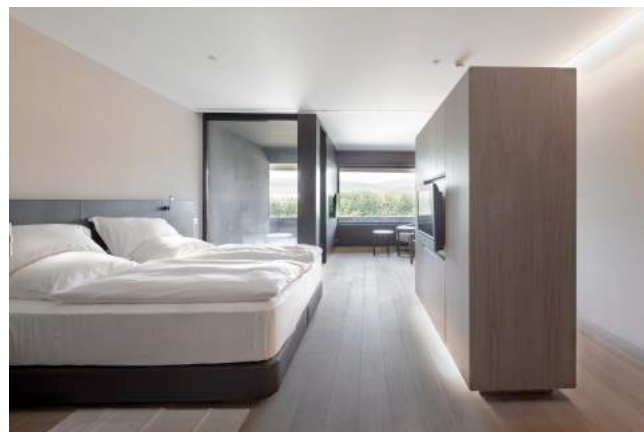


Fig. 47. Aspecto de una suite del Hotel Muga de Beloso.

La revisión de la instalación radiante capilar del Hotel Muga de Beloso nos muestra lo idóneo de la aplicación de este tipo de sistemas en usos como hoteles, residencias, hospitales y viviendas, donde, además de unos objetivos claros de ahorro energético y espacio disponible, buscamos un ambiente en el que el confort y el respeto a la salud son objetivos claros. En casos como el analizado la arquitectura cuenta con una herramienta que le permite evitar

radiadores, conductos, elementos terminales, etc. que puedan alterar o condicionar la estética del local.

Después de una mayor carga teórica a lo largo del capítulo, la exposición de los tres proyectos recoge la aplicación de la información recogida en los primeros apartados, a casos prácticos reales. Éstos no contemplan la totalidad de posibles soluciones, que quedarían pendientes los techos climáticos desmontables, las aplicaciones en pared y los suelos radiantes, pero recogen de manera clara los principales beneficios y cómo se realiza la aplicación, de los sistemas radiantes capilares.

9. Conclusiones

Los sistemas de climatización por superficies radiantes mediante tubos capilares de polipropileno conllevan numerosas implicaciones que los hacen más eficientes y sostenibles que los sistemas convencionales. Cabría destacar en primer lugar su excelencia en el confort que produce en los usuarios, ya que permiten una adecuada cesión de calor corporal manteniendo el aire interior prácticamente en reposo, un bajísimo nivel sonoro al no trabajar con aire forzado, y un gradiente de temperatura del aire interior muy próximo a la curva ideal. El porcentaje estadístico de personas insatisfechas para un sistema radiante más ventilación es de un 5%, el óptimo alcanzable, frente a una variación entre el 13 y el 23 % en otros sistemas.

En segundo lugar es un excelente sistema que proporciona sustanciales ahorros en el consumo energético. Al utilizar agua como materia de transporte de energía en el sistema, debido a su calor específico muy superior al del aire, con mucho menor volumen requerido, se producen importantes ahorros en el consumo de energía eléctrica de las bombas, hasta seis veces menor. Además, al trabajar con temperaturas del agua moderadas, las enfriadoras de agua y otros sistemas de producción de frío y calor requieren un consumo energético inferior frente a sistemas de aire forzado, fan-coils, radiadores, suelos radiantes, etc. Al trabajar con temperaturas del agua entre 15 y 17°C en verano y 29 a 35°C en invierno, fuentes de energía renovables, como colectores solares térmicos, sistemas de captación geotérmica o sistemas de distribución de agua de mar, se adecuan perfectamente al sistema. Los sistemas de frío solar, que aprovechan la energía de radiación del sol como fuente de calor en sistemas de absorción, adsorción o almacenamiento de energía química (sistemas de LiCl), son óptimos para refrigerar en verano, con una importante reducción en el consumo energético, con COP eléctrico de hasta 714. La reducción de consumo de energía primaria de todos estos sistemas, principalmente eléctrica, y de emisiones de CO₂, son particularmente importantes en esos casos, mejorando sustancialmente la calificación energética de los edificios.

En tercer lugar, al tratarse de sistemas que facilitan el intercambio energético con el usuario mayormente por radiación, permiten que la temperatura interior de los espacios sea hasta tres grados superior en verano e inferior en invierno. De esta forma, las cargas térmicas de

transferencia de calor a través de los cerramientos, que son directamente proporcionales al salto térmico entre temperatura interior y exterior, disminuyen aproximadamente un 25 %, consiguiéndose de esta forma una mayor eficiencia energética en las envolventes y el consiguiente ahorro energético.

Los sistemas de climatización por tramas capilares admiten numerosas disposiciones constructivas, todas ellas muy eficientes. La posibilidad de implantación en cualquier tipo de superficie, pared, suelo o techo, con curvaturas o sin ellas, con variadísimos materiales de acabado, en falsos techos suspendidos, trasdosados de cartón-yeso u otros materiales, hace que sean enormemente flexibles. Reducen al máximo las inercias térmicas propias de sistemas radiantes convencionales, por lo que entran en régimen de servicio poco tiempo después de su activación y reducen horas de funcionamiento y el consumo. Esta ventaja es significativa frente a sistemas radiantes de tubo grueso con distribución de agua fría o caliente.

Por todo ello son sistemas especialmente respetuosos con la salud y el medioambiente.

Glosario

Absorbedor: El cuerpo en que el absorbente absorbe el refrigerante gaseoso liberando el calor de vaporización.

Absorbente: Una sustancia que tiene alta afinidad al refrigerante, y por tanto facilita la absorción del mismo.

Carga térmica: la cantidad de calor que hay que suministrar (calefacción) o extraer (refrigeración) para mantener la temperatura y humedad del aire de dicho espacio constante e igual a una valor previamente fijado.

Coefficiente de eficacia frigorífica: la ratio entre la potencia frigorífica producida en una bomba de calor frente a la energía eléctrica absorbida en el compresor.

Coefficiente de rendimiento: la ratio entre la potencia calorífica producida en una bomba de calor frente a la energía eléctrica absorbida en el compresor y otros dispositivos de la máquina.

Condensador: El cuerpo en que el refrigerante condensa liberando el calor de vaporización que tiene que ser evacuado.

Conductividad térmica: propiedad de los materiales que refleja su capacidad para conducir el calor.

Emisividad: es una propiedad radiante que refleja la relación entre la radiación emitida por la superficie (gris) a una temperatura dada y la radiación emitida por el cuerpo negro a la misma temperatura.

Evaporador: El cuerpo en donde el refrigerante evapora robando calor de su entorno produciendo así refrigeración

Factor de forma entre dos superficies: es la fracción de radiación que sale de una superficie y llega directamente a la otra.

Ganancias (pérdidas) térmicas: los flujos de calor que entran (salen) del volumen de control definido por los límites físicos establecidos.

Infiltraciones: entradas y salidas de aire en el edificio no controladas, debidas a la permeabilidad de la envolvente.

Refrigerante: Un fluido que, utilizando calor de vaporización, transporta calor entre dos cuerpos.

Regenerador: El cuerpo donde el absorbente se separa del refrigerante a partir de calor.

Temperatura operativa: temperatura uniforme de un recinto imaginario en el que el cuerpo intercambia el mismo calor seco (sin tener en cuenta las cargas latentes) por radiación y convección que en un mismo ambiente real.

Temperatura radiante media: temperatura resultante de la semisuma de las temperaturas medias superficiales de cada paramento de un espacio, multiplicada por el correspondiente factor forma.

Transmitancia térmica de un cerramiento: es la inversa de la resistencia térmica total, habiendo tomado para los coeficientes superficiales de convección-radiación valores normalizados.

Listado de acrónimos y abreviaciones

HVAC: Heating, ventilation, air conditioning.

COP: Coefficient of Performance. Coeficiente de rendimiento

EER: Energy efficiency ratio. Coeficiente de eficacia frigorífica

SWHP: Seawater heat pump systems

HSWGHP: Hybrid seawater-geothermal heat pump systems

SPF: Rendimiento medio estacional

CSPF: Rendimiento medio estacional de refrigeración

HSPF: Rendimiento medio estacional de calefacción

CPC: Compound Parabolic Collector

PPD: Predicted Percentage of Dissatisfied

PMV: Predicted Mean Vote

Referencias

- [1] American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers. Handbook of Fundamentals. ASHRAE. Atlanta, 2010.
- [2] Beka. (2000). *Technical information G0*. Beka Heiz-undKülmatten. Berlín.
- [3] Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE). ITC. 02.2.1.
- [4] Stetiu, Corina, Lawrence Berkeley National Laboratory (1999). Energy and peak power savings potential of radiant cooling systems in US commercial buildings. *Energy and Building*.
- [5] Patente de nº solicitud P201001626. Panel de Acondicionamiento Térmico Cerámico. Víctor Echarri (UA), Elena Oviedo (ASCER) y Vicente Lázaro (ITC).
- [6] Real Decreto 314/2006 por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación. CTE. Ministerio de Vivienda, Gobierno de España, 2006.
- [7] Simulaciones y Proyectos, S.L. (2009). Estudio de viabilidad de los sistemas: climatización invisible Uponor y Sistema convencional mediante fancoils. http://www.uponor.es/~media/Files/Uponor/Spain/Estudios/Informe_Hotel_baja.pdf.
- [8] Gosnell, J., Minne, J-P (1998). Radiant cooling systems and applications. p.31. *The demonstration component of the Joule-Thermie programme, European Commission*.
- [9] Ortega, M., Ortega A. (2001). Calefacción y refrescamiento por superficies radiantes. Paraninfo, Thomson Learning, Madrid, p.83
- [10] Directiva Europea de Fomento del Uso de Energía Procedente de Fuentes Renovables, de 23 de enero de 2008.
- [11] Zamora, Miguel. (2008). Empleo de bombas de calor acopladas a intercambiadores geotérmicos: Proyecto Geocool. *Montajes e Instalaciones. Revista técnica sobre la construcción e ingeniería de las instalaciones*, 38 (426): 66-72.
- [12] Haiwen, S., Lin, D., Xiangli, L. (2010). Quasi-dynamic energy-saving judgment of electric-driven seawater source heat pump district heating system over boiler house district heating system. *Energy and Buildings*, 42: 889–895.
- [13] Shu Haiwen, Duanmu Lin, Li Xiangli, Zhu Yingxin. (2010). Energy-saving judgment of electric-driven seawater source heat pump district heating system over boiler house district heating system. *Energy and Buildings*, 42: 889–895.
- [14] Li, Z., Songtao, H. (2006). Research on the heat pump system using seawater as heat source or sink. *Building Energy&Environment* 25 (3): 34–38.
- [15] Kavanaugh, S.P., Rafferty, K. (1997). *Ground-source heat pump: design of geothermal systems for commercial and institutional buildings*. ASHRAE Inc.

Bibliografía

AAVV. *Proyectos emblemáticos en el ámbito de la energía geotérmica*. Dirección General de Industria, Energía y Minas. Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid.

Hernández_Minguillón, R., Irulegi, O., Aranjuelo_Fernández-Miranda, M. (Eds.). (2012). *Arquitectura Ecoeficiente* (Tomo I, 338 págs.). San Sebastián, España. Servicio Editorial de la UPV/ EHU. <http://www.masterconstruccionsostenible.org/descarga.html>

Herrero Fuerte, M. (2008). Bombas de calor para la climatización por suelo radiante/refrescante. *Montajes e Instalaciones. Revista técnica sobre la construcción e ingeniería de las instalaciones*, 38 (426): 80-84.

Jie Yu, Huan Zhang*, Shijun You. (2012). Heat transfer analysis and experimental verification of casted heat exchanger in non-icing and icing conditions in winter. *Renewable Energy*, 41: 39-43

Manual Técnico dm climatización. Climatización tranquila. Dynamobel.com

Monné, C., Alonso, S., Palacín, F. (2011). Evaluación de una instalación de refrigeración por absorción con energía solar. *Información Tecnológica*, 22 (3): 39-41.

Okamoto Satoru (2006). A heat pump system with a latent heat storage utilizing seawater installed in an aquarium. *Energy and Buildings*, 38:121-8.

Sala Lizarraga, J.M.P., *Transmisión de calor en edificios*, en Hernández_Minguillón, R., Irulegi, O., Aranjuelo_Fernández-Miranda, M. (Eds.). (2012). *Arquitectura Ecoeficiente* (Tomo I, Cap. 2.). San Sebastián, España. Servicio Editorial de la UPV/ EHU. <http://www.masterconstruccionsostenible.org/descarga.html>

Song Young-hak, Akashi Yasunori. (2007). Effects of utilizing seawater as a cooling source system in a commercial complex. *Energy and Buildings*, 39: 1080-7.

Webgrafía

<http://www.uponor.es>

<http://www.masterconstruccionsostenible.org>

<http://www.climatewell.com>

<https://www.beka-klima.de/en/>

<http://www.beka-klima.es/apps/wa1/>

Premisas para un proyecto de arquitectura y urbanismo más ecoeficiente

Premises for a more Eco-efficient Design in Architecture and Urbanism

Fernando Bajo Martínez de Murguía ^{a*}

^a Dr. Arquitecto. Grupo de Investigación CAVIAR. Área de Proyectos Arquitectónicos. Dpto. de Arq^o. E.T.S. de Arquitectura, Universidad del País Vasco

Resumen

Si de verdad perseguimos una calidad de vida que tenga sentido en virtud de su sostenibilidad, es importante reconsiderar los procesos de diseño tanto en la práctica de la arquitectura como en la del urbanismo. Porque su éxito o fracaso puede devenir desde su primer enfoque. A lo largo de la historia, y producto de situaciones diversas, podemos detectar propuestas inteligentes que consiguen grandes resultados aplicando muy pocos medios. Aprovechando las potencialidades que se desprenden de elementos primarios como son el agua o el viento. Debiéramos tener en cuenta que algunos de los mejores ejemplos de la arquitectura y el urbanismo sostenibles juegan ejemplarmente con estos elementos primarios. Además, sus maneras de hacerlo pueden combinarse con otras para alcanzar resultados más eficientes. Actualizando el conocimiento que transfieren mediante el uso de una tecnología capaz de satisfacer nuestras necesidades modernas. Probablemente este sea un camino interesante para el nuevo paradigma que buscamos. Así podemos destacar algunos de estos ejemplos...

Palabras clave: Diseño Sostenible, Materiales primarios, La forma del Agua y el Viento, Arquitectura y Sentido, Escenarios contruidos con Inteligencia

Abstract

If we pursue a real and sustainable quality of life that makes sense, it is important to reconsider the ways of developing our designs in architecture and urbanism twice. Because from the very first steps we can lead them to their fail or success. Along the road of history, and in many different situations, we can focus on smart proposals achieving great results using very few means. Taking advantage of the potentials coming out of primal elements such as water and wind... We should be aware that some of the best examples in urban or architectural sustainability deal with these simple elements, and are already invented. Besides, they can be combined with others in terms of reaching a more efficient scenario, updating through technology their knowledge to today's needs. Probably this is an interesting way of truly turning out the new paradigm we are seeking. We can highlight some of those case studies...

Keywords: Sustainable Design, Raw Building Materials, The form of Water and Wind, Making Sense in Architecture, Smart Built Scenarios

1. Introducción

La intención de este capítulo no es otra que la de reflexionar algo más acerca del alcance que la arquitectura y el urbanismo ecoeficientes tienen en nuestras vidas. No como descubrimiento de dimensiones absolutamente novedosas, sino más bien como reconocimiento de la sensatez de actitudes y soluciones que muchas veces ya conocemos. Porque paradójicamente, podemos invertir esfuerzos en la reinención de aquello que ya está inventado, y probablemente (quizás tan solo por desconocimiento) perder tiempo y esfuerzo sin avanzar en

lo verdaderamente importante: algo así como optimizar y adaptar todo lo que ya sabemos con el fin de procurar un mundo cada vez más sensato y mejor, aplicando las tecnologías que actualmente disponemos a los conocimientos ya adquiridos. Dando los pasos hacia adelante que representan aquellos avances necesarios para incrementar la calidad de nuestras vidas, a la vez que reduciendo la presión y el impacto negativo que ambas disciplinas pueden generar fácilmente sobre el medio. Así como el gasto innecesario de energía de nuestro intento.

Concretando algo más, se trata en primer lugar de aplicar el máximo conocimiento a la hora de conseguir una

* fernando.bajo@ehu.es

Citar como: Bajo_Mtz_de_Murguía, F. (2019). Premisas para un proyecto de arquitectura y urbanismo más ecoeficiente. En R. Hernández_Minguillón, O. Irulegi, M. Aranjuelo_Fernández-Miranda (Eds.), *Arquitectura Ecoeficiente* (Tomo II, pp. 98 –112). San Sebastián, España. Servicio Editorial de la UPV/EHU

ecoeficiencia que pasa inicialmente por la propia labor de proyectar, anterior a la de aplicar cualquier medida correctora. Así, un análisis crítico de la situación y sus precedentes puede facilitar un correcto enfoque que consumirá menos recursos desde la fase inicial de su planteamiento. Para ello, la puesta en común de experiencias, datos, y procedimientos entre empresas, academias y profesionales es de capital importancia, pues todos podremos beneficiarnos de una sabiduría común destinada a comprender, y por lo tanto a querer, cuidar y respetar nuestro entorno. Es decir, se hace necesario pasar por un primer estadio que no es otro que el de aunar esfuerzos. Argumentando en sentido contrario, es preciso insistir en que la individualidad, por lo menos tanto en la arquitectura como en el urbanismo, resulta bastante poco eficaz. Por lo que un primer paso hacia la ecoeficiencia pasa más por compartir conocimiento de forma colectiva que por inventar aisladamente. Evolucionando del viejo sistema de competición paralela hacia el esfuerzo tendente a configurar un nuevo estatus de participación sabia, necesitada de un liderazgo adecuado, y cuyas consecuencias políticas serán sin lugar a dudas de capital importancia. Aquéllas que marcarán nuestro destino y calidad de vida en los próximos años.

Pero ¿por dónde podemos comenzar para garantizar este proceso de reconsideración tan obvio? Quizá por los elementos básicos aparentemente bien conocidos que configuran nuestro entorno, y que desde que el hombre despierta a su consciencia integran el marco físico en el que se desenvuelve. Aquellos que también en virtud de una falta de respeto hacia el medio y una sobreexplotación desmedida, hemos dejado deteriorarse hasta situaciones de verdadera emergencia: el agua, el aire, y la tierra que nos rodean.

El objetivo del texto es recuperar su importancia a la hora de practicar un diseño arquitectónico y urbanístico eficaz y sensato.

Tras una pequeña introducción contextual de lo que significa el objetivo último de la investigación y del grupo en el que se desarrolla, se propone un índice argumental que desde una defensa de los procesos sencillos como punto de inflexión, defiende al urbanismo sostenible como primer paso necesario para lograr una arquitectura ecoeficiente. A partir de este estadio, el agua, y más tarde el viento, se configuran como ingredientes primarios y de sencilla aplicación a la hora de proyectar con sensatez. Apuntalando en cada apartado específico dichas hipótesis mediante el análisis de diferentes casos de estudio ejemplares que a lo largo de la historia así lo demuestran.

Así, y para el agua como factor clave para una arquitectura y urbanismo más ecoeficiente, se parte de los denominados “viajes del agua” o qanats para continuar con el ejemplo eterno de la Mezquita de Córdoba. Como casos actuales y en curso se exponen los del Plan Maestro de Revitalización del LA River en California, así como la restauración de parte de las riveras del canal del *downtown* de Chicago, que comparten el interés por explorar el potencial de lo que podríamos denominar como

infraestructura verde dentro de dos megaciudades de referencia.

Respecto del viento, el recorrido propuesto en vez de cronológico es escalar, partiendo de su impensada influencia en ciudades de trama regular como Chicago o Nueva York, para terminar reflexionando sobre su posible incidencia en proyectos experimentales de escala doméstica que pueden llegar a transformar nuestro enfoque de la distribución de la vivienda convencional. El aire en movimiento como posible motor de cambios tipológicos residenciales.

Un capítulo breve de conclusiones que resumen las ideas defendidas remata el texto.

2. El enfoque de CAVIAR; calidad de vida en arquitectura vs buena vida

A pesar de lo extraño que pueda parecer el nombre de CAVIAR como grupo de investigación, es interesante hacer una reflexión pertinente sobre el mismo que tiene mucho que ver con las ideas que aquí se intentan defender. Calidad de vida en la arquitectura reclama la CALIDAD DE VIDA con mayúsculas. Haciendo imprescindible la distinción entre la misma y lo que vulgarmente llamamos buena vida. Porque sobre todo en los países meridionales tendemos a confundir calidad de vida con buena vida, cuando en realidad no son solo diferentes, sino que conllevan procesos de comportamiento muchas veces opuestos. La buena vida que podamos llegar a tener se identifica por lo general con el derroche, el exceso de gasto, y un consumo innecesario que sin embargo a la larga provoca hastío y malestar. Mientras que la calidad de vida, que sin embargo sí procura un bienestar lejano de todo lo excesivo, supone una optimización del gasto: fomentando cierta austeridad, el consumo controlado y responsable, así como una serie de buenas prácticas que a veces son denostadas desde la perspectiva de la buena vida...

Si pensamos que desde la arquitectura y el urbanismo ECOEFICIENTES podemos facilitar nuevos marcos de felicidad, e incluso otras maneras de habitar más equilibradas con el medio ambiente, hemos de insistir también en que éstas se hallarán sin duda allá donde se ejerza algún tipo de contención compartida. Aplicando la lógica del sentido para obtener una verdadera calidad de vida para todos (que no una buena vida tan solo para algunos), para lograr no solo una menor presión sobre el entorno, sino también una mayor solidaridad con nuestros semejantes. Es decir que ecoeficiencia y equilibrio también tienen mucho en común. Y ambos comparten un trabajo en la misma dirección, sensible a las demandas reales de una sociedad que desea calidad de vida universal, y no simplemente buena vida individual. Siendo interesante identificar algunos de sus aspectos compartidos a través del análisis de ciertos ejemplos existentes, distintos en épocas y también en escala, que como casos de estudio así lo demuestran...

3. Lo que parece claro es que hoy día lo eficiente trata de dar más por menos

Superados el *Less is more*, el *Less is a bore*, y el *Less for less* (y otros tantos lugares comunes ya obsoletos que obedecen más a la idea de buena vida antes expresada que a la verdadera calidad de vida), en el escenario de mayor equilibrio ambiental y social anteriormente defendido, y que ya estamos aventurando como inevitable, se hace necesario invertir los términos. Es decir, procurar el *More for less*: dar más por menos¹.

¿Pero cómo? Y antes que nada ¿por qué?

Porque en arquitectura y en urbanismo el “menos” demanda sobre todo menos recursos, menos energía, menos consumos, menos residuos y menor presión sobre el entorno. Menos mantenimiento, problemas, y también menos proyección mediática... Y sin embargo, no menos bienestar. Quizá más bien al contrario, ya que nos permite en primer lugar y como gran ventaja disponer de más tiempo. Acercándonos claramente a la calidad de vida antes referida, sencilla, austera, pero sin embargo satisfactoria y eficiente.

Por el contrario el “más” que se defiende obliga a ofrecer cada vez más confort sostenible o bienestar real, mayor eficiencia, más durabilidad, más diversidad, más variedad de opciones de uso que otorgan mejores condiciones, así como más libertad... Y sobre todo más sensatez, y de nuevo paradójicamente, más calidad de vida bajo los nuevos parámetros que nos afectan. Porque además “La sostenibilidad consiste en construir pensando en el futuro” (Piano 2010, p.18).

También podemos identificar una serie de características físicas y sensoriales de estos menos y mases, así como ejemplos que de una manera clara demuestran la validez de esta necesaria inversión de una de las máximas más famosas de la arquitectura moderna...

4. Ante un nuevo paradigma

Todos coincidimos en que el escenario que vendrá detrás de los momentos convulsos que vivimos marcará una clara diferencia con el actual. Probablemente en muchos más aspectos de los que todavía imaginamos, y es seguro y deseable que no sólo en base a un nuevo ciclo económico similar al ya vivido. El problema es que nadie sabe muy bien cómo será, ya que todavía sólo podemos trabajar con intuiciones cuya precisión se verá modificada por la posibilidad de lo real. La única manera que disponemos para acercarnos a ese futuro todavía nebuloso, es mediante aproximaciones que de forma intuitiva nos ubican en escenarios propicios para un equilibrio más respetuoso con nuestro entorno físico y social. Quizá podemos identificar algunas de estas directrices que bien pueden aventurar

¹ Uno de los autores en defender con autoridad este criterio ha sido Walter Stahel, Walter (2010) en *The Performance Economy*, que desde una perspectiva económica relacionada también con el crecimiento urbano augura el futuro de la misma en clave de sostenibilidad y eficiencia.

ciertos aspectos deseables para el nuevo escenario al que nos dirigimos...

Curiosamente una gran parte de ellas se identifican claramente con soluciones tradicionales que en determinado momento fueron abandonadas y más tarde olvidadas en aras de la posibilidad de una mejor vida. Un espejismo no consolidado que necesita recordar y rescatar modos de habitar que sin renunciar a un confort ya ganado, recuperen y sean capaces de mantener un equilibrio estable con el medio en y del que vivimos. Aprovechando sus ventajas poco costosas y generalmente sencillas de aplicar en cada lugar y momento. Es decir, siendo sensibles a su realidad física en relación con nuestras necesidades y aquellas capacidades de mejorar la calidad de los espacios habitables desde la perspectiva del equilibrio con el medio.

Así, son las pistas que los principales componentes del medio natural nos ofrecen las que pueden servir como guías básicas del mapa necesario para no extraviar nuestro camino. Un mapa en el que el agua, el aire, y en definitiva el territorio son los protagonistas claves (tal y como en los mapas tradicionales de todos los tiempos). Cuyas realidades condicionan los trazados de nuestras vidas, modificándolas de forma beneficiosa siempre que sean utilizados con respeto. Algo que ya ha demostrado la ciencia de forma irrefutable².

5. El urbanismo sostenible como marco de la arquitectura ecoeficiente: Casos de estudio.

Ya hemos defendido en diversas ocasiones que el urbanismo sostenible es el marco necesario para una arquitectura ecoeficiente. Un primer paso cuya importancia a menudo se olvida, y que sin ser condición suficiente, sin embargo predispone hacia actuaciones posteriores más sensatas y mejor adecuadas a una situación actual que desde luego no se enmienda con soluciones cosméticas o invenciones generalistas. Podríamos enumerar una serie de condiciones lógicas que facilitan este marco inicial de lo que hoy podemos identificar con la arquitectura ecoeficiente, y que sin embargo no terminan de aplicarse como condiciones básicas de partida, ya que todavía no son capaces de vencer las inercias existentes...

Para ello, se propone a través del análisis de una serie de casos de estudio, un repaso puntual de la relación que dos elementos básicos como son el agua y el viento poseen con lo que consideramos el marco necesario para una

² Los primeros resultados sobre la corrección de los cortisolos (una de las denominadas hormonas del estrés), en virtud de la influencia de la naturaleza fueron publicados en *International Journal of Immunopathology and Pharmacology*, *European Journal of Applied Physiology* y *Journal of Biological Regulators and Homeostatic Agents*. Desde entonces adversos investigadores han apuntalado los beneficios de los paseos por el bosque” hasta convertirse en una verdadera terapia como “tomar baños de bosque”. *Issue of Natural Awakenings*, Abril 2012, <http://www.naturalawakeningsmag.com/Natural-Awakenings-en-Espanol/April-2012/Tomando-un-bao-de-bosque/>

Para su proyección en la práctica del urbanismo sensible de estos aspectos ver también: <http://biophilicities.org/>

arquitectura sensata y sensible con el contexto en el que se ubica. Con el objeto de destacar su importancia, muchas veces enmascarada por otros factores superficiales más vistosos. Su análisis se ilustra mediante una serie de ejemplos de diferente magnitud y naturaleza que sin embargo comparten la virtud de tomar muy en cuenta y desde diferentes perspectivas, la trascendencia de dichos elementos básicos.

5.1. El agua, factor clave para una arquitectura y urbanismo más ecoeficiente. El arte de tomar ventaja de su flujo natural a través de algunos ejemplos.

Por ejemplo, seguir el devenir del agua. Pero no solo desde el imprescindible aprovechamiento de la misma teniendo en cuenta el respeto por su ciclo natural, algo que ya forma parte de todos los indicadores de sostenibilidad. Sino yendo todavía más lejos, y tomando conciencia de que nuestros paisajes más cultos son aquellos que están contruidos desde el fluir del agua; aprovechando sus potencialidades físicas, químicas y sensoriales, producto de la influencia de su gravedad. Siendo receptivos ante su devenir natural con el objeto de tomar ventaja de sus infinitas capacidades, al mismo tiempo que haciéndola cómplice de nuestros intereses de supervivencia y bienestar. Una realidad que no solo se observa en los jardines más renombrados, o en los parques mejor trazados a lo largo de los tiempos. Sino también en las pautas de crecimiento de las ciudades más antiguas, que eran trazadas y desarrolladas según los “viajes del agua”³, comúnmente conocidos en su lugar de origen como “qanats” o “mayras” (véase Fig. 1). O en el entorno rural y sus paisajes agrícolas tradicionales, en las vías fluviales de transporte... En todos y cada uno de los denominados paisajes productivos en los que el hombre ha intervenido de forma sabia y respetuosa. Permitiendo una mejor gestión no solo del elemento líquido y todo lo que ello conlleva de forma consciente (humectación natural, fertilización del terreno, llenado de acuíferos y embalses). También favoreciendo una biodiversidad y un desarrollo vegetal programado capaz de limpiar nuestros suelos y atmósferas; corrigiendo la incidencia negativa de ciertos vientos, equilibrando los índices higrométricos a lo largo de las estaciones de año, y restaurando nuestra salud en virtud de su interacción con un medio ambiente sano...

³ Comúnmente conocidos como qanats, o mayras y que dan origen al toponímico mayrit (actual Madrid, ciudad cuya traza obedece de forma clara a las traídas de agua desde la sierra hacia las principales fuentes que configuraron las diferentes barriadas originales), en *Historia del nombre Madrid*, Oliver Asín, J. CSIC. Madrid, 1959.

Para una referencia completa de dichos sistemas o caminos de agua, consultar Baumont, P. Bonine, M. McLachlan, K. Qanat. Kariz, and Khattara. Univ. Of London, Menas Press 1989. O el más reciente compendio *Abstracts of the International Conference on Traditional Knowledge for Water Resources Management* (21-22 February 2012, Yazd, Iran) by: Saleh Semsar Yazdi, Alireza Bahri, Elahe Ahmadih Yazdi.

En definitiva, un recurso para mejorar la manera de habitar el espacio que nos rodea sin ejercer más presión sobre el entorno, sino todo lo contrario. Que toma ejemplo de lo que ya ocurre en la naturaleza sin intervención externa, pero sin recrearla literalmente; no vaya a perderse el objetivo final de un equilibrio también respetuoso con la identidad de cada escenario.

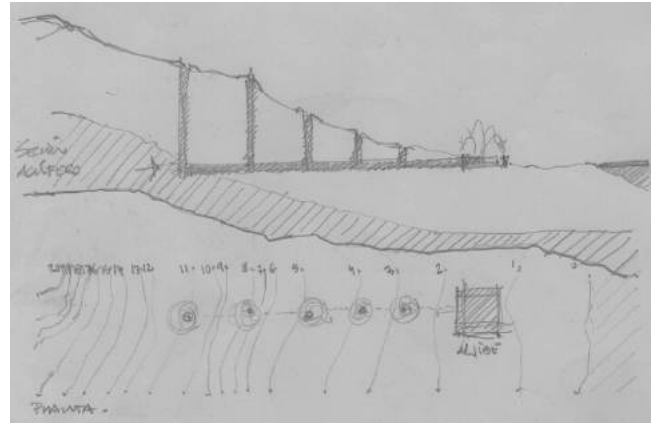


Fig. 1. Esquema de funcionamiento de un qanat. En el que mediante una serie de pozos equidistantes perpendiculares a la pendiente del terreno unidos por una galería horizontal enterrada, se da salida en superficie al acuífero sin necesidad de bombeos.

Fuente: Dibujo del autor del capítulo



Fig. 2. Imagen de los caminos de agua que configura la dispersión en abanico de las escorrentías sobre la arena de la playa en su camino natural hacia el mar (situado en la parte superior de la fotografía). Curiosamente dibujan el proceso inverso al de concentración inicialmente previsto por similitud con el propio de los ríos, recreando el efecto “delta”.

Fuente: fotografía del autor del capítulo

Porque los caminos del agua ya existen de forma natural sobre la superficie de la corteza terrestre y su sustrato inmediato. Ordenan el territorio, y facilitan la evacuación natural de las escorrentías según un orden propio que configura un paisaje ordenado de suma belleza, cuya lógica no cartesiana debiéramos utilizar como soporte de la trama ordenadora necesaria para cualquier otra actividad superpuesta sobre el territorio; bien sea forestal, agrícola, productiva, lúdica, o por supuesto constructiva. Para así lograr la deseable combinación entre dos discursos

geométricamente bien diferentes (el orgánico de la naturaleza y el cartesiano derivado de la mano del hombre), pero sin embargo compatibles. (Véase Fig. 2).

¿Pero se estudia cómo proyectar con el agua, a sabiendas de que es éste el elemento más importante para la vida? Creo sinceramente que no. De hecho, algo así como enseñar a “proyectar con el agua” no se encuentra como materia específica dentro de los programas de estudios vigentes en las escuelas técnicas. Más bien se instruye sobre cómo mantenerla a raya, o a lo sumo cómo conducirla de forma rápida y segura hacia lugares o dispositivos en donde no estorbe, olvidando su capacidad generadora de orden y bienestar. Tal vez esta disciplina debiera de convertirse en una de las primeras disciplinas para graduarse en arquitectura o en urbanismo ecoeficiente. Y no me refiero a la neumática Vitrubiana, sino a una hidráulica básica y natural todavía más antigua que respeta el fluir del agua. Capaz de ordenar el medio físico construido de forma más racional, y desde luego mucho menos costosa que la que actualmente utilizamos.

De hecho, algunas arquitecturas tradicionales nos ofrecen casos en los que esta manera de hacer caracteriza sutilmente la totalidad del conjunto, empapando de lógica constructiva eficaz y coherencia formal las diferentes escalas de actuación.

Mezquita de Córdoba

Localización: Córdoba, España

Año: s. VIII – XVI

Un ejemplo de ello es el que se observa en el complejo de la Mezquita de Córdoba, en la que toda su envolvente externa, incluida la superficie del patio de acceso como continuidad compositiva y constructiva de la propia cubierta, está sutilmente diseñada por el fluir del agua. De hecho, una de las cosas que más llaman la atención desde un principio a los visitantes, son los curiosos canales que conectan los naranjos alineados del patio de acceso (Véase Fig. 3). Éstos se ordenan sobre una trama rectilínea ordenada que sirve para canalizar el agua entre todos ellos, a modo de primitivo riego automático en el que se aprovecha la capacidad de autonivelación del líquido para garantizar su reparto equitativo entre todos los árboles sin el menor esfuerzo. Configurando un mecanismo que aplicado a la arquitectura entalla en el pavimento una combinación entre los finos canales que unen los alcorques circulares; que a su vez dibuja un orden escueto y claro que tiene su repercusión geométrica y funcional en el resto de la arquitectura construida ya desde la misma cubierta.

De hecho, podemos considerar la importancia de un elemento tan básico como el agua, a la hora de caracterizar lo que se puede considerar como el “muro-acueducto” (Moneo 2017, p.24) y que, perpendicular a la quibla, soluciona tanto el drenaje de la cubierta como buena parte del fundamento del sistema estructural del edificio.



Fig. 3. La fotografía muestra el sistema de canalización entre alcorques del Patio de los Naranjos de acceso a la Mezquita de Córdoba. *A través del cual el flujo del agua se acelera y desacelera, haciéndose más o menos visible al mismo tiempo que ésta “canta, ríe y baila”* Fuente: fichero de Wikimedia Commons.

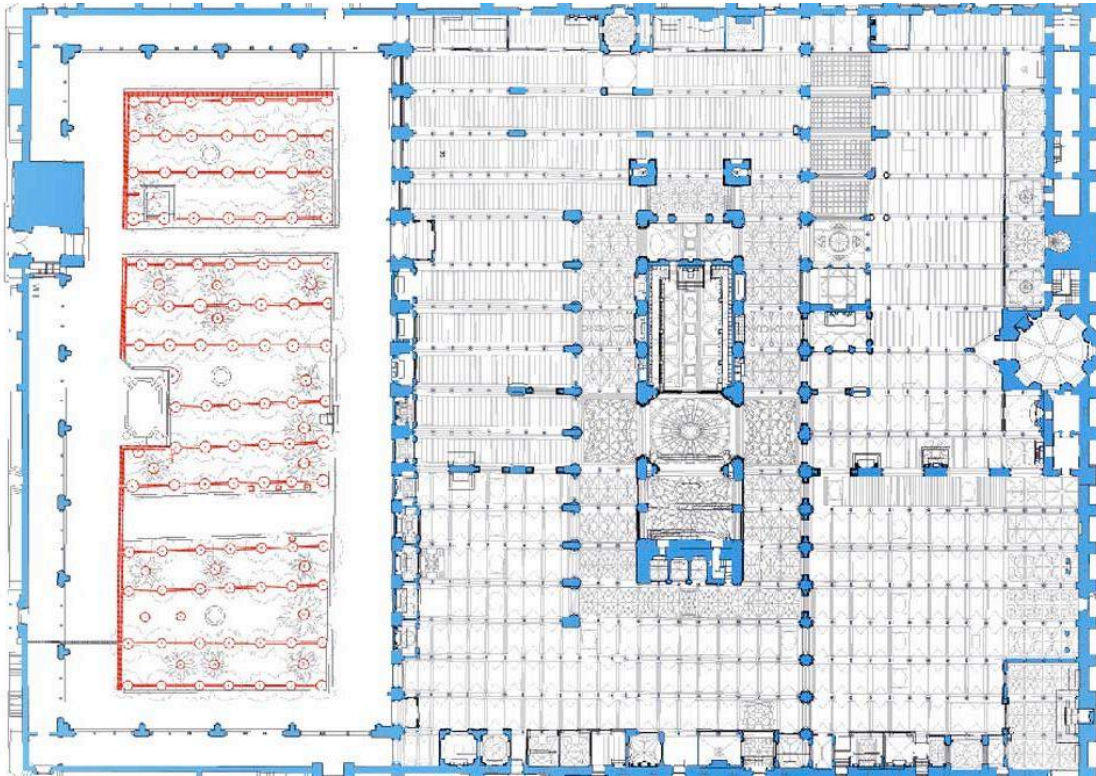


Fig. 4. Plano de planta dibujada por el Dr. arquitecto Gabriel Ruiz Cabrero de la Mezquita de Córdoba en el que pueden compararse los dos niveles de orden de la estructura de las naves y del sistema de canalización del Patio de los Naranjos, pudiendo observarse la ordenación alineada y consecuente entre ambos. Fuente: Dibujo del equipo de Gabriel Ruiz Cabrero. En *Dibujos de la catedral de Córdoba; Visiones de la mezquita 2013*.



Fig. 5. Vista aérea de la cubierta dentada de la mezquita y su proyección continua sobre la ordenación alineada del patio de los naranjos, en el que la nota orgánica aleatoria la ponen los cipreses y palmeras dispuestos “desordenadamente” sobre la trama geométrica claramente reconocible. Los caminos del agua, trazados desde los canalones entre las cubiertas apuntadas, tienen su continuidad en el plano inferior del patio de los naranjos, y mantienen su continuidad ordenando según su flujo la disposición principal del complejo. Fuente: *fichero Wikimedia Commons*

Porque de hecho, y como se observa en el plano correspondiente a la Fig. 4, existe una alineación exacta entre los curiosos canales del patio de los naranjos y la estructura lineal de las naves de la mezquita, que además coincide con las inflexiones repetitivas de la cubierta dentada que caracterizan al edificio. Haciendo que los canalones longitudinales de cada crujía de la cubierta, mantengan en proyección su continuidad con los del riego del patio: una composición lineal generalizada que no solo simplifica la lectura del edificio, sino también su construcción fundacional y las posteriores ampliaciones sufridas; que no hicieron hasta la inclusión de la iglesia barroca, sino seguir el discurso del agua inicialmente planteado. Un continuo en el uso eficiente del trazado de los caminos del agua que muy probablemente por tratarse de un bien escaso (y precioso), se constituye en sutil protagonista de la ordenación del conjunto (y también en su construcción); inmutable a lo largo del tiempo.

No en vano los árabes defendían el juego del agua con fines lúdicos en los jardines de sus casas y palacios. Pero como se ve, también utilizaban la lógica de su discurso lineal con fines compositivos y constructivos ecoeficientes. Mejorando su uso y decantación, garantizando su evacuación ordenada, pero también utilizando las potencialidades de su discurso para la configuración del proyecto de arquitectura en su globalidad. Es decir, poniendo en valor un elemento primario que más que ser

considerado como un problema que es necesario mantener a raya, puede llegar a convertirse en un gran aliado desde su génesis.

Es más, este sistema posibilita una apariencia de la arquitectura totalmente diferente entre los momentos de sequía y los de lluvia, ya que el espectáculo (incluido el sonido) del agua circulando a la vista por vías y canales intencionadamente practicados, modifica totalmente la apariencia del conjunto, ofreciendo múltiples experiencias perceptivas del hecho construido sin demeritar un ápice su eficiencia. Es decir, no consumiendo energía alguna, sino que puede que hasta produciéndola como consecuencia de su correcto funcionamiento.

Realmente no se trata solo de un fenómeno propio de ésta, o este tipo de construcciones, sino que puede detectarse puntualmente a lo largo de la historia de la arquitectura. Allá donde el agua correctamente canalizada, sin embargo no se esconde de la vista o de la participación activa en la arquitectura. Pensemos por ejemplo en las catedrales góticas y en sus gárgolas escultóricas escupiendo agua simultáneamente durante los días de lluvia. Como grandes espectáculos escultórico-acuáticos que por su vibración, color y sonido, son capaces de transformar periódicamente las imponentes estructuras estáticas de las que forman parte en juegos cambiantes de agua insertados dentro de la trama urbana. Canalizando con eficiencia una necesidad que de este modo llega a convertirse en virtud.



Fig. 6. Vista del LA River desde el Sur cerca del principal downtown de la ciudad. El canal central con agua contrasta con los enormes hombros de desbordamiento dimensionados para el corto pero intenso periodo de lluvias. Su recorrido sirve de ordenación para el trazado de las diferentes infraestructuras (ferrocarril, tendido eléctrico, autopistas...) que lo acompañan, pero supone una discontinuidad más en la ciudad fragmentada. *Fuente: fichero de Wikimedia Commons*

Plan Maestro de Revitalización del LA River
Localización: Los Angeles, California, EE.UU.
Año: 2007 – actualmente

Pero el agua también permite reinventar la arquitectura existente, mejorando su calidad y capacidad ambiental al tiempo que regenerando hábitats degradados; y no sólo los naturales. Es el caso del proyecto de rehabilitación que desde 2007 está en marcha para el río de Los Ángeles en California. Una imponente infraestructura de unas treinta y dos millas que atraviesa la megalópolis emulando las autopistas que caracterizan el infinito tejido urbanizado (Véase la Fig. 6), y que cumpliendo su función puntual de evacuación de las escorrentías en la estación de lluvias, aparece durante gran parte del año como una brecha baldía, construida y no ocupada, que la convierte en lugar de oportunidad. Por otro lado, su naturaleza pétreo (de hormigón armado), y su sección hidráulica (estrictamente funcional), exhiben un lenguaje de otros tiempos, mucho más pragmático y quizá menos sensible respecto de la complejidad de los distintos factores que intervienen en las actuaciones urbanas hoy en día: cuando ya no se hormigonan los cauces...

Así que a lo largo de los últimos años se ha venido desarrollando un proceso de regeneración participativa para intentar conseguir que el denominado río de Los Ángeles acabe siendo un verdadero río y no una autopista rehundida más, como lo viene siendo desde hace ya setenta años. Cuyo cauce sirva para naturalizar el útil pero inhóspito vacío diseñado por el cuerpo de ingenieros del ejército norteamericano, basándose esta vez en el uso ejemplar del agua y sus consecuentes masas vegetales. Entendido no más y solamente como eficaz colector de desagüe, sino también como un corredor de vida. Capaz de cualificar cada entorno a su paso dotándole de identidad propia, corrigiendo tejidos urbanos degradados a la vez que mejorando su soporte social, y promocionándose de este modo desde la mera infraestructura hasta el equipamiento complejo⁴.

Son seis los ejes sobre los que ha gravitado este Plan Maestro de Revitalización; la propia regeneración del río, dotar de más superficie verde a las vecindades y barrios aledaños, provocar y capturar oportunidades para la comunidad, y crear valor añadido desde el propio urbanismo. Por último el doble objetivo administrativo de desarrollar marcos de evolución de las vecindades basadas en el propio río, así como una gestión global del mismo. (Véanse Figs. 7 y 8).

Toda una estrategia ligada al concepto de infraestructura verde, realizada para que las personas progresivamente

funcionen mejor disfrutando de una mayor calidad de vida; a diferencia de la infraestructura gris existente (que hasta este momento representó), ejecutada tan solo para que el sistema urbano construido fuese más eficiente ante las riadas frecuentes en la época de lluvias. En realidad, se trata de recuperar este espacio también para la gente, combinando el funcionamiento puntual como colector pluvial, con el uso lúdico y social constante, para el que el agua ha de ser el gran protagonista.

Objeto de numerosos menciones y premios, entre ellos el de la American Society of Landscape Architects del año 2009 (y por ello analizado en numerosas publicaciones, ASLA 2010), este ambicioso proyecto basado en el fluir del agua ha conseguido movilizar a comunidades tan heterogéneas como las que habitan en la ciudad de Los Ángeles con un único objetivo: mejorar sus hábitats de forma natural a través de un medio común como es el río, capaz de unir distritos preservando la identidad particular de cada vecindad. Haciendo de la participación ciudadana una realidad, gracias no a intereses particulares sino a la preservación y puesta en valor de un tesoro común que se utiliza como argumento global de las diferentes actuaciones puntuales que lo integran. Consiguiendo aplicar criterios lógicos extraídos del fluir del agua para lograr un medio mucho más ecoeficiente, además de agradable de vivir. E incrementando de forma significativa la calidad de vida de unos espacios que hasta ahora han sido evitados, o en el mejor de los casos simplemente olvidados.

Este aprovechamiento de las escorrentías a partir del cambio de enfoque desde su consideración problemática hacia el aprovechamiento de sus potencialidades, tiene ya un cierto recorrido a lo largo de los últimos años en la comunidad internacional que trabaja sobre temas de sostenibilidad. En concreto, y producto de la actividad investigadora y profesional de la oficina del profesor Bill Wenk (uno de los autores del citado Plan de Revitalización del LA River), podemos destacar los siguientes artículos y eventos:

- “*Cultured Nature: Water as Civic Framework*”, 2006 Redesigning The Edgeless City Forum, Phoenix, Lincoln Institute of Land Policy, May.
- “*Stormwater as a resource: Moving beyond drainage and flooding*”, 2007 Kansas Association of Floodplain Management, September 5.
- “*Designing the Natural City: Vision, Design, Improvisation*” 2007 Harvard GSD, April 3.
- “*Rehabilitation vs. Restoration of Urban Rivers: The Menomonee Valley and the Los Angeles River as Case Studies*”, 2007 Ecological Society of America (ESA) Symposium, August 9.

En los que se deduce que ya no solo es necesario hacer de la necesidad virtud, sino ir un paso más allá y convertir el problema en la génesis de la virtud. Fijando nuestra atención en aquellos enfoques que puedan rendir más por menos, y sin agotarse en sí mismos. Dejando las puertas abiertas a aquellas aportaciones que sin duda aparecen como consecuencia del proceso de su puesta en común, y

⁴ Para obtener una reflexión amena y profunda entre infraestructura y equipamientos verdes, consultar:

<http://elblogdefarina.blogspot.com.es/2012/06/infraestructura-verde-urbana.html>

en donde se ejemplifica esta incipiente transición que todavía y tal y como explica su autor, está tomando forma.

En cualquier caso, y como aproximación básica, recordar que la infraestructura hace que los denominados “sistemas urbanos” funcionen mejor, mientras que el equipamiento intenta que la gente funcione mejor, pudiendo requerir de espacios diferentes.



Fig. 7. Síntesis de la presentación del Plan Maestro de la Revitalización del LA River, en la que se detallan algunos de los aspectos que caracterizan a la infraestructura dotándole de atributos de equipamiento, y por lo tanto defendiendo la mejora del resultado final de la intervención propuesta. El proyecto ha sido desarrollado por una serie de equipos interdisciplinarios entre los que pueden destacarse los paisajistas, urbanistas, arquitectos e ingenieros **Mia Lehrer + Associates, Civitas, Inc. & Bill Wenk Associates, Tetra Tech, Inc.** Fuente: *Mia Lehrer + Associates*

que para la participación de las comunidades realmente implicadas es de capital importancia. Bien sean sociales, profesionales, técnicas o académicas.

Plan de Recuperación del canal de Chicago
Localización: Chicago, Illinois, EE.UU.
Año: 2002- 2017



Fig. 8. Plan Maestro de la Revitalización del LA River. Cada vecindad disfruta de un carácter diferenciado en su relación con el agua, utilizando el dominio hidráulico como espacio lúdico de esparcimiento en donde los valores ambientales son potenciados con el fin de configurar un corredor verde que unifique el carácter de una actuación de carácter regional que habrá de ser acometida por tramos de diferente naturaleza. Fuente: *Mia Lehrer + Associates*

Un caso mucho más acotado, pero en la misma línea es el de la recuperación de las riveras del canal de Chicago. Independientemente del efecto neutralizador que respecto del clima ofrece la gran masa de agua que representa el lago Michigan, origen de brisas cuyos efectos no son nada desdeñables según la época del año, el canal que lo comunica con el downtown de la ciudad supone un verdadero aliciente.

Creado en su día de forma artificial tanto para evitar las inundaciones como para dar salida hacia el Mississippi a las innumerables mercancías que utilizaban el transporte fluvial, contraviniendo el flujo natural hacia el lago Michigan, el canal terminó siendo una especie de cordón fluvial abandonado a su paso por los inconmensurables terrenos destinados a infraestructuras o residenciales aledaños obsoletos. Una infraestructura degradada a la que la ciudad mantenía en el nivel inferior destinado a las comunicaciones rodadas, túneles e intercambiadores. Olvidando completamente sus riveras, incluso en el último tramo previo a su conexión con el lago y flanqueado por alguno de los rascacielos más emblemáticos de la ciudad.

La reciente rehabilitación de unas 1,25 millas entre las calles Dearborn y Lake, comprende seis espacios específicamente caracterizados que se corresponden con los tramos entre los puentes correspondientes. Cada uno ofrece una actividad diferenciada que se complementa con las adyacentes para ofrecer un atractivo abanico lúdico y educativo.⁵ (Véase la Fig. 9).



Fig. 9. Vista del área recuperada del Chicago riverside en su tramo final frente a las Marina Towers y junto al puente de la calle State y hacia Dearborn. A pesar de su orientación Norte, y de la pendiente significativa de las gradas propiciada por la escasez de espacio libre, supone un lugar de esparcimiento altamente valorado por su cercanía al agua tanto por locales como por visitantes. Fuente: fotografía del autor del capítulo.

En realidad, este proceso comenzó hace unos quince años, cuando un alcalde visionario llamado R.M. Daley le encargó al arquitecto local Carol Ross Barney diseñar un paseo a lo largo del río. Una realidad hoy en día, pero impensable hace no tanto tiempo para la mayoría de los ciudadanos, que no daban importancia a su principal carácter urbano y también ambiental.

Pero el río era en el fondo la principal razón por la que la ciudad estaba allí, y su poder regenerador, (a partir del flujo del agua) ha conseguido revitalizar y sanear una de sus partes más características y reconocidas por todo el mundo.

En cualquier caso, se trata de un proceso puntual, pero que sin duda irá conquistando otros tramos del canal sucesivamente, para así mejorar de una forma lógica, sencilla y sensata el hilo conductor indiscutible del downtown de Chicago.

⁵ Desde el Este (lago Michigan) hacia el Oeste son las siguientes:
The Marina (State to Dearborn) Llena de restaurantes, gradas, así como diferentes lugares desde los que contemplar el Chicago River.
The Cove (Dearborn to Clark) Destinada a tomar un snack o alquilar un kayak frente al agua.
The River Theater (Clark to LaSalle) El oasis urbano, con árboles y lugares de descanso.
The Water Plaza (LaSalle to Wells) La parte familiar, con juegos de agua para los niños.
The Jetty (Wells to Franklin) La parte educativa donde aprender el funcionamiento del río y su ecología.
The Riverbank (Franklin to Lake) Con sus jardines flotantes, se sitúa en la confluencia de los tres brazos del canal.

5.2. El viento, otro factor clave para una arquitectura y urbanismo más ecoeficiente. La capacidad de diseñar a partir de su influjo, puesta en práctica en distintos ejemplos.

Con el aire pasa algo parecido a lo que ocurre con el agua, y existen numerosos trabajos a lo largo de la historia que así nos lo recuerdan⁶. Pero actualmente, y en virtud de la capacidad tecnológica que disponemos, debiéramos hacernos una serie de preguntas... ¿Tiene sentido frenarlo mediante costosas soluciones constructivas, cuando su energía puede ser canalizada con el objeto de limpiar nuestras atmósferas? ¿O mejor ser aprovechada a través de sistemas como los microeólicos capaces de generar energía y bienestar? ¿O considerarlo como un factor más organizador del programa? Porque la verdad es que rara vez se mira un mapa de vientos (si es que los hay) a la hora de proyectar, siendo poco conscientes del enorme potencial o problemática que de ello se puede derivar. Exponiéndose o protegiéndose de forma selectiva con el objetivo de obtener el máximo partido evitando aquellas afecciones molestas, bien sean físicas o sensoriales⁷.

En cualquier caso, tampoco se trata de algo nuevo, ya que desde hace décadas autores de gran importancia han estudiado el efecto del viento en el urbanismo y la arquitectura, cuantificando incluso la sensación de confort dependiendo de la velocidad del mismo (Olgyay, 1969, Terán 1962-63)

Así que probablemente ésta debiera ser otra de las disciplinas básicas a la hora de practicar una arquitectura ecoeficiente. Desde un primer estadio, como consideración obligada antes de realizar cualquier otra labor de diseño o cálculo. ¿No es ya obligatorio un levantamiento taquimétrico, o un estudio geotécnico antes de proyectar cualquier estructura? Pues así mismo debiera de serlo respecto del agua o el viento, ya que también afectan de forma específica a la calidad de vida en cada lugar. Sus influencias, tanto beneficiosas como perniciosas, pueden incurrir además en un gran coste a la hora de ser aplicadas de manera ineficiente.

⁶ Podemos citar una vez más a Vitrubio y a sus 10 libros de Arquitectura, en el que uno de los escasos esquemas que aporta para la mejor disposición de la traza de las ciudades es precisamente el de los vientos. "Los Diez Libros". Fuentes de Arte, serie mayor. AKAL 1987-92. En concreto el Libro Sexto, Capítulo I. p-136
Más tarde L. B Alberti también ofrece pautas sobre la forma curva de las calles con el objeto de evitar los vientos directos en su *Re Aedificatoria*, medida ya aplicada en algunas trazas urbanas desde el medioevo y que pueden admirarse todavía hoy en día. Hasta llegar a la referencia necesaria por lo brillante del artículo de Fernando de TERÁN. *La Ciudad y el Viento*. Revista Arquitectura 1962-1963.

En todos ellos se explican experiencias positivas que contrastan con las citadas en el presente texto; recogidas con el objeto de plantear una crítica constructiva respecto de planteamientos basados tan solo en la especulación, y no el bienestar de la gente.

⁷ Por ejemplo. También recordar el denominado *efecto Foehn*, que describe el efecto de ciertos vientos perniciosos para la salud y que se dan en geografías de todo el planeta. Ver el artículo "*Viento y Salud mental*" del Dr. Juan Carlos Molina García, GPV de Valencia, o el trabajo del científico canadiense Fred Soyka "*El efecto de los iones o cómo la electricidad del aire rige la vida y la salud*" (Fred Soyka y Alan Edmonds. 1990).

Siendo conscientes de estas ventajas o inconvenientes, con respecto del viento, es sin embargo importante alejarse de lugares comunes, ya que las mismas soluciones formales no son válidas universalmente, ni aplicables como una receta válida de forma eterna. Es decir, factores como el clima, el lugar, la escala, el programa de necesidades, los medios de transporte disponibles junto con el modelo de movilidad o el tiempo en el que se desarrollan, condicionan también el tipo de tratamiento. Haciendo que la volatilidad de su naturaleza se entremezcle con estos y otros factores, impidiendo la aplicación de una única solución canónica universal.

Análisis del viento en dos grandes ciudades de trazado ortogonal: Nueva York y Chicago, EE.UU.

Fijemos por ejemplo nuestra atención en los trazados ortogonales de las dos grandes ciudades ventosas

norteamericanas, bien sean Chicago (apodada de hecho como “the Windy City”), o la misma Nueva York. Urbes en donde las calles fueron trazadas según una trama que como dictó el propio Comisionado de N.Y. estaba “destinada a albergar edificios, y el ángulo recto resultaba ser el más cómodo y económico para la construcción de estos”. Es decir, un sistema de crecimiento que ignoraba la topografía, las orillas fluviales y los ejes constituidos al exterior de los núcleos habitados. Incluso que dejaba a cada propietario la potestad de edificar volumetrías especulativas sin limitaciones explícitas de alturas o volumetrías, tan solo sujetas a unas pocas normas genéricas. Por lo tanto, un marco de actuación sin identidad propia que por supuesto tampoco tuvo en cuenta los fuertes vientos que cruzan sin obstáculos ambas ciudades en dirección E-W-E, condicionando la manera de vivir y de desenvolverse en ellas (al menos peatonalmente o en bicicleta). (Véase Fig.10)

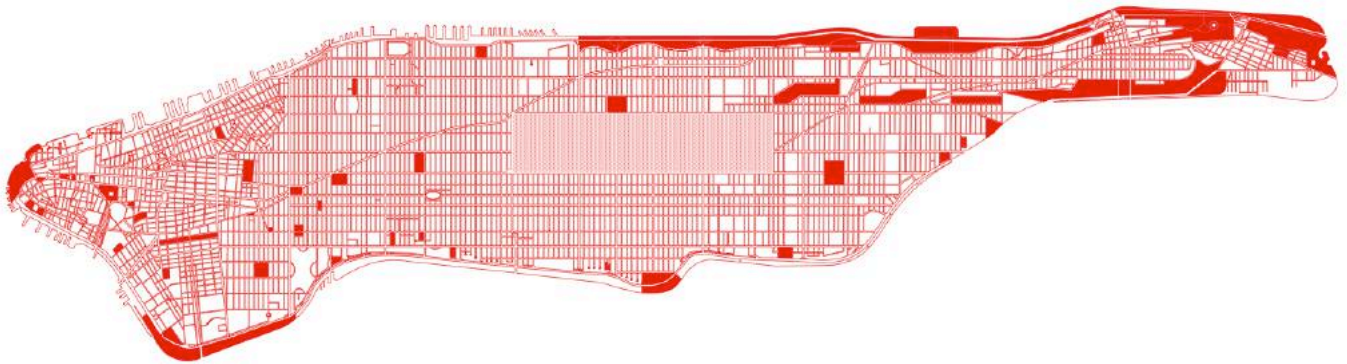


Fig. 10. Plano esquemático de las vías y espacios libres de Manhattan, N.Y. donde las calles (155 en total), fueron trazadas con la intención de comunicar los puertos del Este (East River en la parte inferior) y el Oeste (Hudson River en el límite superior) de forma rápida y eficaz, sin ninguna otra consideración. En él se observa la escasez de plazas o espacios de descompresión (en trama opaca) capaces de reducir la velocidad del viento (a excepción del Central Park, que fue creado más por motivos sociales y democráticos). Fuente: esquema gráfico de Manhattan elaborado por el autor del capítulo.

Lo curioso es que el discurso del viento siempre se ha superpuesto al de la traza especulativa, condicionándola y generando sin duda problemas de bienestar o de calidad de vida, pero a la vez dando pistas para su corrección y mejora. Porque la variable molesta del aire que se mueve por estas vías se ve modulada en virtud de las diferentes formas y alturas que poseen las edificaciones que las jalonan. Haciendo que los diferenciales más notables de altura (la mezcla de edificaciones muy altas con otras muy bajas), introduzcan todavía más sensaciones molestas, incrementando la velocidad del aire. Es decir, la diversidad caótica de alturas y volumetrías recoge los vientos más intensos de las cotas superiores dirigiéndolos hacia las cotas inferiores de las calles, creando turbulencias que empeoran las condiciones ambientales de la actividad de la escala humana propia del espacio público. Un efecto molesto que sin embargo, y debido a esta interacción de la

arquitectura construida, puede ser corregido mediante un diseño adecuado de los perfiles de las calles capaz de implementarse con el tiempo. Incluso estableciendo características diferenciales entre ellas.⁸

Por lo tanto, sabemos que se puede manipular el viento con un diseño urbano adecuado. Incluso corregirlo a medida del proyecto deseado. Y esto puede realizarse de

⁸ Para profundizar en los efectos de los denominados “cañones urbanos” ver los siguientes artículos;

- *Wind, temperature and stability conditions in an east-west oriented urban canyon*, en *Atmospheric Environment* (1967).

Volume 22, Issue 12, 1988, Pages 2691–2700. Nakamura, Y. Department of Architecture, Faculty of Engineering, Kyoto University, Kyoto, Japan y Oke, T.R. Atmospheric Science Programme, Department of Geography, The University of British Columbia Vancouver, B. C., Canada V6T 1W5

- *Urban Form and Climate: Case Study, Toronto*.

DOI: 10.1080/01944369508975635 pages 226-239. Bosselmann, P.

Arens, E. Klaus Dunker, K & Wright, R.

acuerdo con las necesidades y condicionantes de cada momento. Aportando una ordenación inteligente que aproveche sus ventajas y evite sus inconvenientes, que normalmente vienen derivados de su velocidad y libre tránsito sin obstáculos. Y así posibilitar que las calles resulten más agradables no solo por su aspecto visual, sino también por el confort que en ellas se puede disfrutar. Pero también, y en virtud de una exposición más controlada, lograr menores pérdidas energéticas en los edificios que las conforman. De este modo puede configurarse una línea de actuación que integra en un mismo resultado diferentes objetivos que son perfectamente compatibles: percepción agradable, lógica compositiva, y eficiencia energética. En definitiva; bienestar⁹.

Análisis del flujo del aire en edificios de menor escala: el caso de la vivienda o de la arquitectura doméstica.

Pero ocurre que la escala de actuación del aire en movimiento, aunque menos explorada, parece mucho más amplia e inabarcable que la del agua. Normalmente queda delimitada a la planificación territorial, o como mucho al diseño urbano (Munn 1970, Technical Note. Np 108.), o incluso de grandes estructuras mixtas que permitan trabajar con él de forma general. Y si bien su ámbito ha estado restringido principalmente a estas escalas, hoy en día y debido a las necesidades reguladas por la normativa respecto de la ventilación y el confort de la arquitectura a menor escala (especialmente por el Código Técnico de la Edificación), resulta muy sugerente su aplicación también dentro del ámbito doméstico: es decir, utilizar el movimiento del aire en el interior de los edificios como un agente más del programa: un protagonista siempre activo y perceptible; aunque variable e invisible. Además de un agente necesario que ejerce una acción mecánica sobre todo nuestro organismo; activando la circulación y la evaporación cutánea, excitando las terminaciones nerviosas periféricas y mejorando nuestra respiración y actividad nerviosa.

No olvidemos que la arquitectura de nuestros ensanches meridionales europeos, constituida fundamentalmente por viviendas pasantes en las que era muy sencilla la ventilación cruzada, ya solucionaba satisfactoriamente estos aspectos, consumiendo además poco suelo y logrando una densidad y compacidad adecuadas respecto de los estándares de sostenibilidad actuales. Pero las condiciones de ordenación vigentes hoy en día, con crujías menores, y condicionantes visuales y dotacionales bien diferentes, hacen bastante más difícil su aplicación literal...

Así que de nuevo debemos preguntarnos, ¿cómo puede actuar el aire en movimiento sobre la manera de hacer arquitectura o urbanismo en nuestros días y a una escala discreta? Por ejemplo, modificando la secuencia tradicional de los usos en virtud de una mayor eficiencia; y por lo tanto

configurar formas alternativas de habitar que vayan más allá de situaciones continuistas o de modas superficiales, que en el fondo no son otra cosa que meros espejismos mediáticos, y que para nada cambian nuestra manera de vivir en aquellos entornos más inmediatos. O también tomando ventaja de su constante movimiento, que afecta directamente no solo a nuestra sensación de bienestar, sino también al óptimo comportamiento térmico de los edificios. E incluso a su experiencia sensible. Para alcanzar otra forma de proyectar hábitats muy concretos como pueda ser la vivienda, nacida a partir del flujo del aire, que sin duda puede mejorar nuestras vidas, modificando los espacios vivideros con el objeto de hacerlos más eficientes.

Pensemos en la tipología de vivienda más común en la actualidad para edificios residenciales con doble orientación, en donde la crujía intermedia e interior, sin iluminación natural y condenada a la ventilación forzada, es ocupada por una pastilla de servicios más o menos alineada con las fachadas. Ésta configura una barrera entre las mismas que normalmente separan las denominadas “zona de día” y “zona de noche”, y consolida una estricta zonificación a la vez que dificulta la ventilación cruzada. Pero esta fragmentación, destacada como mecanismo de ordenación tipológica hasta hace bien poco, comienza a ponerse en duda para dejar paso a una secuencia estratificada de espacios que desde el acceso, permita una mayor transparencia entre las fachadas, desplazando la obligada ventilación por depresión al fondo del recinto; normalmente medianero con otra unidad más o menos simétrica, y con la que puede compartir muchos servicios. De este modo, el vector de ventilación e iluminación natural se cruza perpendicularmente con el de la aspiración mecánica, dando forma a un nuevo esquema de distribución del programa básico de la vivienda. Y por lo tanto, abriendo paso a la posibilidad de una nueva forma de habitar en virtud del bienestar, la claridad compositiva y la ecoeficiencia.

Curiosamente, este esquema de transparencia estratificada se refleja también en la tendencia cada vez más evidente de evitar la segregación entre las funciones domésticas que no sean la estricta de los dormitorios o los cuartos de baño; abriendo las cocinas hacia las salas de estar, y unificando los espacios de circulación y recepción con dichas estancias con el fin de obtener espacios más amplios y versátiles. Son varias las razones que subyacen en esta práctica, pero lo cierto es que propician un cambio significativo en la manera de entender el espacio doméstico y consecuentemente en la forma de habitarlo. Esta apertura del volumen de la vivienda puede operar en la misma dirección que el aire que circula en su interior, garantizando la necesaria y obligatoria ventilación, a la vez que estableciendo un gradiente diferencial de temperatura ajustado y conveniente para desarrollar las actividades específicas que secuencialmente se realizan en dicho espacio unificado. (Véase Fig. 11)

Así que puede que una aproximación ecoeficiente a la hora de afrontar el proyecto de arquitectura o de urbanismo se convierta en una nueva vía para refrescar un discurso que actualmente es incapaz de generar nuevas formas de

⁹ Son numerosos los trabajos que respecto de la influencia del aire sobre el urbanismo y su diseño son publicados con periodicidad. Merece la pena consultar entre otras la siguiente publicación:
<http://www.sciencedirect.com/science/journal/00046981>

habitar. Y en una de las claves para abandonar las estridencias formales que se repiten sin otro contenido que el estar legitimadas por la moda. Evitando el tremendo desgaste de justificar constantemente lo efímero, que por otro lado conlleva el consumo de nuevos recursos de todo tipo, incluso conceptuales. Y que opera una vez más en contra de cualquier eficiencia.

El campo que se abre con este cambio de aproximación hacia el hecho de proyectar los espacios domésticos más ecoeficiente está todavía por explorar, ofreciendo un sinfín

de posibilidades sugerentes. Y esta línea es la que parece haber interesado a diferentes autores conocidos que de alguna manera intentan legitimar sus propuestas con el marchamo de sostenibles, si bien todavía los resultados no reflejan en su condición formal el espíritu novedoso de su génesis. Y por lo tanto tampoco encarnan el escenario adecuado que demandan esas otras formas de habitar que son capaces de justificar el esfuerzo defendido en un comienzo de intentar dar más por menos...

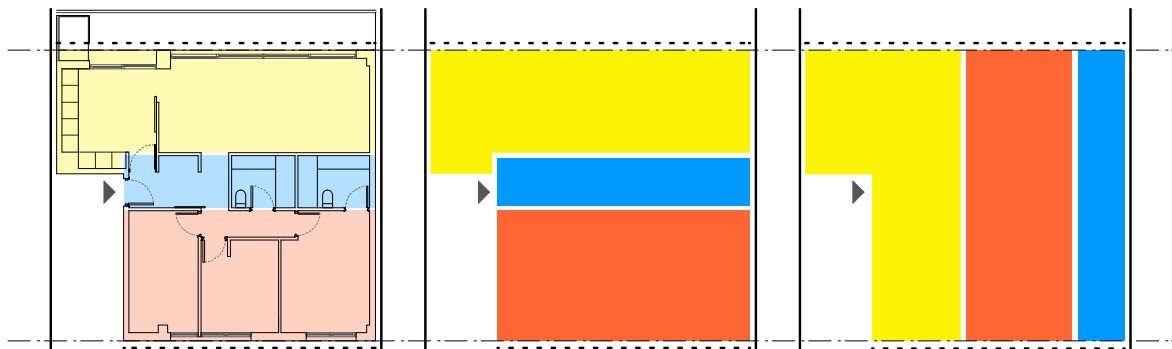
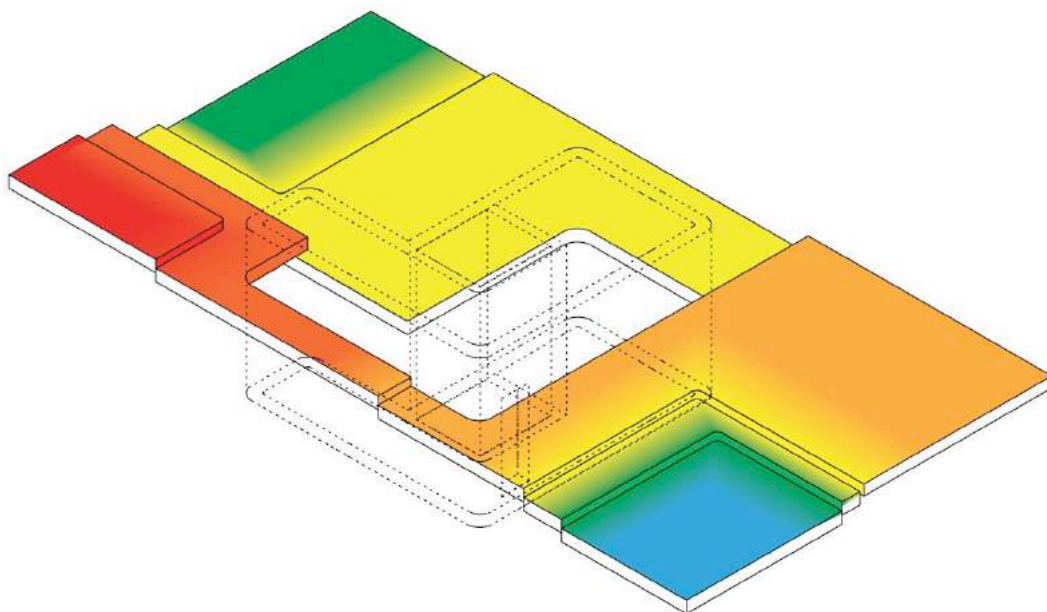


Fig. 11. Evolución del esquema de estratificación en una vivienda de doble orientación actual de acuerdo con sus zonas de uso y evolución de la disposición de las mismas de acuerdo con el flujo lógico de iluminación-ventilación más eficaz en función de las fachadas y de acuerdo con las condiciones de uso. Fuente: esquema gráfico elaborado por el autor del capítulo.



LANDSCAPE OF APARTMENT
RELATED TO THERMAL ZONES

Fig. 12. Propuesta del “paisaje térmico” generado en un apartamento, en donde los colores más cálidos coinciden con las estancias que también demandan más temperatura, estableciendo una gradación térmica capaz de ordenar secuencias de espacios y que tiene mucho que ver con la ventilación y sus sistemas de aplicación. La imagen y el proyecto pertenecen al proyecto *Convective Apartments* en Hamburgo, de la oficina **Philippe Rahm architects**. Fuente: *Philippe Rahm architects*.

Porque necesariamente es la sociedad (y no sólo los expertos), la que lejos de dejarse intervenir, debe estar preparada para asimilar y disfrutar de aquellas nuevas propuestas que sean capaces de dar satisfacción a sus requerimientos. Entre los que deben contarse no sólo sus necesidades, sino también las del medio en el que se desarrolla y se sustenta.

En cualquier caso, lo importante es destacar una vez más que no se trata de configurar artefactos extraños o invenciones singulares, sino de desarrollar maneras de proyectar más eficientes capaces de generar verdadero bienestar, o calidad de vida en los términos anteriormente expresados. Más lógicas y económicas no sólo en su construcción, sino sobre todo en su mantenimiento y duración.

6. Conclusiones

Así que determinar las potencialidades del medio en el que tanto la arquitectura como el urbanismo se desarrollan es de capital importancia para garantizar no sólo su ecoeficiencia, sino también la bondad de su diseño, ya que podemos concluir que ambos siempre van estrechamente unidos. Es decir que belleza y eficiencia pueden (y deben) encadenarse, desterrando el mito de la fealdad o rareza propia de una determinada arquitectura calificada como sostenible que tantos ejemplos torpes han logrado asentar. Pero este binomio de éxito (eficiencia y belleza), debe de sustentarse desde el comienzo en algo tan obvio como una aproximación sabia, inteligente y respetuosa hacia el medio, y sobre todo a sus componentes básicos (agua, aire, territorio...). Cuyos caracteres identitarios implican una adaptación personalizada para cada caso, centrándolo en lo verdaderamente importante.

Por otro lado, hay que insistir en que este enfoque no supone algo nuevo en modo alguno, sino que son muchos los ejemplos ya existentes que pueden ilustrarnos con maneras de hacer ejemplares. Se trata de esas denominadas “buenas prácticas” que nunca debiéramos pasar por alto. Haciendo que la invención singular o el mecanismo complicado no sean siempre necesarios, pero sí la estrecha colaboración entre diferentes fuentes de conocimiento. Como base de la radiografía de una sociedad más ecoeficiente a la que aspiramos y que muchas veces intentamos vislumbrar en un futuro desconocido, cuando en realidad hunde buena parte de sus raíces en el pasado conocido. Y esto debiera llevarnos a regenerar el verdadero sentido y la aplicación adecuada de palabras como sostenibilidad o ecología, que debido a su uso indiscriminado y la mayor parte de las veces vacío, llegan a provocar recelo.

Ya no podemos echar la culpa a la falta de tecnología, pues ésta no supone el cuello de botella al que nos enfrentamos. El problema actual es nuestra tímida capacidad de decisión, así como la falta de una apuesta decidida por estos sistemas más “naturales” de actuación con el objetivo puesto en la configuración del citado nuevo paradigma. Como hemos visto, descansa en buena medida

sobre un esfuerzo colectivo y solidario basado en la puesta en común de un conocimiento en el que siempre estamos profundizando, pero que debemos afrontar con convencimiento y valentía a la hora de ponerlo en práctica.

Probablemente una regla útil de actuación sea la de comenzar por ser sensibles, conocer y tomar en consideración estos elementos básicos; el agua, el aire, la tierra....

Los más inmediatos de nuestro entorno, aunque no por ello los menos complejos, ya que su intervención en el proyecto requiere de la delicadeza necesaria para extraer el máximo de sus potencialidades sin dañarlos, modificarlos, o destruirlos, tal y como defendía McHarg (1969). Y de eso trata precisamente la eficiencia con perspectiva ecológica; de saber emplearlos con respeto y de manera adecuada. Porque al fin y al cabo el consumo de energía se optimiza gracias a un uso inteligente de los mismos. Además, la energía no deja de ser también un subproducto que hoy por hoy explota nuestras aguas, nuestra atmósfera, y nuestros suelos o subsuelos.

En estos casos de estudio hemos visto puntualmente aproximaciones más o menos fieles a esta manera de afrontar el proceso de diseño tanto en la construcción como en el urbanismo. Tomando ventaja de la naturaleza tanto del agua como del aire, dos elementos primarios de enorme potencialidad que si son verdaderamente respetados en su manipulación, pueden transformar de forma significativa la manera de practicar con éxito y eficacia la arquitectura tanto en la dimensión urbana como en la edificatoria. Porque su carácter fluido impregna todo el proceso de producción y desarrollo de estos ejemplos que no sólo visual sino también funcionalmente, enmarcan la naturaleza que encarnan.

Glosario

Diseño Sostenible: Forma de proyectar respetuosa con el medio, aprovechando los máximos recursos posibles directamente del mismo con cuidado de generar los mínimos impactos.

Materiales primarios: Aquellos que provienen del entorno inmediato sin mayor transformación. Entre ellos, al agua, el aire y el terreno son los más evidentes.

Escenarios construidos con Inteligencia: Aquellos conjuntos configurados tomando ventaja de los recursos cercanos, sin mayor consumo o gasto que el mínimo necesario.

Arquitectura con sentido: Aquella que no consume más recursos que los estrictamente necesarios, y estos con la mínima transformación necesaria. Por así decirlo, aquella que más da y menos demanda.

Caminos del Agua: Se refiere no solamente a los qanats o mayras, sino a los trazados urbanos o periurbanos influenciados por el devenir del agua. Cualquiera que sean sus usos complementarios posteriores.

Cañones urbanos: Corredores entre los edificios de una ciudad capaces de acelerar la velocidad del viento propiciando situaciones de bajo o nulo confort, y en consecuencia anulando la posibilidad de zonas de estancia agradables para la población.

Referencias

- [1] Stahel, (2010) *The Performance Economy*, Second Edition, London, Palgrave-MacMillan, (Edic. original 2006).
- [2] Fdz.-Galiano (Ed), (2010) *Arquitectura: Más por Menos*. Actas del Congreso Internacional de Arquitectura y Sociedad, Pamplona 2010, Fundación Arquitectura y Sociedad, Madrid.
- [3] Saleh Semsar Yazdi, Alireza Bahri, Elahe Ahmadih Yazdi. *Abstracts of the International Conference on Traditional Knowledge for Water Resources Management* (21-22 February 2012) Yazd, Iran.
- [4] Moneo, J.R. (2010) *La Vida de los edificios; La mezquita de Córdoba*, Madrid. Acanilado, (artículo original de la conferencia impartida en la GSD Harvard, 1977).
- [5] Ruiz Cabrero, G. (2013) *Dibujos de la catedral de Córdoba; Visiones de la mezquita*. Madrid. Ediciones This Side Up S.L.
- [6] Novotny, V. Ahern, J. Brown, P. *Water Centric Sustainable Communities: Planning, Retrofitting and ...* 2010 ASLA American Society of Landscape Architects.
- [7] Olgyay, V. *Arquitectura y clima. Manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas*. Barcelona GG 1998. (Edic. Original 196p)
- Givoni, B. *Climate Considerations in building and Urban design*. NY 1998. Van Nostrand Reinhold.
- [8] Terán, F de. *La ciudad y el viento*. Madrid, Revista Arquitectura 1962-1963.
- [9] Munn, R.E. *Air Flow in Urban Areas*. Urban Climates. 1970, Geneva. World Meteorological Organization.
- [10] McHarg, I. *Design with Nature*. 1992 NY John Wiley & Sons. Gustavo Gili 2002. (Edic. original 1969)

Visión económica de la rehabilitación energética de vivienda colectiva

A Collective Housing Energy Renovation Financial Vision

Emilio Miguel Mitre ^{a*}, Raquel Diez Abarca ^b

^a Arquitecto y Master of Environmental Planning. Director de Relaciones Internacionales de GBCe Green Building Council España, ^b Arquitecto. Madrid

Resumen

Habitualmente las intervenciones en los edificios de vivienda colectiva se realizan por una cuestión de necesidad o de obligación, bien porque el envejecimiento del edificio lo requiere o bien porque las autoridades públicas obligan a ello, también por razón de su edad. Es deseable aprovechar esa necesidad u obligación para conseguir que las intervenciones de rehabilitación incluyan aspectos energéticos y se conviertan en práctica viable y corriente. El principal aspecto que va a determinar que se inicie un proceso de rehabilitación energética en un edificio de vivienda colectiva es su viabilidad económica y la capacidad de hacer frente a la inversión por parte de sus propietarios. Para ello un diálogo económico que pueda ser compartido por todos los agentes que intervienen en el proceso se hace necesario. El siguiente estudio propone una herramienta de diálogo económico que puede servir como procedimiento tipificado de análisis de intervenciones de rehabilitación energética profunda de la edificación, para que puedan convertirse en práctica común y totalmente “bancables”.

Palabras clave: Eficiencia Energética, Rehabilitación Energética, Calificación Energética, Coste-Beneficio, Viabilidad Económica, Bancabilidad.

Abstract

Renovations in collective housing are usually undertaken either because of need or obligation; need as a consequence of the poor aging of the building, and obligation as they become mandatory, according to law, also because of the building's age. It would be desirable to take advantage of this need or obligation to ensure that rehabilitation interventions include energy-related aspects and that they become a common and viable practice. The main aspect that will determine the beginning of energy rehabilitation in collective housing is its economic viability and the owner's capability to appreciate and afford it. To that end, an economic dialogue between all the agents of the process is necessary. This study proposes an economic dialogue tool that can be useful as a typified procedure for a holistic energy renovation in buildings analysis, in order to make it a regular practice and totally bankable.

Keywords: Energy Performance, Energetic Renovation, Energy Performance Certificate, Cost-Benefit, Economic Viability, Bankability.

1. Introducción

Existe un claro desafío en el que se encuentran todos los países frente al consumo energético y el cambio climático. Esta problemática no sólo afecta al medioambiente, sino que tiene una influencia directa sobre cuestiones sociales y económicas.

Al respecto es evidente el gran consenso europeo sobre la importancia de la rehabilitación de edificios por su gran potencial de mejora. Por ello, esa inquietud en cuanto a la problemática mencionada se ha ido fraguando a través de nuevas directivas europeas orientadas a la reducción del consumo de energía y de los gases de efecto invernadero,

en las que actuar sobre los edificios existentes es la principal clave para conseguir dichos objetivos.

Las mismas razones han ido marcando la normativa aplicable en España, en especial la Ley de Rehabilitación, Regeneración y Renovación Urbanas, de reciente aprobación. Asimismo, el Plan Estatal de fomento del alquiler de viviendas, la rehabilitación edificatoria, y la regeneración y renovación urbanas, 2013-2016, viene a apoyar esta Ley y supone una apuesta decidida por la rehabilitación.

En la Europa de los 27, el sector de los edificios es uno de los grandes consumidores de energía final. El sector residencial representa el 24% del consumo de dicha energía

* emilio.miguelmitre@gbce.es

Citar como: Miguel Mitre, E., Diez Abarca, R. (2019). Visión económica de la rehabilitación energética de vivienda colectiva. En R. Hernández_Minguillón, O. Irulegi, M. Aranjuelo_Fernández-Miranda (Eds.), *Arquitectura Ecoeficiente* (Tomo II, pp. 114-140). San Sebastián, España. Servicio Editorial de la UPV/EHU

y el terciario el 11%, lo que hace que el sector de la edificación se lleve el 35% del consumo de energía final [1].

En nuestro país, las cifras no son muy diferentes. En España las necesidades energéticas del sector residencial significan el 18% del consumo de energía final total y el 25% de la demanda de energía eléctrica. Si añadimos las necesidades del sector terciario, el sector de la edificación tiene un peso del 28% en el consumo de energía final total de nuestro país [2].

Por todo ello, actuar sobre el parque edificado existente resulta clave, teniendo en cuenta además el gran potencial de mejora del parque edificado existente: el 55% del mismo es anterior a 1980, año de la primera normativa que introdujo en España unos criterios mínimos de eficiencia energética.

En España el peso relativo de la rehabilitación dentro del sector de la construcción de vivienda ha sido bajo en relación a la construcción nueva. De hecho, la tasa de rehabilitación del parque edificado existente se ha mantenido por debajo del 0,3% anual [3]. Por ello, en España los edificios mantienen todavía un alto potencial de mejora y actualización que es necesario aprovechar a través de la rehabilitación.

La principal razón de la rehabilitación energética es la eficiencia energética y, en consecuencia, la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, la rehabilitación energética tiene además múltiples beneficios de índole medioambiental, económica y social. A título particular son destacables los siguientes aspectos:

- **Reducción del consumo de energías no renovables.** La mejora del rendimiento energético del edificio conduce a una reducción considerable del consumo de energía. En algunos casos, esta reducción puede ser incluso de un 70-80%. Esto significará una reducción de la presión sobre las energías fósiles y será más abordable la posibilidad de cubrir nuestras necesidades de energía con renovables.
- **Reducción de las emisiones de CO₂ y protección del medioambiente.** La rehabilitación energética de un edificio contribuye directamente a la preservación del medioambiente, especialmente por la reducción de las emisiones de CO₂, principales causantes del cambio climático. Si además se incorporan energías renovables en la actuación, dichas emisiones pueden reducirse incluso a cero.
- **Mejora del confort interior.** Una rehabilitación que cuide aspectos medioambientales mejora no sólo el confort térmico, sino además el acústico, olfativo y visual. Esto implica además un espacio de vida más sano.
- **Mejora de la habitabilidad y de la calidad de vida.** La mejora de estos aspectos es intrínseca a cualquier rehabilitación. La cuestión energética amplía el alcance de los mismos, enriqueciendo de manera significativa la vida de los usuarios.

- **Reducción de los gastos de uso del edificio.** Rehabilitar con una visión global del edificio repercute positivamente en el bolsillo del usuario. Reducir el consumo de energía conlleva verdaderos ahorros en el gasto dedicado al pago de la energía. Y ese ahorro será aún mayor según pase el tiempo, debido a los inevitables futuros aumentos del precio de la energía. Además, la rehabilitación energética puede conducir a la obtención de ayudas públicas que reducirán la inversión, haciendo ésta aún más rentable.
- **Revalorización del inmueble** por la mejora de las condiciones generales del mismo. De la misma manera, un inmueble ahorrador de energía es mucho más atractivo a la hora de venderlo o alquilarlo.

Igualmente, existen una serie de beneficios indiscutibles a nivel global y para la colectividad:

- **Reducción de la dependencia energética.** En la medida en que los edificios existentes sean menos depredadores de energía, estos contribuirán a reducir la alta dependencia energética que tiene nuestro país y, de manera global, a la preservación de los combustibles fósiles.
- **Mejora del patrimonio construido.** El mantenimiento y la adaptación de los edificios antiguos a la normativa actual, así como la actualización de los mismos para mejorar el confort y adaptarse a las necesidades actuales de los usuarios, son motores imprescindibles para conservar el patrimonio construido y mantener su atractivo.
- **Activación económica.** El estancamiento de la construcción nueva debido al abuso de prácticas especulativas de los años de la burbuja inmobiliaria es un modelo al que no se debe ni se puede volver. La reorientación del sector de la construcción hacia la rehabilitación podría tener como beneficio añadido una reactivación de la actividad económica.
- **Mejora del mercado de trabajo.** El papel protagonista que debe tener la rehabilitación en el campo de la edificación, además del impulso de los factores económicos señalados, sería sin duda un valor determinante en el impulso de valores sociales, como es la mejora del mercado de trabajo.

Respecto a estos dos últimos aspectos, el Grupo de Trabajo sobre la Rehabilitación en su Informe de 2012 es claro: “Con el marco regulatorio adecuado, rehabilitar y actualizar el parque de viviendas es una tarea factible y económicamente viable en España, y la mejora de la eficiencia energética debe constituir el eje sobre el que se reformule el sector de la edificación para crear ahorros, mejorar la calidad de vida en los hogares, y generar empleo en un sector terriblemente castigado por la crisis” [4].

Las investigaciones señalan que, en Alemania, de 14 a 16 empleos son creados por cada millón de euros invertidos al año en rehabilitación edificatoria. A su vez, el presupuesto estatal se ve incrementado debido a la recaudación en IVA, a los impuestos sobre los beneficios

de las empresas, ahorro en el gasto en salud, ahorros en la factura energética de los edificios públicos, reducción del gasto en indemnizaciones por desempleo, etc. [5].

2. Problemática

Rehabilitar un edificio deriva de la necesidad primera de conservación para que el edificio mantenga unas determinadas condiciones de habitabilidad, prolongando así la vida útil del mismo. Sin embargo, las condiciones de habitabilidad exigibles a los edificios se han ido ampliando y adaptando a los requerimientos y necesidades actuales, tanto por las exigencias normativas como por el contexto medioambiental y energético actual.

Un proceso rehabilitador de un edificio que recoja tanto aspectos puramente de conservación y de habitabilidad, como energéticos resulta complejo. La problemática a la que se ha de hacer frente a la hora de rehabilitar un edificio va más allá de los aspectos puramente técnicos y arquitectónicos. Los aspectos a resolver se podrían agrupar en las siguientes categorías, que recogen una serie de preguntas a contestar y problemas a resolver:

- **Técnicos:**
 - evaluación inicial y diagnóstico de la situación del inmueble
 - potencial de mejora
 - hasta dónde llegar en la reducción del consumo
 - qué hacer y cómo
- **Normativos y legales:**
 - ¿a qué obliga la ley?
 - ¿qué permite hacer la normativa?
 - ¿el edificio está protegido?
- **Económicos:**
 - ¿cuánto cuesta el proceso completo?
 - ¿qué ahorros en gasto energético se conseguirán?
 - ¿de qué subvenciones y ayudas se disponen para la actuación?
 - ¿en cuánto tiempo se amortizará la inversión?
- **Organizativos:**
 - Acuerdos entre propietarios sobre la rehabilitación
 - Contratación de los diferentes agentes intervinientes

A su vez las cuatro categorías anteriores quedan tocadas transversalmente y se van a ver condicionadas por los siguientes aspectos:

- Función y uso a la que está destinado el edificio
- Tipología edificatoria
- Sistema constructivo existente

Esta multiplicidad de parámetros a resolver hace que la rehabilitación se convierta en algo difícil de abordar. La dificultad es aún mayor en los edificios de vivienda colectiva, puesto que su puesta en marcha es mucho más compleja. En última instancia, lo que va a determinar que se inicie un proceso de rehabilitación en un edificio de

vivienda colectiva es su viabilidad económica y la capacidad de hacer frente a la inversión por parte de sus propietarios. Un escollo también importante es la dificultad de acuerdo entre los vecinos de la comunidad, pero incluso ese acuerdo va a depender en gran medida de la posibilidad de aceptar la inversión económica. La problemática restante, aunque importante y con sus dificultades concretas, no será un impedimento para llevar a término la rehabilitación una vez que se ha decidido hacer frente a la inversión por parte de la comunidad de propietarios.

Por todo ello, en general las obras de rehabilitación en edificios de vivienda colectiva se centran en aspectos prioritarios y urgentes, dejando de lado las mejoras energéticas que, hechas conjuntamente con las obras de conservación, generarían una serie de sinergias y beneficios que se están desaprovechando. Ello se debe a que todavía no se valora lo suficiente el comportamiento energético de la vivienda frente a otras características de la misma, por el desconocimiento general de los múltiples beneficios económicos, medioambientales y sociales a que puede conducir una rehabilitación energética.

3. Referentes de éxito

El objetivo fijado por la Unión Europea para 2050 es reducir las emisiones de CO₂ del sector de la edificación de entre un 88 y 91% respecto a los niveles existentes en 1990. Dentro de este objetivo, para hacer efectivo el potencial de la rehabilitación de los edificios y, en consecuencia, reducir radicalmente su consumo de energía, resulta fundamental que se implanten políticas y estrategias globales con objetivos a largo plazo.

Un estudio realizado en 2010 sobre el parque residencial existente, muestra que en la mayoría de los países europeos (66%) existe alguna normativa que regule el alcance y el concepto de rehabilitación [6]. Prácticamente todas esas normativas contemplan aspectos energéticos, lo que indica la importancia y dimensión de los mismos en la rehabilitación.

Sin embargo, es crucial para conseguir los objetivos energéticos la implantación de planes de estímulo y estrategias específicas que conduzcan a la consecución de los objetivos marcados dentro del sector de la edificación. Para ello, dichos planes deben contener ayudas a la inversión, ya sea de manera directa o a través de la financiación. Existen precedentes de intervenciones en diversos países que son y han sido casos de éxito.

3.1. Alemania

El programa “Rehabilitación y construcción eficiente”, es uno de los programas más fuertes de financiación en Europa para reducir los impactos sobre el clima de los edificios residenciales. Desarrollado por el banco estatal KfW Förderbank desde 2006, es una clara referencia de éxito en políticas de estímulo de la rehabilitación edificatoria: entre 2006 y 2009, el programa ha financiado la rehabilitación energética de 1 millón de viviendas, lo que

ha supuesto a su vez la creación de 240.000 nuevos empleos. El programa arrastra también la inversión privada, lo que propicia que por cada euro invertido por el gobierno en subsidiar la financiación, los mercados privados y los propietarios invirtieran 4, llegando algunos años a doblarse esa cantidad. La participación de los bancos privados asegura el alcance del programa, con tasas de interés subsidiadas del 2,75% o menores [3].

Entre 2005 y 2008 los programas de financiación fueron evaluados a través de una encuesta en profundidad y arrojó como resultado que, de media, la reducción del consumo de energía final es del 48% con respecto al estado inicial [7].

3.2. Reino Unido

El programa “Estrategia contra la pobreza energética” en Reino Unido, ha pretendido erradicar la pobreza energética en 2018 y se dirige a los hogares cuyo gasto en energía para calefacción supone más de un 10% de sus ingresos. Uno de los pilares clave del programa es la mejora de la eficiencia energética de las viviendas. Sólo en Inglaterra, bajo el programa Warm Front cuyo objetivo es mejorar el sistema de calefacción y el aislamiento térmico, 1,6 millones de hogares se han visto beneficiados por las ayudas entre 2000 y 2007. En Escocia ha permitido aislar térmicamente 250.000 viviendas.

Por otro lado, el programa “Carbon Emissions Reduction Target (CERT)”, antes “Energy Efficiency Commitment”, obliga a las empresas suministradoras de energía a mejorar la eficiencia energética de los hogares a los que dan servicio. Junto con la exigencia de certificados de eficiencia energética para la venta o alquiler de viviendas, se aumentó la actividad rehabilitadora energéticamente, completándose con el Community Energy Saving Programme, CESP, cuyo objetivo es la mejora del aislamiento térmico de las viviendas con más bajos ingresos.

El programa “Green Deal” viene a completar el apoyo del gobierno a la rehabilitación energética desde 2012 a través de la financiación. No es necesaria una inversión inicial y los costes de la intervención se pagan a través de la factura de energía. Se prevé que a través de este programa sean rehabilitadas energéticamente 1 millón de viviendas al año, con una inversión máxima de 10.000 libras por vivienda.

3.3. Francia

Crédit d'impôt développement durable (CIDD). Se trata de un dispositivo fiscal que permite a los hogares deducirse en su declaración de la renta una parte de los gastos empleados en la realización de obras de rehabilitación de mejora energética de su residencia habitual. Comenzó en 2005 y se extenderá hasta 2015. Entre 2005 y 2008 el gasto del estado en este concepto ha pasado de 400 millones a 2.500 millones de euros anuales [7].

El “eco-préstamo a tasa cero” completa la gama de instrumentos del gobierno francés para estimular la rehabilitación energética. Permite desde abril 2009

financiar las obras de rehabilitación energética en vivienda sin necesidad de adelantar ninguna cantidad inicial y sin pagar intereses.

El objetivo de ambas medidas es la rehabilitación de 400.000 viviendas al año desde 2013.

3.4. Estados Unidos

A través del programa “Energy Efficient Mortgage Program, EEM”, el Gobierno Federal de EE.UU. apoya la financiación para la mejora de la eficiencia energética de las viviendas, ofreciendo préstamos adicionales de hasta el 5% del valor de la vivienda.

Igualmente, el programa PACE (Property Assessed Clean Energy) financia las obras de rehabilitación energética y las instalaciones de energía renovable. La financiación se realiza mediante el ayuntamiento y se devuelve a través de un incremento en el impuesto de propiedad durante 15 o 20 años. De esta manera si la propiedad se vende, la deuda que quede se traspa al nuevo propietario con la venta.

4. El diálogo económico como aspecto imprescindible

El apartado anterior muestra como los casos exitosos de impulso de la rehabilitación van siempre acompañados de una subvención de los costes y/o facilitación de la financiación. Hasta ahora en España pocas ayudas se han dedicado específicamente a la mejora de la eficiencia energética de los edificios existentes y, cuando existen, no son solicitadas por los posibles beneficiarios de las mismas, pues ha habido una falta y error de comunicación en cuanto a las mismas.

A ese defecto de comunicación concreto en torno a las ayudas, se une la inexistencia de un diálogo económico que integre a todos los intervinientes en el proceso de rehabilitación y que sea capaz de transmitir a los propietarios y demás agentes los múltiples beneficios de la rehabilitación energética y la concepción de la misma, no como un gasto, sino como una inversión.

Para conseguir el impulso definitivo de la rehabilitación energética que pretenden la Ley y el Plan mencionados en la introducción, la dimensión económica es la cuestión esencial a resolver, pues constituye un verdadero freno. Para ello un diálogo económico que pueda ser compartido por todos los agentes que intervienen en el proceso se hace necesario. Esto facilitará que todos los intervinientes participen de la misma visión del asunto, utilizando el mismo lenguaje, y que esto constituya un impulso a la rehabilitación energética. Los intervinientes que deberían estar presentes en ese diálogo son los siguientes:

- El **propietario** es el agente principal de un proceso rehabilitador. No hay que olvidar que está integrado en una comunidad de vecinos formada por múltiples perfiles condicionados por:
 - la edad

- la situación socioeconómica
- si se trata de su residencial habitual o no
- El **administrador de fincas** puede y debe tener un papel fundamental como agente sensibilizador, intérprete e, incluso, promotor de la actuación adecuada.
- Los **técnicos** intervinientes en el proyecto de rehabilitación:
 - arquitecto
 - aparejador
 - ingeniero
- Los posibles **agentes financiadores** de la intervención. Al respecto no sólo los bancos pueden actuar en ese sentido, sino que existen otras formas de hacerlo, como por ejemplo, a través de empresas que financian la operación por medio de ahorros amortizables en el tiempo, como las empresas prestadoras de servicios energéticos (ESEs).
- El **notario** o el registrador de la propiedad.
- El encargado de realizar el **mantenimiento** del edificio, por su responsabilidad en el funcionamiento eficaz del edificio, acorde a la actuación realizada.
- El **usuario**, que en numerosas ocasiones no es el propietario, principal interesado en conocer las estrategias implantadas para un óptimo funcionamiento del mismo que pueda maximizar el ahorro conseguido.

Cada rehabilitación es un caso particular a acometer con cuidado, por toda la problemática a la que hay que atender. Las intervenciones más eficaces no tienen por qué ser siempre las mismas, por lo que la actuación dependerá de muchos factores, no sólo técnicos vinculados a la situación del edificio, sino también socioeconómicos y medioambientales. En consecuencia, cada rehabilitación tendrá sus exigencias, sus objetivos y sus medios propios.

Para que la posibilidad de rehabilitación salga adelante, el diálogo económico debe estar presente para que la propuesta de intervención esté al alcance económicamente de los propietarios, teniendo en cuenta los mecanismos de financiación y las posibilidades de subvención existentes. Para ello, en el proceso de toma de decisiones acerca de la intervención tiene que poderse:

- **Evaluar** las posibilidades de intervención global a partir de las necesidades detectadas y el potencial de mejora de los aspectos energéticos del edificio. La evaluación se debe completar con un análisis de los costes de inversión y los ahorros conseguidos.
- **Visualizar** las ventajas de las posibles intervenciones, siendo especialmente importante la comprensión del coste que éstas van a suponer frente al beneficio que van a aportar.
- **Entender** cómo se materializan las estrategias de actuación y las alternativas existentes para ello. Es importante saber a qué subvenciones se tiene acceso y encajar las estrategias de actuación a los condicionantes de las mismas.
- **Acordar** la intervención a llevar a cabo en base a los aspectos señalados. Todos los copropietarios de la

comunidad de vecinos tendrán derecho a participar en la toma de decisiones, para lo que es necesario que se sientan implicados en el proceso, que la inversión sea asumible por todos y que el acuerdo sea más fácil a la hora de tomar la decisión.

- **Comprometerse** a cumplir el acuerdo al que se ha llegado a través de la realización de un proyecto acorde al mismo.
- **Desarrollar** en el proyecto las decisiones y los criterios de intervención que se hayan tomado durante las etapas anteriores, haciéndolos compatibles con la normativa aplicable y resolviendo las cuestiones técnicas que se planteen.
- **Ejecutar** las obras de rehabilitación que conduzcan a la consecución de los objetivos que han marcado la intervención y al coste que se ha estimado.
- **Gestionar** de manera eficaz el edificio y acorde a las estrategias implantadas. De este modo se optimizarán el funcionamiento del edificio y los ahorros en coste energético del mismo.

Habitualmente las intervenciones en los edificios de vivienda colectiva se realizan por una cuestión de necesidad o de obligación, bien porque el envejecimiento del edificio lo requiere o bien porque las autoridades públicas obligan a ello. El objetivo último del proceso planteado es conseguir que estas intervenciones de rehabilitación que incluya aspectos energéticos, se conviertan en práctica viable y corriente.

5. Propuesta de “visualizador” económico sobre un caso concreto de rehabilitación energética de vivienda colectiva

Se trata de una propuesta de herramienta de diálogo económico que puede servir como procedimiento tipificado de análisis de intervenciones de rehabilitación energética profunda de la edificación, para que puedan convertirse en práctica común y totalmente “bancables”.

El siguiente estudio propone un procedimiento de análisis económico completo que incorpora pero va más allá de la idea del periodo de retorno de la inversión (payback) que con demasiada frecuencia supone el final de tantas conversaciones de rehabilitación energética profunda de la edificación.

El enfoque propuesto aquí es el del análisis directo como **un préstamo que debe reintegrarse al cabo de un período de tiempo determinado**.

La idea básica es simple: la suma de los retornos a lo largo del plazo del préstamo debe por lo menos igualar a la suma de todos los costes a lo largo del mismo periodo. En una gráfica en la que la suma de los costes se representen en el eje horizontal y la suma de los retornos en el eje vertical, esto vendría representado como una línea recta con una pendiente igual a 1, lo que hemos llamado la “línea de flotación”. De esta manera se analiza la operación en sus propios términos, no en términos del payback, de parte del total.

Para que la financiación resulte viable, cualquier acción constructiva, o la suma de un conjunto de acciones, debe terminar en un punto que se encuentre por encima de la línea de flotación. Esto será la eficiencia económica de 1.

En el apartado de costes se incluye todo: la gestión de la operación, el coste total de la intervención constructiva que consistirá en varias acciones, las licencias necesarias, los proyectos arquitectónicos e ingenieriles y los trabajos de dirección y supervisión de obras, la operación, incluyendo facturación individualizada, el mantenimiento de la instalación, el IVA (Impuesto sobre el Valor Añadido), que supone un coste para los usuarios individuales... todo. Y además, la financiación al 100% en el período elegido.

La suma de los retornos es el valor económico de la energía consumida de menos como consecuencia de las acciones constructivas, cuyo efecto se simula con arreglo al orden en que se eligen.

Las hipótesis iniciales son que, anualmente, el interés del préstamo se encuentra un 2% por encima de la inflación, y que el crecimiento del coste de la energía es un 2% superior al interés. Para comenzar, el plazo del préstamo se fija a treinta años. Por supuesto, estos valores pueden ajustarse si no se consideran adecuados a la situación del mercado, pero aquí se utilizan como asunciones razonables para este ejercicio, cuyo resultado más importante es el tipo de información que permite intercambiar.

El motor de cálculo que se encuentra tras esta herramienta, que incorpora las secciones de estimación de presupuesto, simulación de ahorros, aplicación de hipótesis económicas y presentación gráfica, permite verificar con rapidez la viabilidad económica de las acciones que se han considerado convenientes para el edificio objeto del estudio.

Se han introducido algunas simplificaciones al objeto de hacerlo más comunicativo, tal vez no totalmente rigurosas en cuanto a ciencia económica, pero que permiten adquirir

una clara percepción de la situación a todos los actores intervinientes (fundamentalmente el promotor y el financiero), para que se pueda alcanzar un acuerdo con más facilidad.

Esta presentación sigue un orden lógico de intervenciones, pero también un recorrido predefinido a beneficio del discurso que se quiere transmitir.

Respecto a la herramienta, algunas aclaraciones importantes:

- Se encuentra en una fase preliminar de desarrollo.
- Para su completa operación deberá ampliarse para incorporar distintas tipologías edificatorias, otras acciones constructivas con un nivel adicional de detalle constructivo, un motor de cálculo más desarrollado, gráficos interactivos, operación online, etc.
- También deberá desarrollarse para permitir distintas utilidades, desde usuarios de la calle (para conseguir una estimación elemental) hasta un uso profesional, tanto financiero como técnico (cuyos resultados son objeto de responsabilidad civil), en un entorno BIM.
- La herramienta deberá servir además para monitorizar los resultados y obtener información de ellos en un proceso de mejora continua.

El ejemplo de intervención

El ejemplo de intervención que se propone es la torre de veinte plantas con ochenta viviendas en Paseo Zorrilla 100, perteneciente al inmueble Paseo Zorrilla 94 -100, en Valladolid. Año de construcción 1961.

Este edificio es ejemplar en su construcción (salvo por la estructura de veinte plantas de altura) y porque es emblemático en Valladolid. En la imagen (figura 1) se ve la fachada este, a Paseo Zorrilla. La torre (en la parte interior del plano a la derecha) tiene cuatro viviendas por planta, dos de 125 m² útiles a sur y dos de 90 m² útiles a norte.

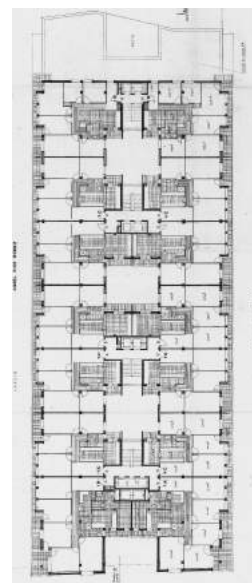


Fig. 1. Edificio objeto de ejemplo situado en Valladolid.

Se ha renovado la producción de calor, que desde hace nueve años consiste en dos calderas de 450 kW de baja temperatura a gas natural con un rendimiento del 88%. En la envolvente han aparecido algunas galerías acristaladas y del orden de un 30% de los vecinos han renovado las ventanas.

Se realiza un análisis termoflujométrico para conocer las características reales de la envolvente. Se mide un valor U que es casi el doble de lo exigible actualmente por el Código Técnico de la Edificación.

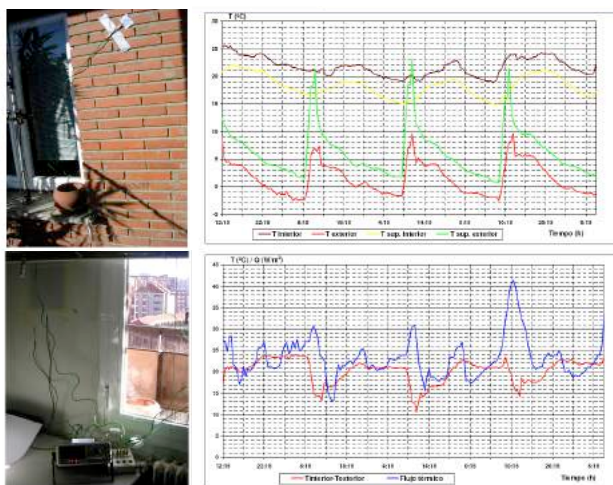


Fig. 2. Análisis termoflujométrico.

Transmitancia $U = 1,17 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$
(el valor requerido por el CTE es $0,66 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$)

Las ventanas tienen acristalamiento sencillo y marcos de acero, con una transmitancia superior a $6 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$. Se aprecian además infiltraciones muy importantes por las cajoneras de las persianas. La adición de una segunda ventana por el exterior se perfila como una solución necesaria.

También se realizan termografías para descubrir los puntos débiles de la envolvente. Es necesario aislar toda la fachada en continuo por el exterior.

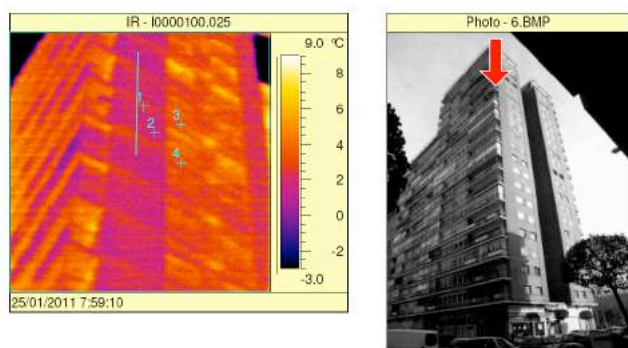


Fig. 3. Termografía.

Se disponen de datos diarios de consumo de gas natural para calefacción y ACS, por lo que se puede discriminar

razonablemente el uno del otro. El consumo total de calefacción y ACS es de $125 \text{ kWh/m}^2 \text{ año}$. El objetivo será reducir este consumo por lo menos un sesenta por ciento.

- Calefacción total: $74.660 \text{ m}^3 \text{ GN/año} = 806.328 \text{ kWh/año}$. **$96 \text{ kWh/m}^2 \text{ año (77\%)}$**
- ACS total: $22.717 \text{ m}^3 \text{ GN/año} = 245.344 \text{ kWh/año}$. **$29 \text{ kWh/m}^2 \text{ año (23\%)}$**

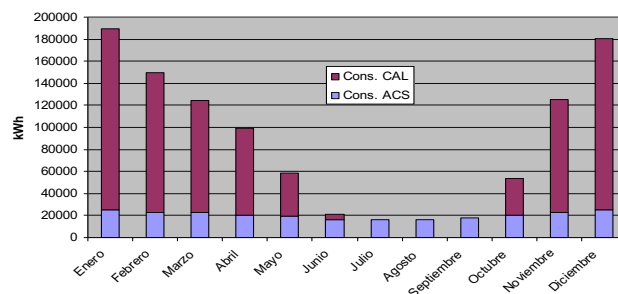


Fig. 4. Consumos de calefacción y ACS.

La evaluación térmica y energética se completa con la modelización en LIDER y la calificación CALENER. El edificio no cumple la exigencia LIDER y su calificación CALENER es F.

Esta evaluación nos va a permitir estimar los ahorros de las distintas intervenciones.

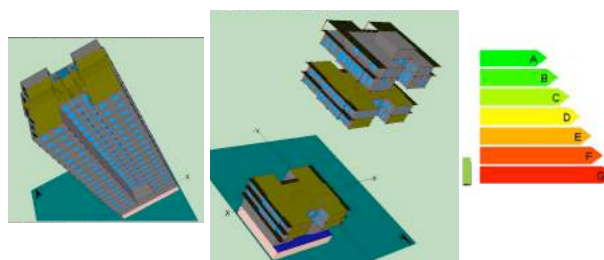


Fig. 5. Evaluación térmica y energética con LIDER y CALENER.

Finalmente, se ha realizado un estudio acústico, con el resultado de que la envolvente solamente proporciona una atenuación acústica que se encuentra 10dba por debajo del valor requerido normativamente.



Fig. 6. Estudio acústico.

Lo cual, en combinación con la elevada exposición proveniente de la calle (en la figura 7 se pueden apreciar en naranja las áreas que se encuentran por encima de los valores permitidos), conduce a la necesidad de mejorar la envolvente.

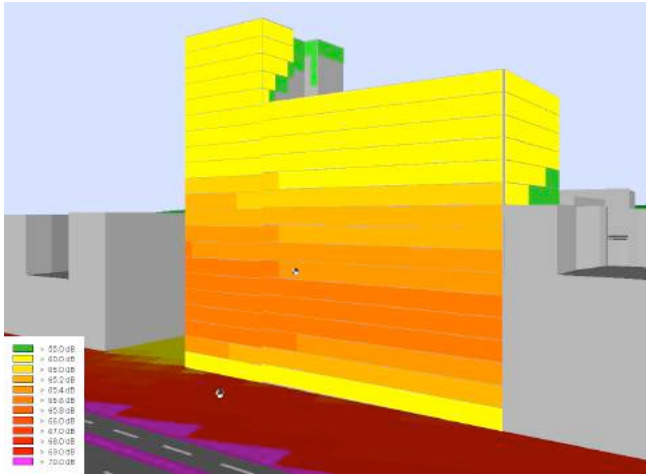


Fig. 7. Nivel de ruido.

En las **fachadas este y oeste** las intervenciones arquitectónicas que se proponen consisten en:

1. Reparación estructural básica de frentes de voladizos y sustitución de barandilla
2. Adición de una segunda ventana al exterior de las actualmente existentes (lo cual resuelve al propio tiempo las infiltraciones y el problema acústico)
3. Aislamiento adicional por el exterior de 8 cm en fachada y 12 cm en cubierta (con lo que la fachada cumpliría sobradamente la normativa)
4. Parasoles móviles (para evitar la necesidad de instalar aire acondicionado), con la posibilidad de que estén automatizados.

En la **fachada sur** las intervenciones arquitectónicas que se proponen consisten en:

1. Reparación estructural básica de frentes de voladizos y sustitución de barandilla
2. Adición de una segunda ventana al exterior de las actualmente existentes (lo cual resuelve al propio tiempo las infiltraciones y el problema acústico)
3. Aislamiento adicional por el exterior de 8 cm en fachada y 12 cm en cubierta (con lo que la fachada cumpliría sobradamente la normativa)
4. Parasoles fijos y captación solar térmica
5. Captación fotovoltaica concentrada o extensa (puede ser capa fina o convencional).

A la **fachada norte** se aplicarán los puntos 1., 2. y 3.

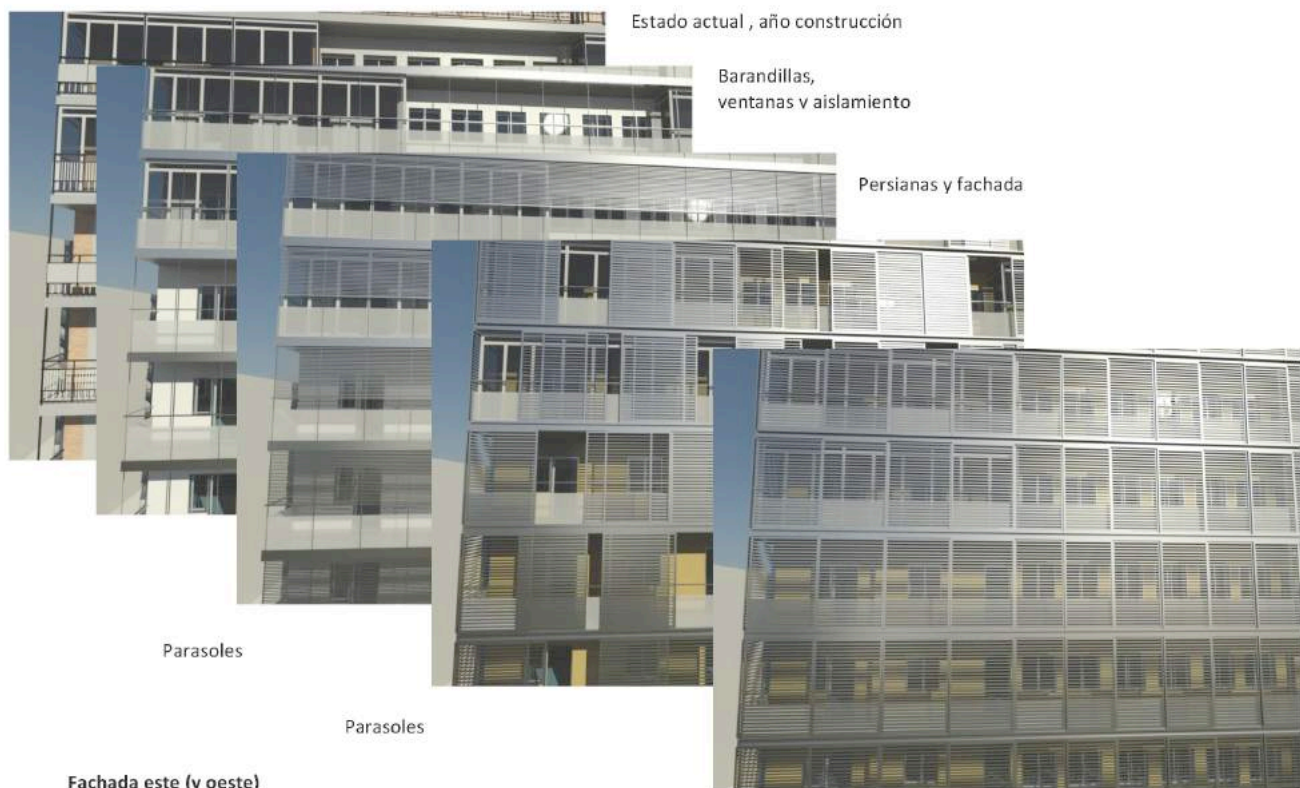


Fig. 8. Propuestas de intervención arquitectónica en las fachadas este y oeste.



Fig. 9. Propuestas de intervención arquitectónica en la fachada sur.

Además se plantea la introducción de captación solar térmica para ACS: 86 m² de captadores solares planos en la cubierta.

E incluso la introducción de calderas de biomasa, sustitución que no es necesaria dado el buen rendimiento de las calderas actuales, pero interesante a los efectos de este estudio, porque permite un balance CO₂ cero en calefacción y ACS.

objetivo es que la gráfica (parte de la derecha) se encuentre por encima de la “línea de flotación”, que es la que corresponde a la pendiente 1.

En el eje horizontal se presenta el coste acumulado de las intervenciones por unidad de vivienda, y en el eje vertical el beneficio económico.

La gráfica también presenta el listado de todos los costes que se introducen y los datos financieros, un balance del consumo, y una estimación de la calificación energética.

El punto de arranque son las hipótesis económicas expresadas antes.

Comenzamos con un préstamo a 30 años.

La calificación energética del edificio es F.

Veamos el efecto de la serie de acciones prevista, comenzando lógicamente por las de reducción de la demanda.

La primera acción (Fig. 11) es la adición de una segunda ventana, que resulta en una “eficiencia económica” de 2, lo que quiere decir que en estas condiciones (30 años, financiación total, todo incluido, etc.) el ahorro que cabe esperar duplicaría la inversión.

Estas son buenas noticias para comenzar, porque esto permitiría tal vez que esta intervención aislada pudiera financiarse a 12 años, pero sigamos con 30 años para conocer cómo funciona esta herramienta.

Esta acción reduce un 15% la energía necesaria (para calefactar el espacio y Agua Caliente Sanitaria o ACS). También tiene un buen efecto acústico.



Fuente: Programa Biomcasa (2000)

Fig. 10. Posibilidad de aplicación de biomasa a la intervención.

A continuación se muestran las diferentes acciones sobre la herramienta de diálogo económico. Como se ha dicho, el

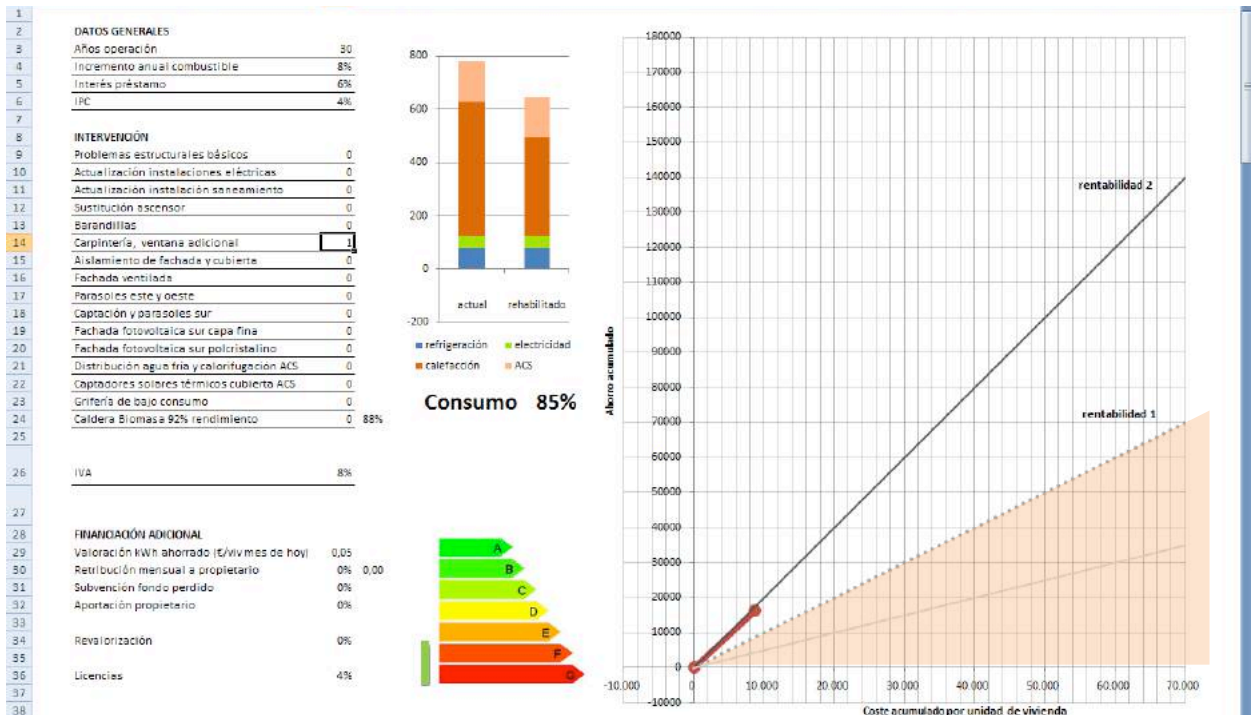


Fig. 11. Herramienta de diálogo económico. Acción 1: adición de una segunda ventana para 30 años de operación.

La segunda acción propuesta es la aplicación de 8 cm de aislamiento por el exterior de la fachada, con un acabado enfoscado de capa fina.

Esta acción también tiene una eficiencia económica de 2, y la reducción del consumo energético alcanza ahora el 32% (Fig. 12).

Éstas son las dos acciones más eficientes, y el proceso podría detenerse aquí, con un coste total de aproximadamente 18.000 € por vivienda si la operación fuera a 30 años (y bastante menos si el préstamo fuera a 12 años).

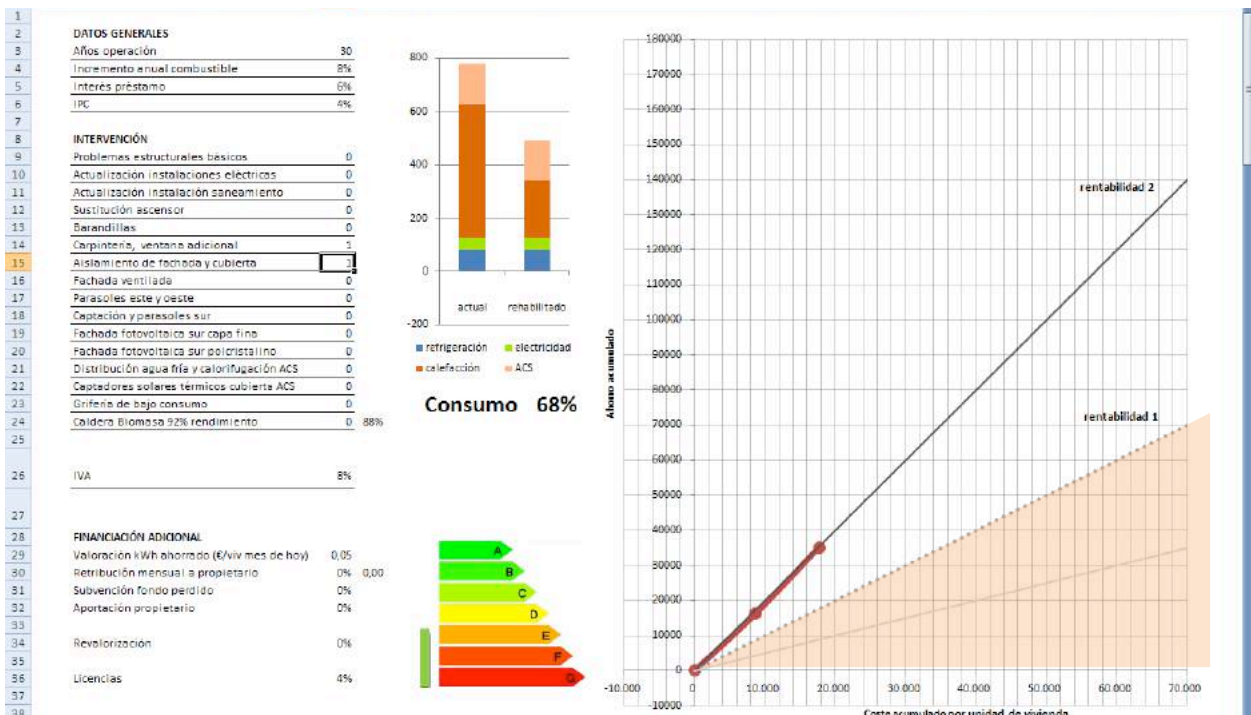


Fig. 12. Herramienta de diálogo económico. Acción 2: acción 1 + aislamiento fachada por el exterior.

Pero habitualmente existe una necesidad de otras reparaciones, por lo que seguimos añadiendo acciones.

La deficiente conservación de los bordes de los voladizos, que está creando un riesgo de desplome a la calle, hace imprescindible su reparación.

Dado que esta acción solamente tiene coste y no reporta un beneficio monetario, la eficiencia económica empeora descendiendo un poco del valor de 2. Los efectos de este proceso (y la lógica de la seguridad) esta acción aparece en la gráfica como ejecutada antes que las anteriores (Fig. 13).

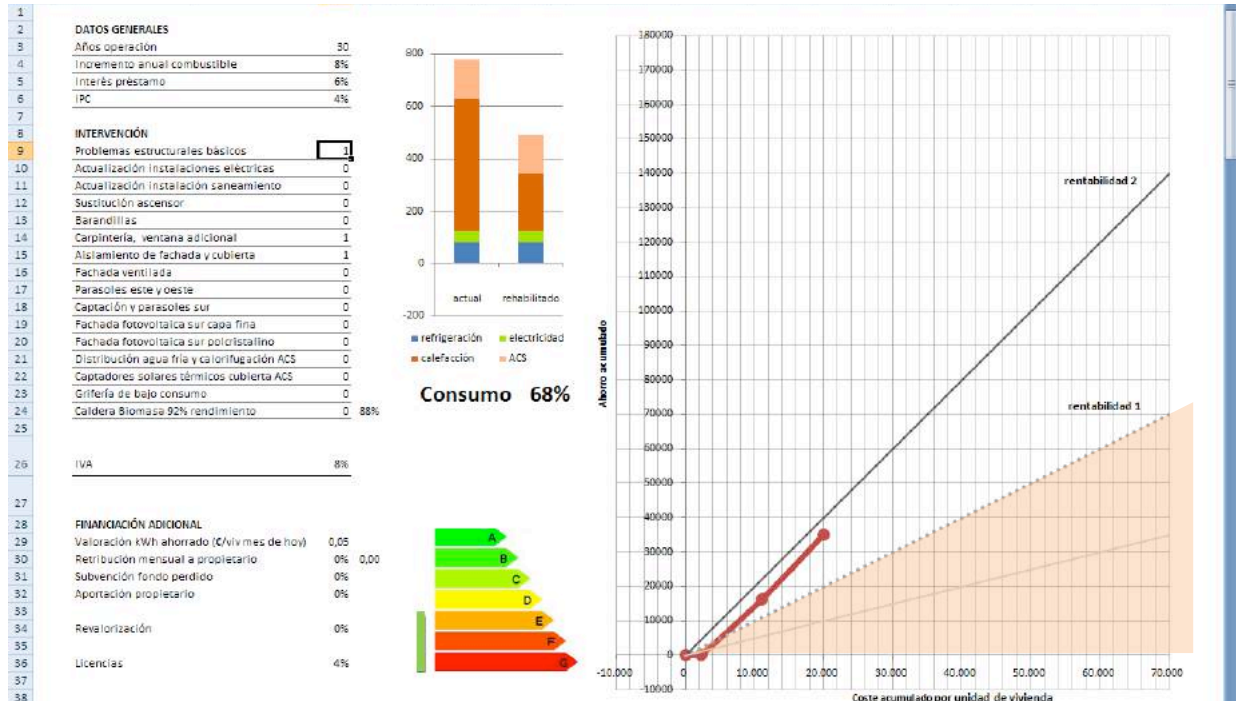


Fig. 13. Herramienta de diálogo económico. Acción 3: acción 2 + reparación bordes voladizos.

También puede considerarse conveniente la sustitución de las barandillas, tal vez por razones solamente estéticas, para que la renovación tenga mejor aspecto (figura 14).

Esta acción tiene un coste mayor que la anterior y la curva empeora un poco más, acercándose a la eficiencia económica de 1, cerca de la “línea de flotación”.

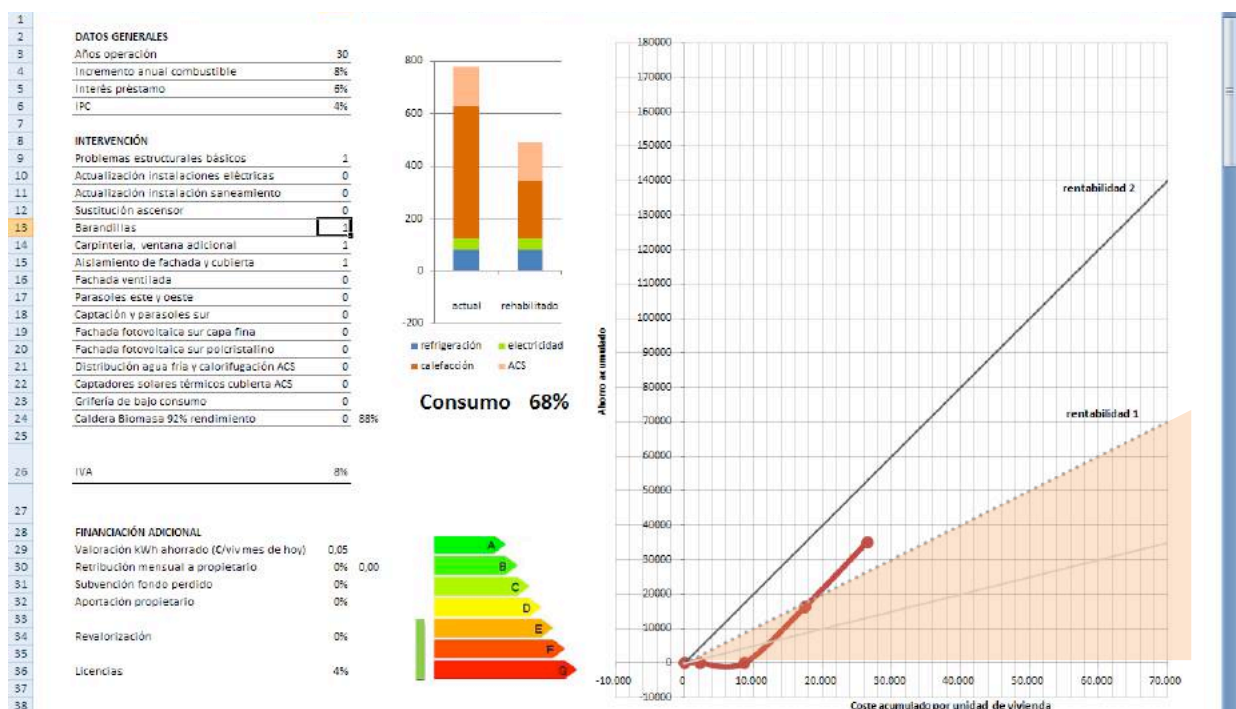


Fig. 14. Herramienta de diálogo económico. Acción 4: acción 3 + sustitución de barandillas.

Éste podría ser un momento adecuado para interrumpir la intervención, porque ya se han llevado a cabo las dos intervenciones de mayor rentabilidad, se ha resuelto el problema de la caída de escombros a la calle y se ha dado una mejor imagen. En este momento el coste a 30 años es aproximadamente 27.000 € por vivienda, que se reduciría ligeramente si se optara por un préstamo a 25 años.

Esto muestra que este tipo de intervención “básica” de rehabilitación energética que resuelve además un problema de conservación y seguridad es totalmente viables con préstamos a largo plazo. Todo ello aún si tener en cuenta la posibilidad de ayudas por parte de las administraciones públicas.

Para intentar avanzar algo más en el proceso de análisis, podemos introducir una solución de fachada ventilada .

Como ésta se aplica adicionalmente al aislamiento exterior ya dispuesto, su contribución en términos de reducción de consumo de energía es baja, de sólo un 2% (figura 15).

Y... tiene un coste relativamente alto, así que esta acción debería considerarse en función de la mejora de la imagen del edificio y el valor que esto representa, aspecto siempre importante. Mantenemos la acción por esta razón.

Ahora tenemos además una buena imagen totalmente financiada, con un coste de 33.000 € a lo largo de 30 años.

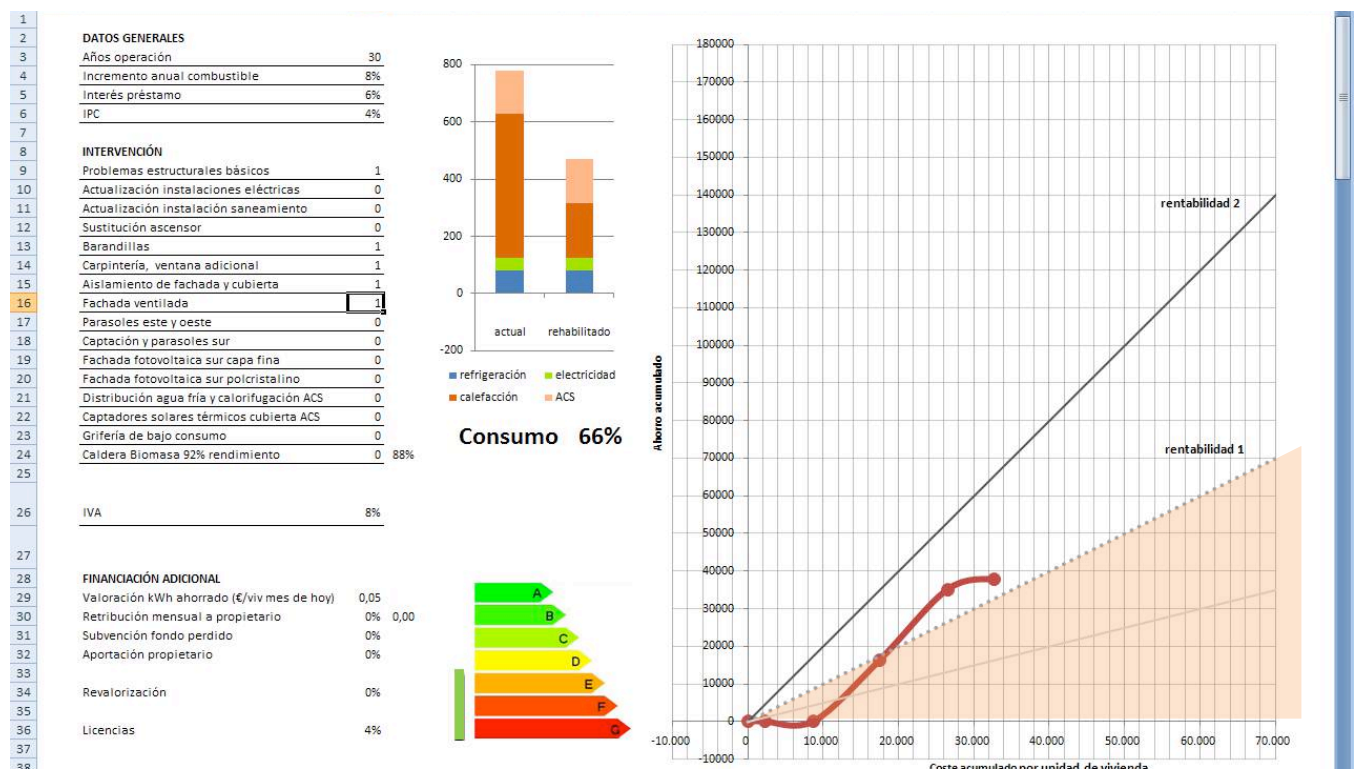


Fig. 15. Herramienta de diálogo económico. Acción 5: igual a acción 4, pero aislamiento exterior con fachada ventilada.

Continuamos añadiendo cosas. El siguiente paso lógico son parasoles en las fachadas este y oeste. Esta solución es de alta calidad, con paneles automatizados deslizantes de lamas horizontales.

En este caso, de nuevo la pendiente de la acción (por debajo de 1 para 30 años) muestra que tiene un coste alto en relación con el beneficio energético/económico, que solamente tiene lugar en verano.

Mantenemos esta acción sin embargo porque es importante para minimizar la necesidad de aire acondicionado... y todavía seguimos por encima de la línea de flotación, con un coste acumulado a lo largo de los 30 años de unos 47.000 €. Todavía viable, y con una reducción de consumo energético del 43% (Fig. 16).

De nuevo, éste podría ser un buen momento para parar, porque hemos terminado con las principales acciones de reducción de la demanda, a través exclusivamente de acciones que actúan sobre la envolvente.

Pero sigamos ahora con las acciones que aportan energía al edificio.

Una primera acción es la instalación de captadores solares de aire en la fachada sur.

En conjunto ésta no es una acción con un resultado energético muy bueno porque solamente es beneficiosa en invierno, sólo para las viviendas orientadas a sur, y sólo en ciertos momentos, pero decidimos mantenerla en este discurso... aunque la curva está empezando a caer por debajo de la línea de flotación (Fig. 17).

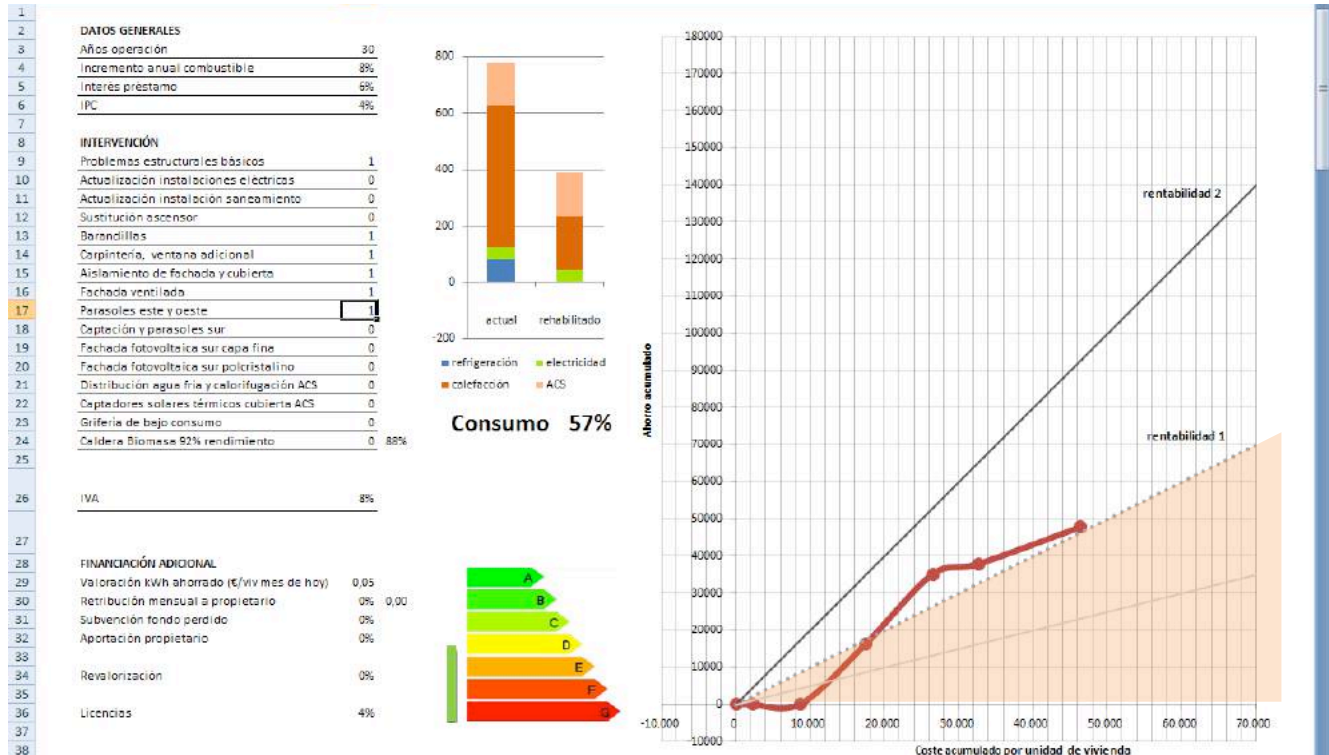


Fig. 16. Herramienta de diálogo económico. Acción 6: acción 5 + parasoles en fachadas este y oeste

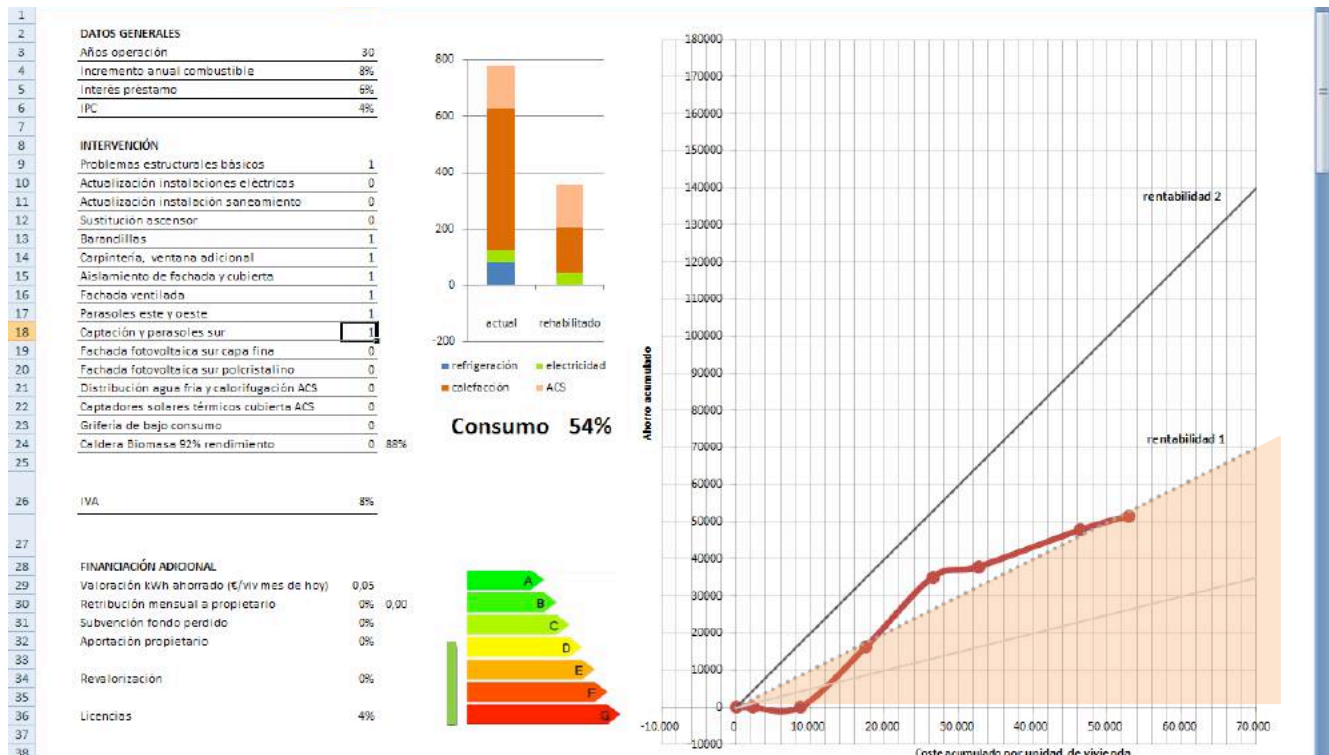


Fig. 17. Herramienta de diálogo económico. Acción 7: acción 6 + captadores solares de aire en fachada sur

Otra acción puede ser la instalación de una pequeña superficie de paneles fotovoltaicos en la fachada sur.

En esta simulación no se ha aplicado ningún tipo de subvención ni primas (Fig. 18).

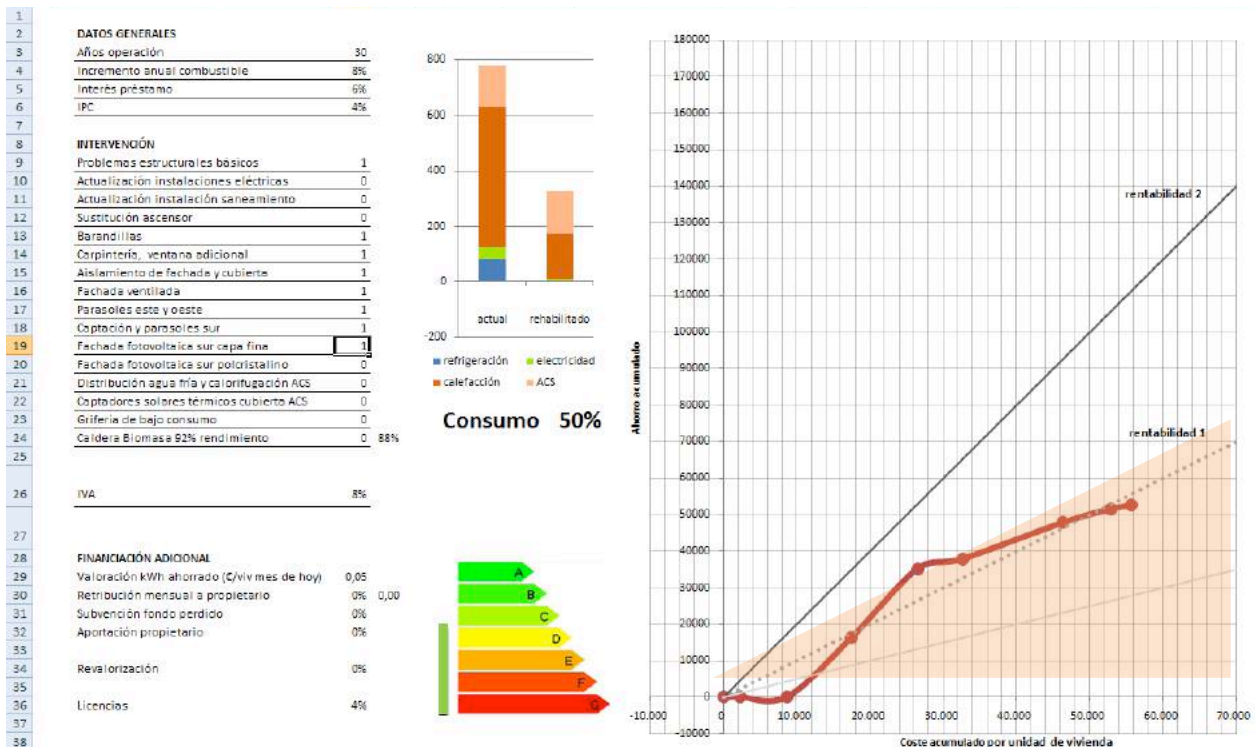


Fig. 18. Herramienta de diálogo económico. Acción 8: acción 7 + pequeña instalación fotovoltaica en fachada sur

Una instalación fotovoltaica más grande también es posible, hasta el punto de prácticamente “tapizar” toda la fachada sur, con una producción de energía que puede exceder la consumida en los espacios comunes.

La reducción de consumo energético alcanza ahora un 56%, y la calificación energética se convierte en una C (Fig. 19).

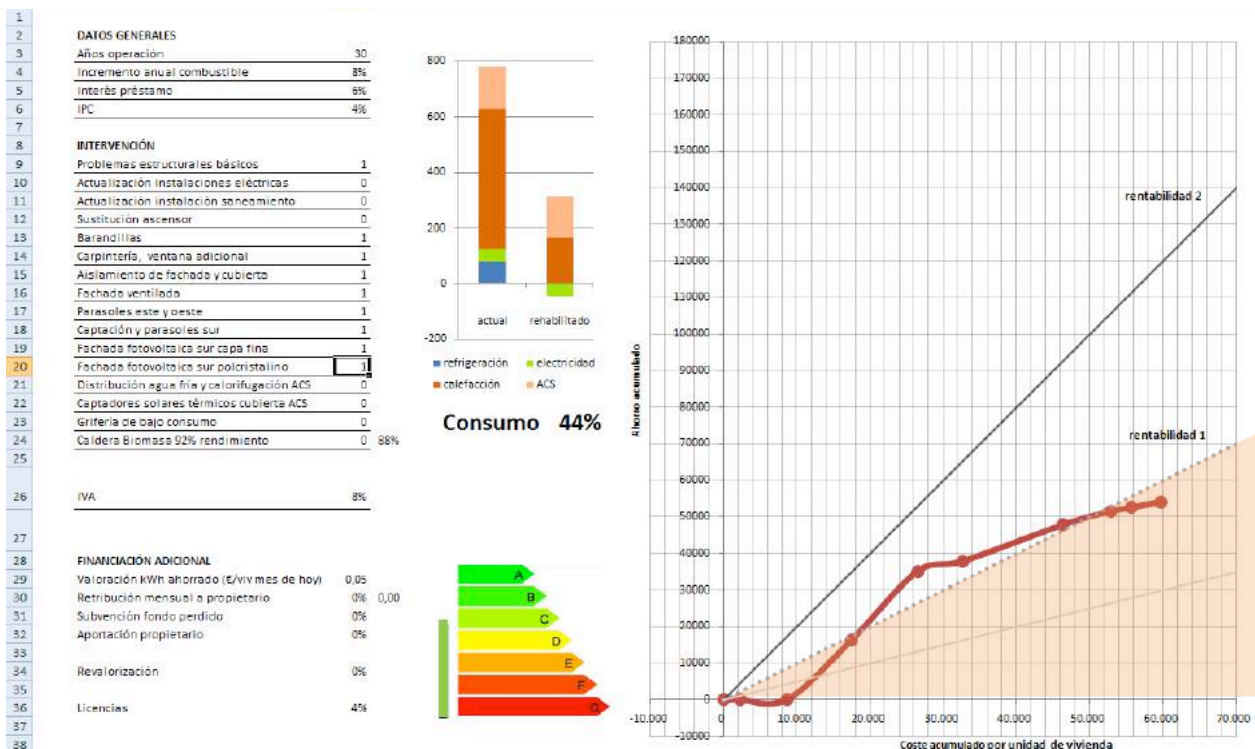


Fig. 19. Herramienta de diálogo económico. Acción 9: igual a acción 8, pero con instalación fotovoltaica de más superficie.

La curva está cayendo por debajo de la línea de flotación pero todavía hay otras acciones posibles....

Podemos aislar además la distribución de agua caliente sanitaria (Fig. 20).

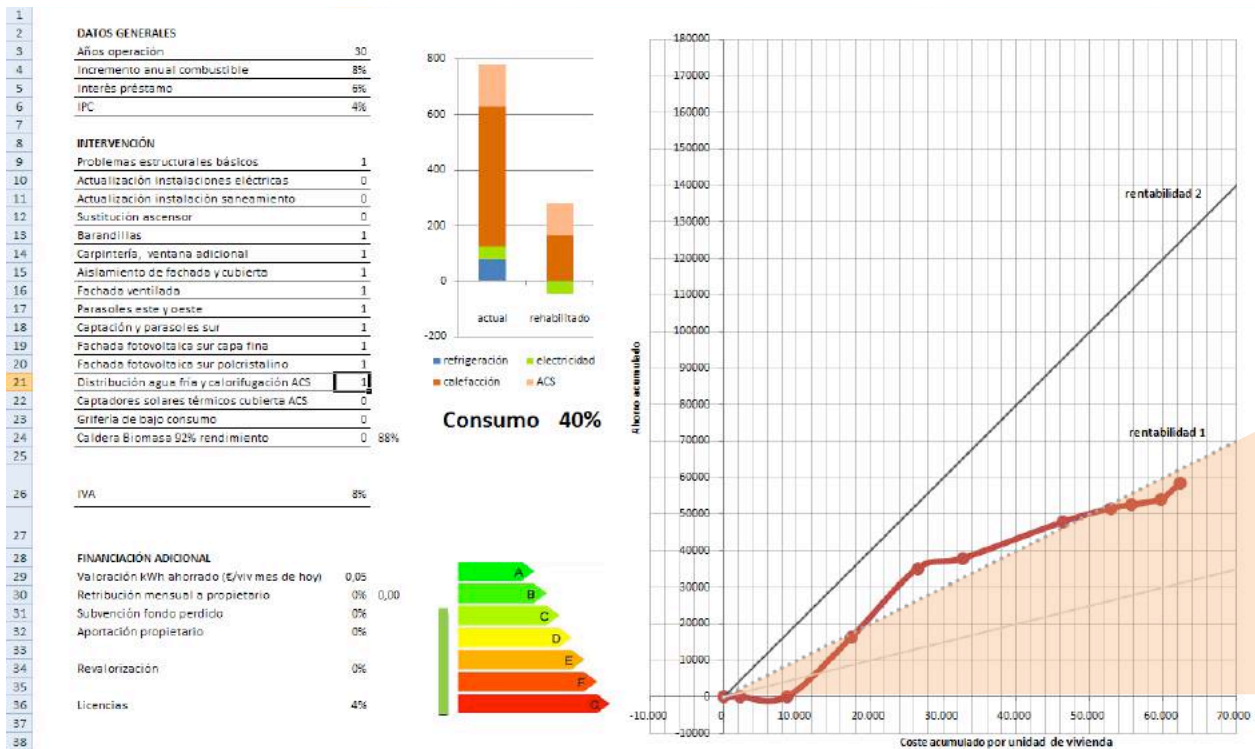


Fig. 20. Herramienta de diálogo económico. Acción 10: acción 9 + aislamiento tuberías de ACS

...instalar 86 m2 de captador solar plano para agua caliente sanitaria, lo que proporcionará un 50% del ACS a lo largo del año... (Fig. 21).

...porcentaje que puede subir al 70% si se utilizan griferías de bajo consumo (Fig. 22).

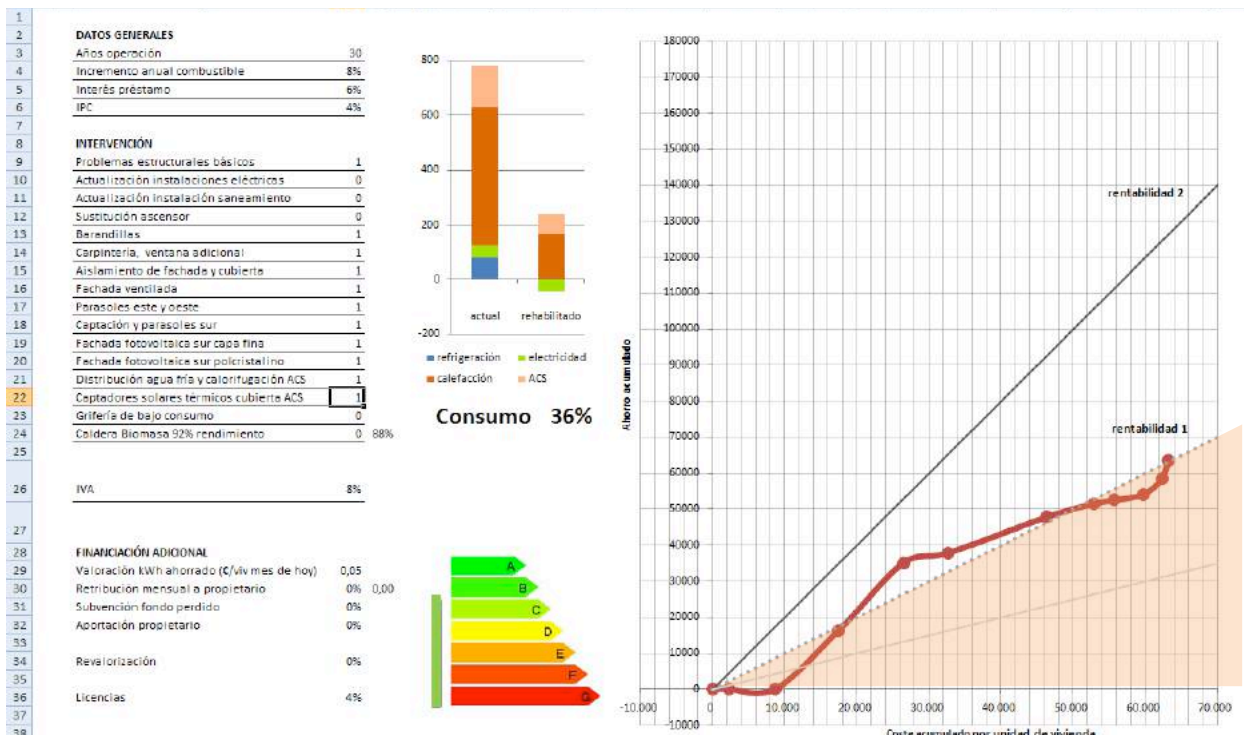


Fig. 21. Herramienta de diálogo económico. Acción 11: acción 10 + captadores solares planos para ACS

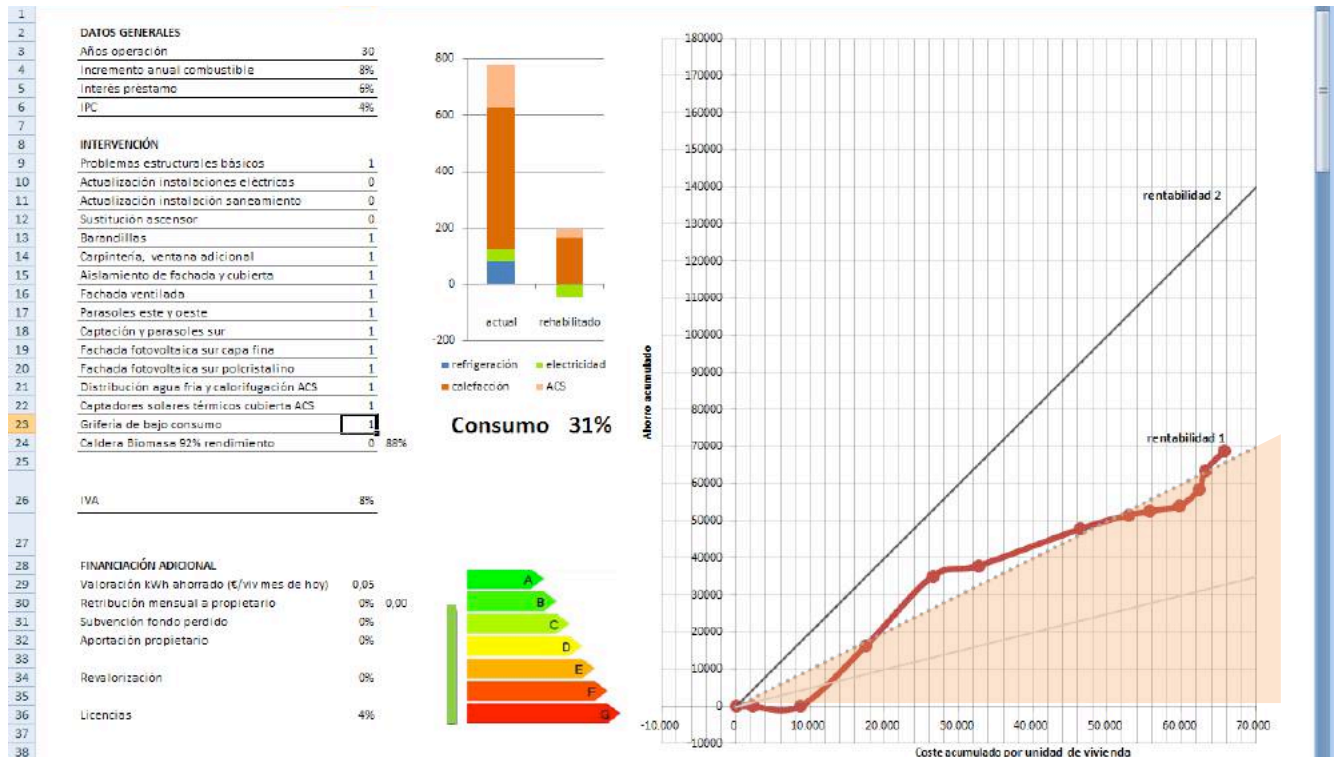


Fig. 22. Herramienta de diálogo económico. Acción 12: acción 11 + griferías de bajo consumo

Éste es un momento importante. Hemos alcanzado una reducción de consumo energético de un 69% y, a lo largo de los 30 años de la operación, hemos puesto en circulación unos 66.000 € por vivienda, con los efectos beneficiosos que esto puede tener sobre el empleo y el medio ambiente.

Conviene recordar que esta serie de acciones se ha podido ejecutar con una financiación al 100%. Por supuesto, 30 años es un plazo largo, pero la operación es totalmente viable... o lo será., cuando adquiera mayor “bancabilidad”.

Hasta que llegue ese momento, veamos el efecto de otras aportaciones económicas, de fuente pública, que podrían facilitar la intervención.

Como primera posibilidad, se podría retribuir la operación con 0,05 € por cada kWh no consumido (el llamado “negaWatio hora”), en relación con los datos de antes de la intervención.

Esto podría hacerse con facilidad porque se conoce perfectamente el consumo de antes y el de después. Esto

actuaría con un poderoso incentivo al ahorro, para lo cual sería necesario realizar una medición (y facturación) individualizada de consumos.

Como este input se distribuiría a lo largo de la vida del edificio, no representa mucho dinero inicialmente, pero tiene un efecto extraordinario en la eficiencia económica, haciendo que salte hasta un valor cercano a 2 (Fig. 23), y facilita indiscutiblemente el pago del préstamo.

...muy buenas noticias, porque esto permitiría un préstamo a 25 años en lugar de a treinta, circunstancia que seguramente sería contemplada positivamente por cualquier entidad financiera (Fig. 24).

El uso de dineros públicos se justifica plenamente por los beneficios socioeconómicos de este tipo de intervención, habiéndose demostrado ya además un retorno a las arcas públicas de entre 2 y 4 veces su valor, gracias a su efecto dinámico, que hace que el concepto de subvención evolucione al de inversión o, por lo menos, al de financiación pura.

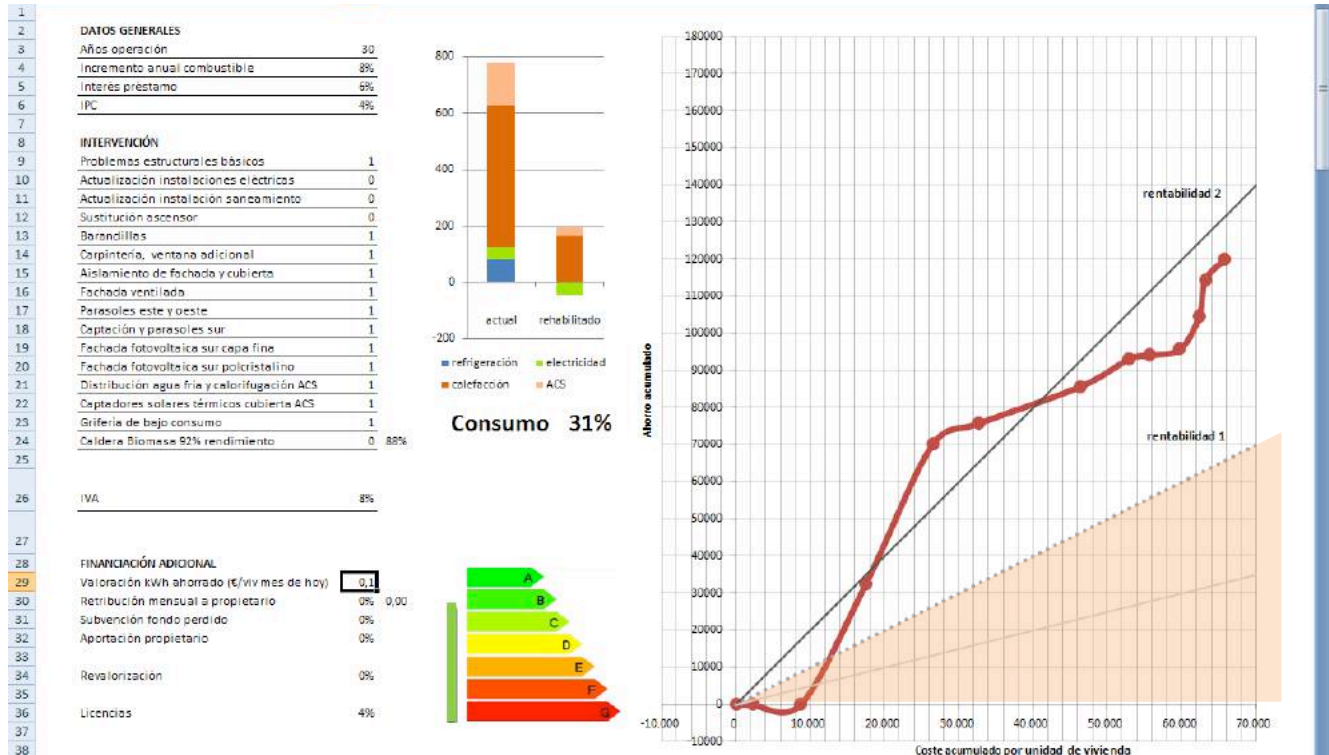


Fig. 23. Herramienta de diálogo económico. Acción 13: acción 12 + retribución pública de 0,05 € por cada kWh no consumido

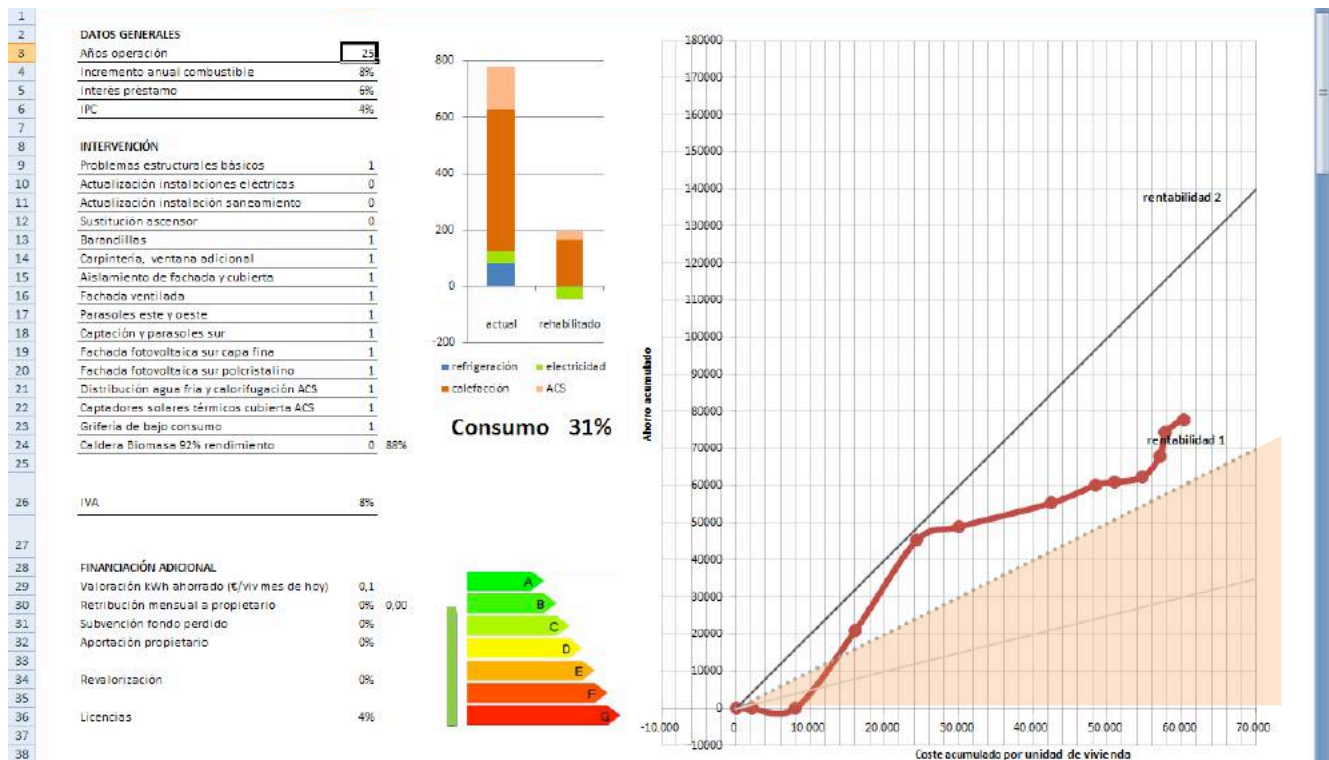


Fig. 24. Herramienta de diálogo económico. Acción 14: acción 13, pero con crédito a 25 años en lugar de a 30.

Una segunda posible utilización de dineros públicos es la de cubrir los intereses del préstamo, o al menos una parte de ellos (en este caso se supone que se cubre un 5% del 6% total).

Esto hace que la curva salte de nuevo a una eficiencia económica de 2... (Fig. 25).

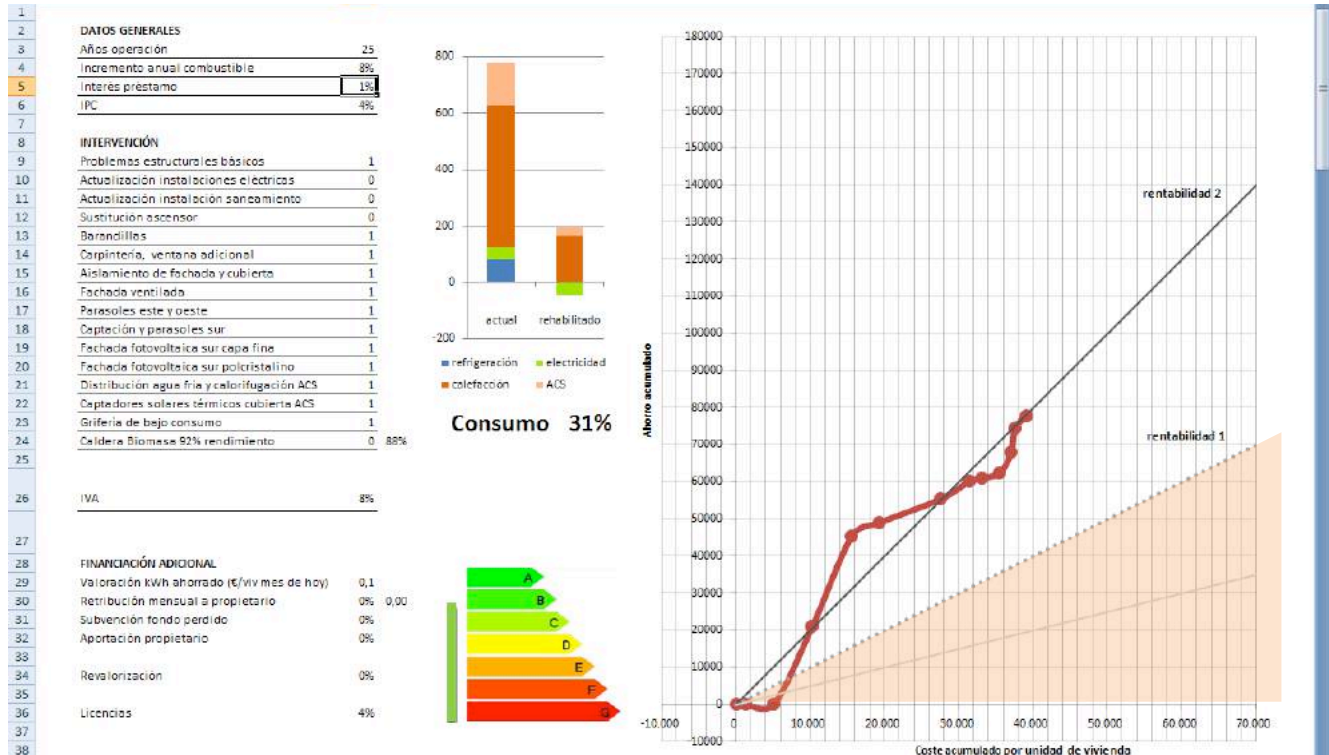


Fig. 25. Herramienta de diálogo económico. Acción 15: acción 14 + intereses del crédito subvencionados (5-6% del total).

Lo que nos permitiría reducir el plazo del préstamo a 20 años,... ¡manteniéndonos todavía por encima de la línea de

flotación! Sin duda una operación a 20 años sería todavía más atractiva desde el punto de vista financiero (Fig. 26).

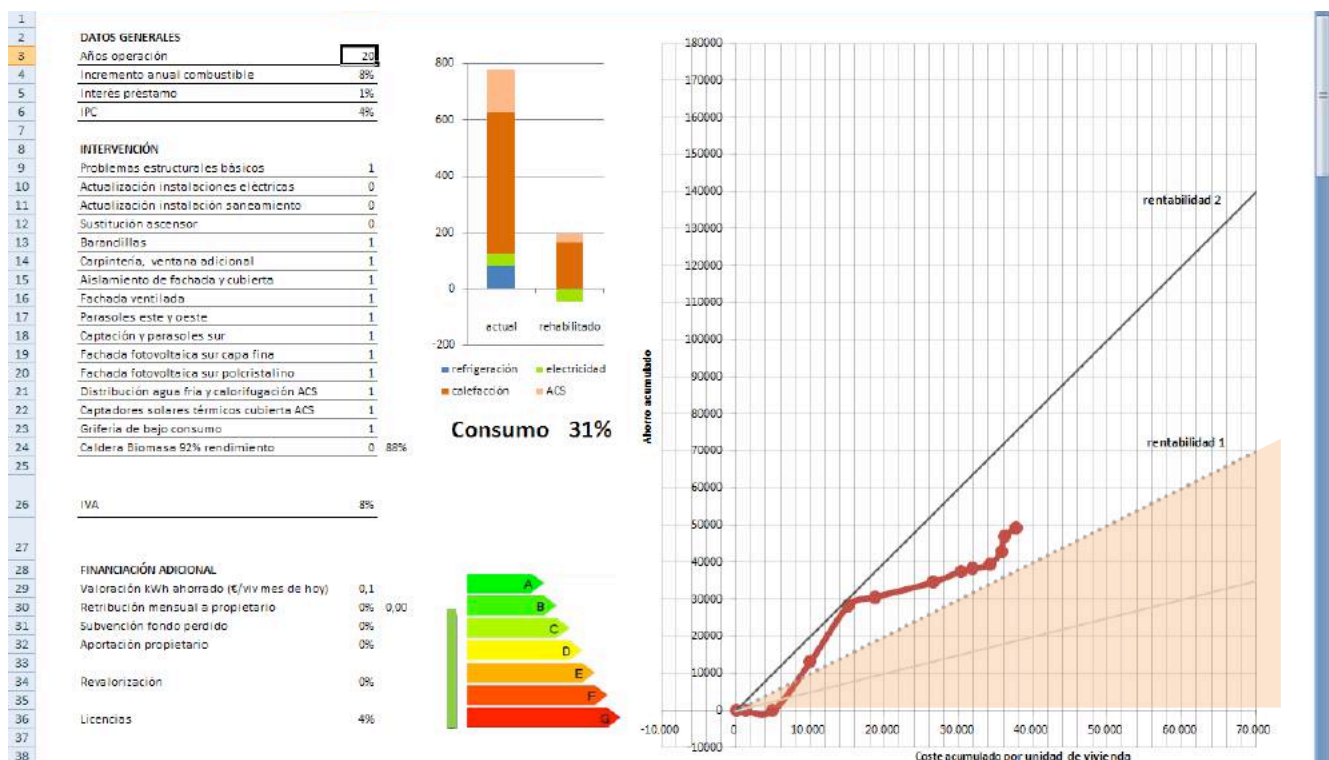


Fig. 26. Herramienta de diálogo económico. Acción 15: acción 15, pero con crédito a 20 años en lugar de a 25.

Esta situación incluso permitiría la puesta al día de otras instalaciones del edificio como la eléctrica (Fig. 27),
... el saneamiento (Fig. 28),

... ¡y sustituir el ascensor! (Fig. 29)
... manteniéndonos todavía por encima de la eficiencia económica de 1.

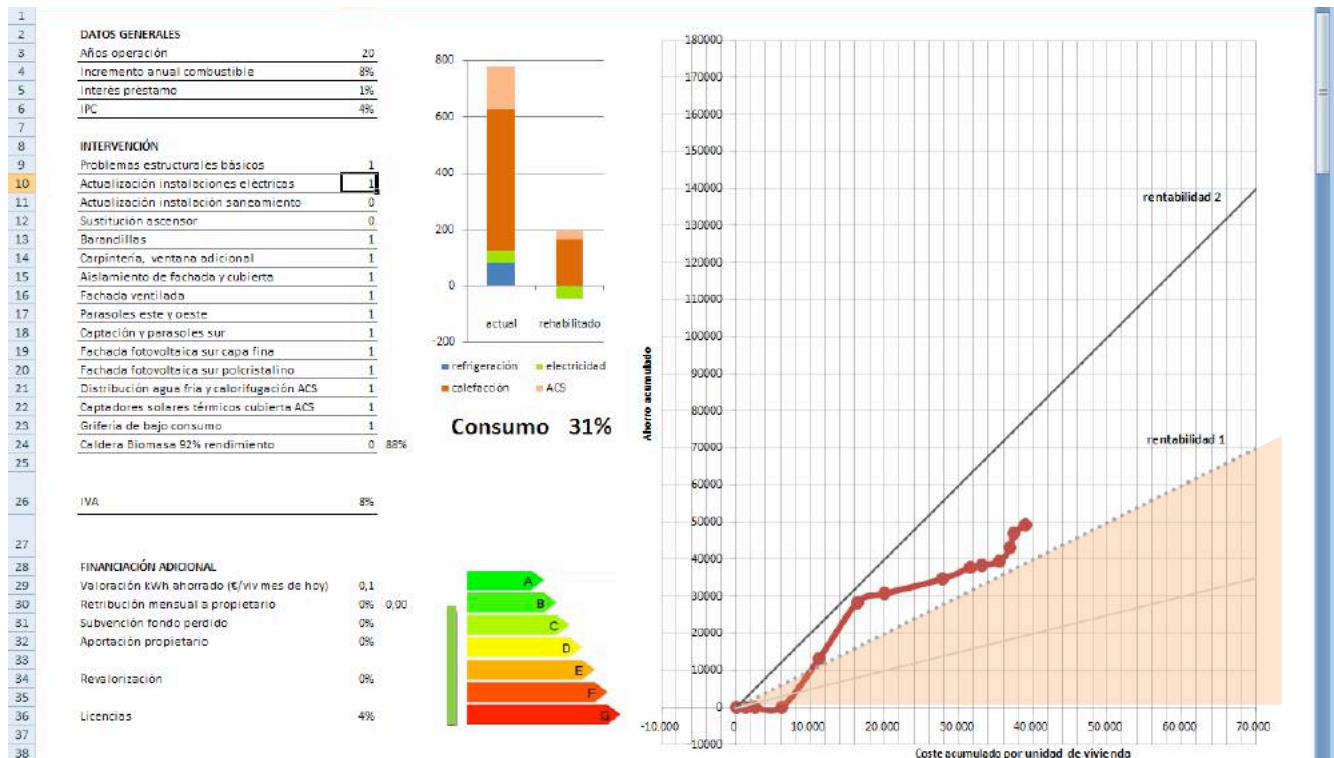


Fig. 27. Herramienta de diálogo económico. Acción 16: acción 15 + puesta al día instalación eléctrica.

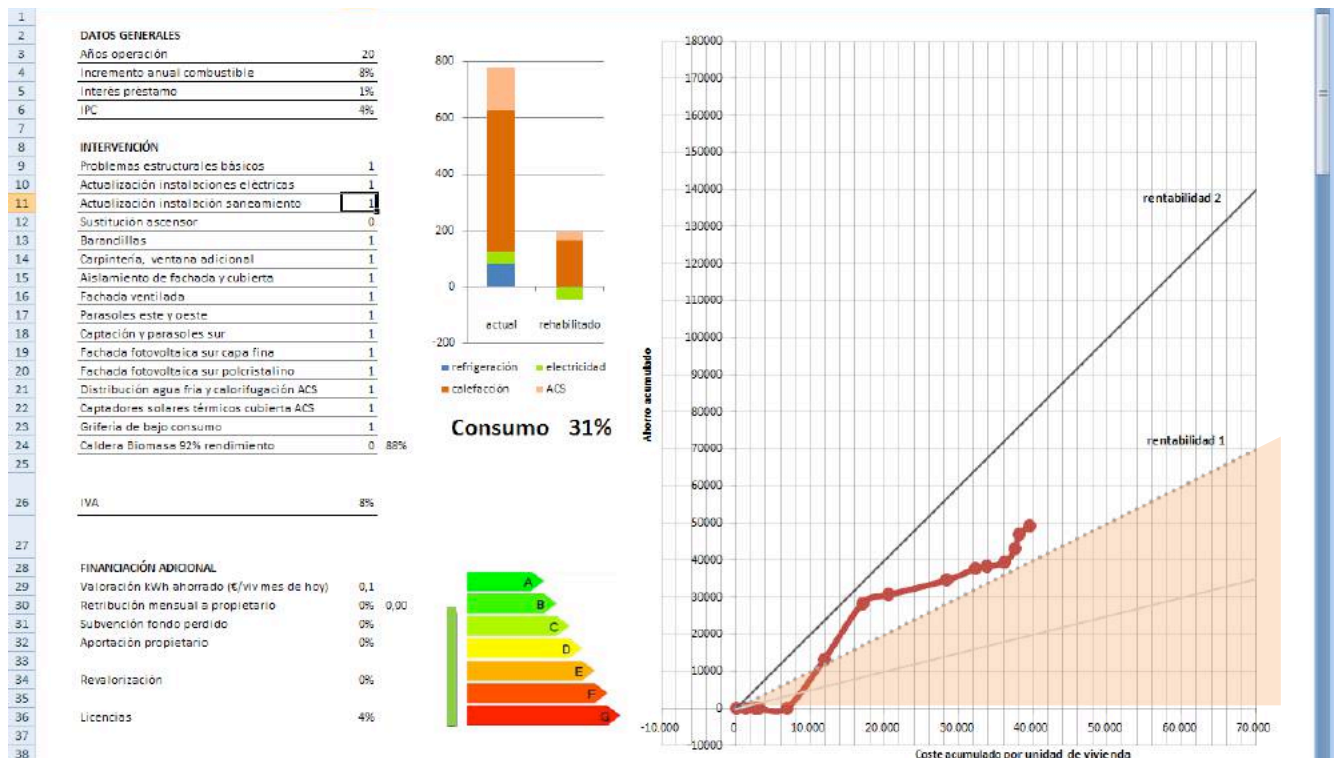


Fig. 28. Herramienta de diálogo económico. Acción 17: acción 16 + puesta al día del saneamiento.

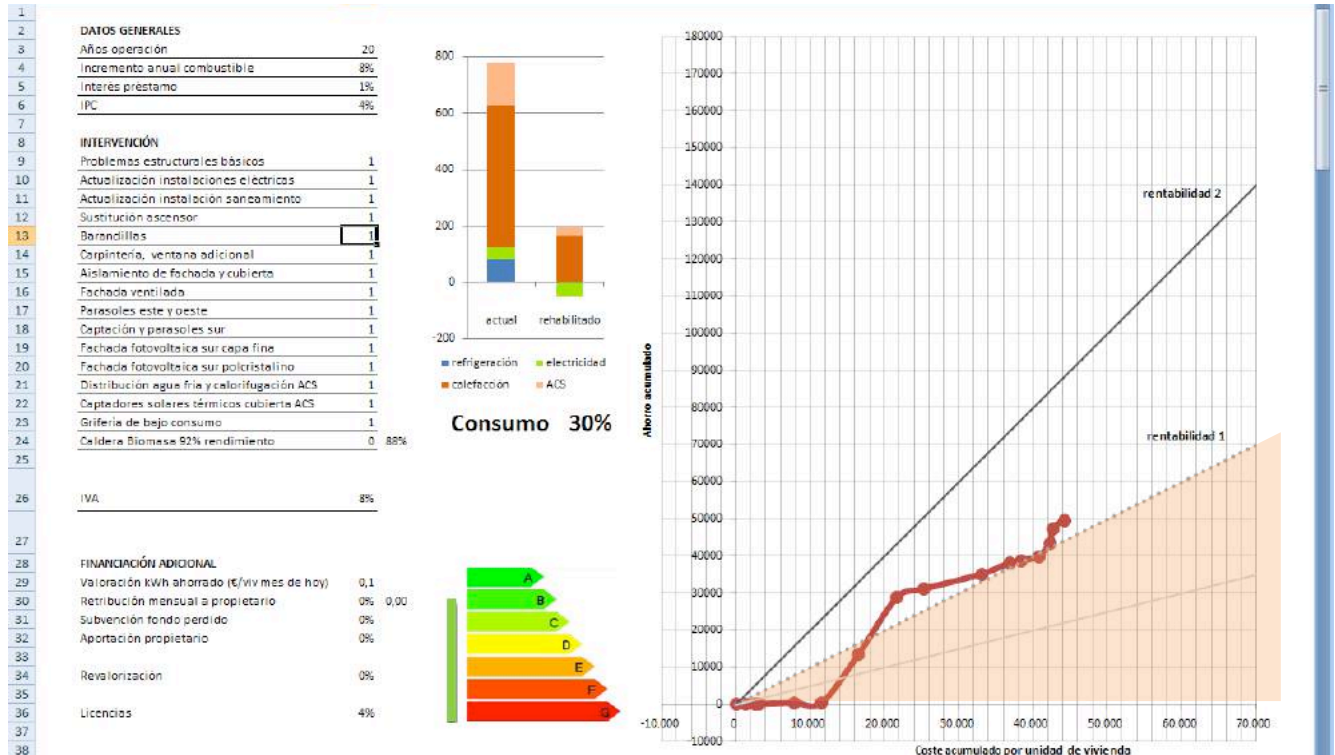


Fig. 29. Herramienta de diálogo económico. Acción 18: acción 17 + sustitución ascensor.

...y, tal vez sustituir las calderas de gas natural por calderas de biomasa, para alcanzar la calificación energética de A (Fig. 30).

Continuando con el uso del dinero público, también podría aplicarse una subvención de un 10% del coste total.

Que, como vemos, tiene muy buen efecto sobre la curva (Fig. 31).

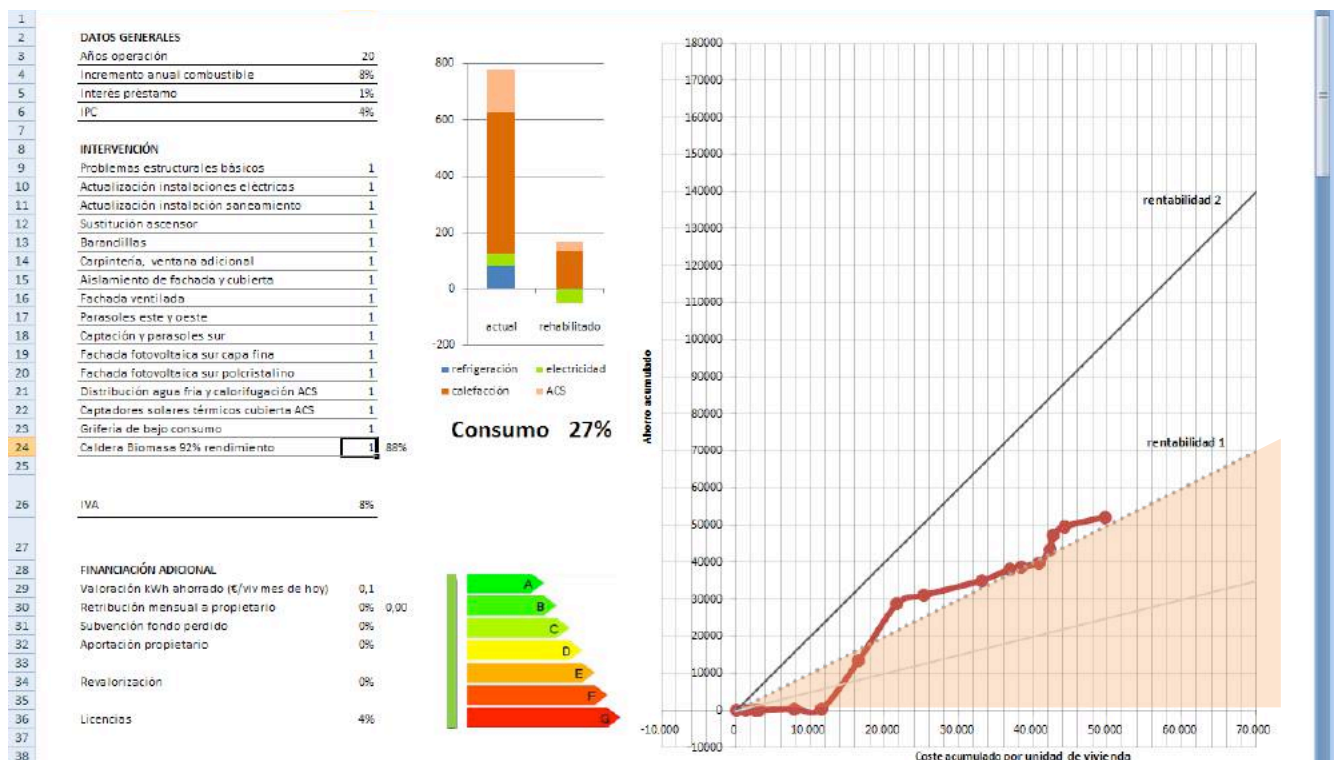


Fig. 30. Herramienta de diálogo económico. Acción 19: acción 18 + sustitución caldera de gas natural por caldera de biomasa.

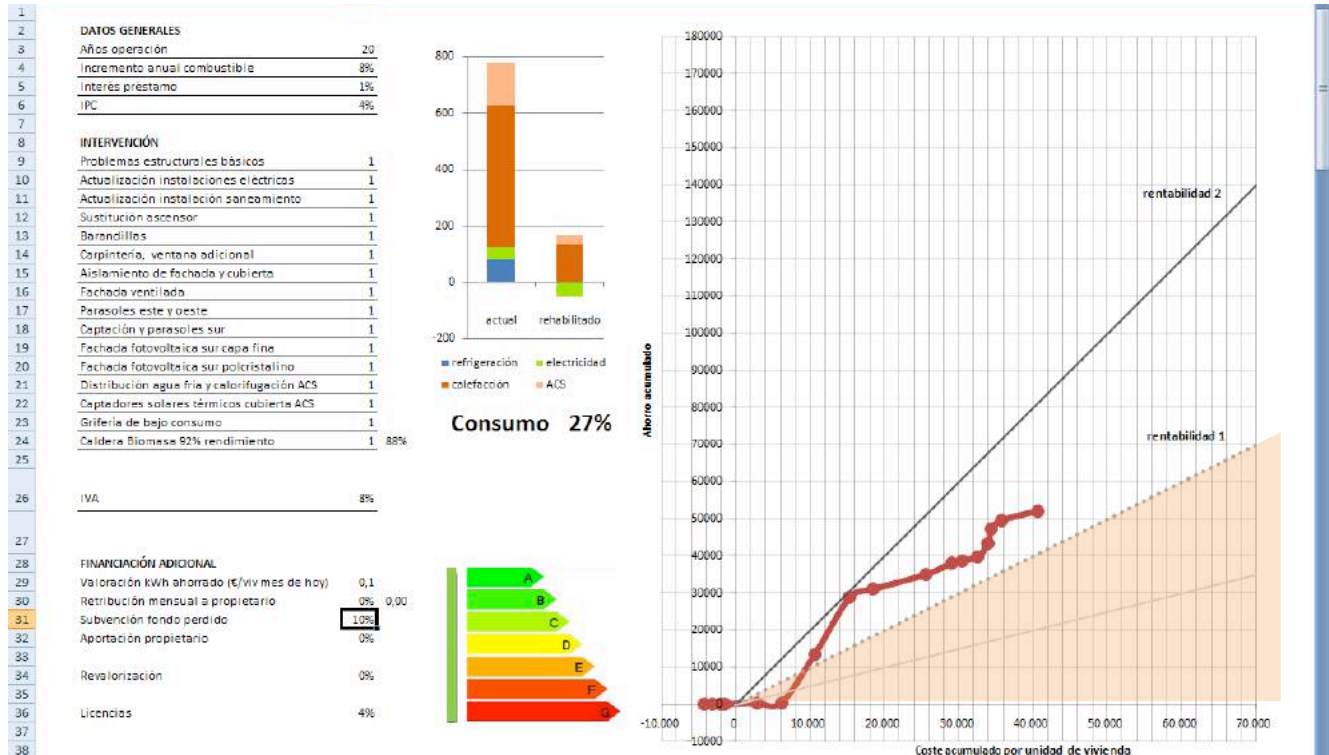


Fig. 31. Herramienta de diálogo económico. Acción 20: acción + subvención 10% coste total con dinero público.

También facilitaría mucho la intervención una aportación de digamos el 20% por parte del propietario.

Este tipo de aportaciones suelen ser buenas porque hacen que los propietarios valoren la intervención, pero

muchas veces resulta inviable.

La mantenemos aquí para ver el efecto (Fig. 32).

En todo caso, si el propietario pudiera hacer esa aportación, el plazo se podría reducir a 15 años... (Fig. 33).

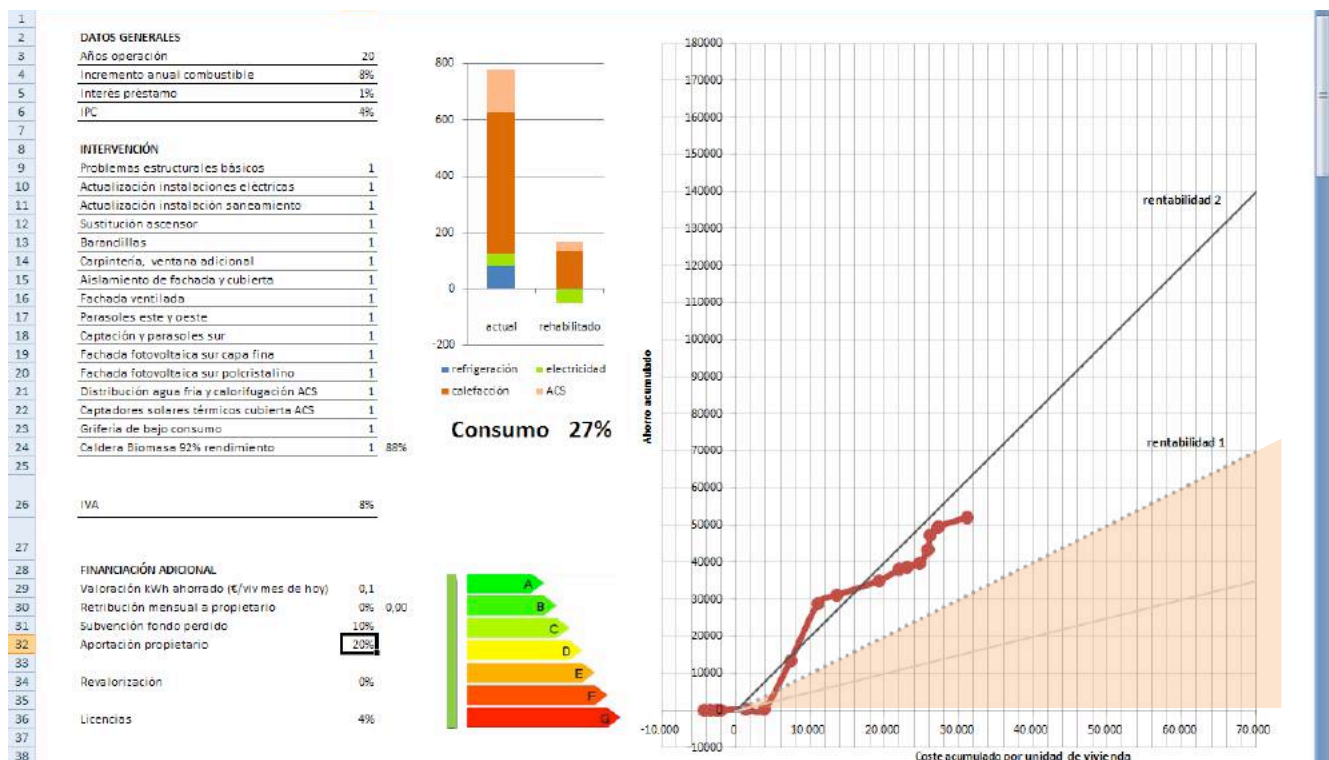


Fig. 32. Herramienta de diálogo económico. Acción 21: acción 20 + aportación inicial propietario del 20% del coste total.

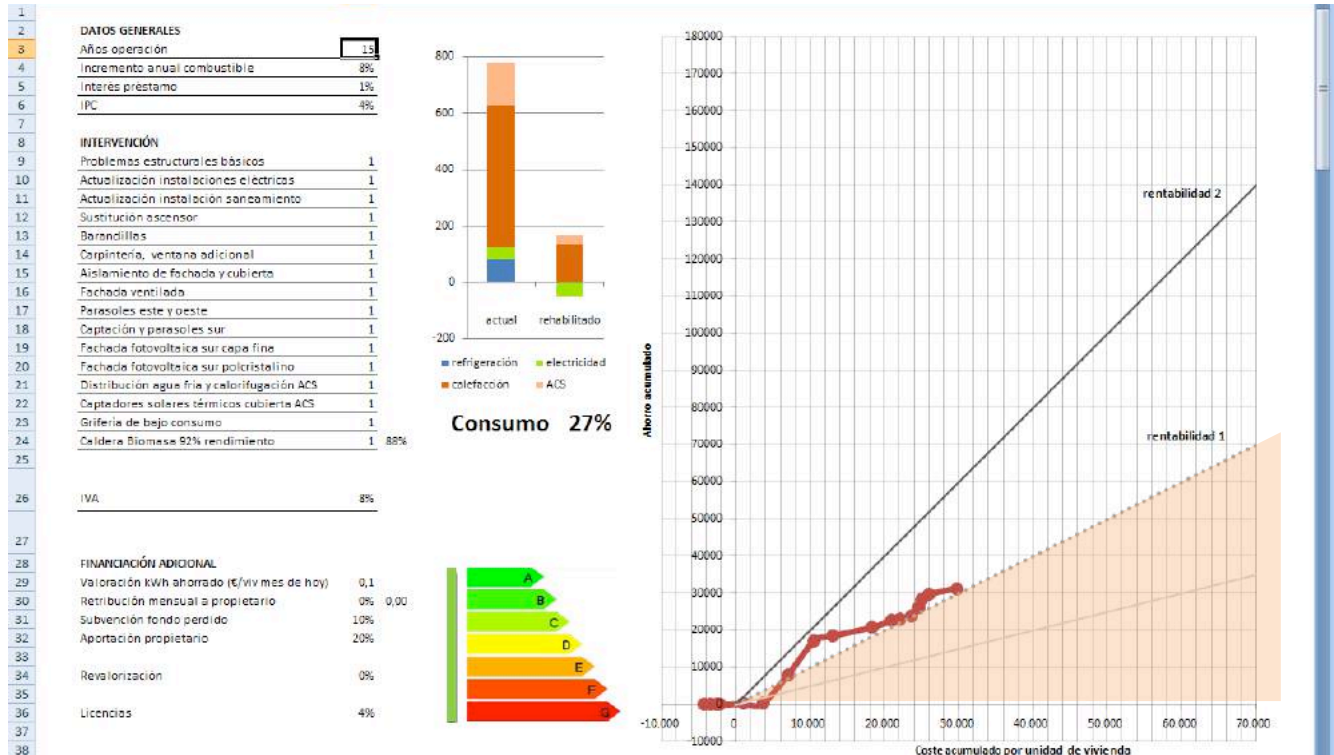


Fig. 33. Herramienta de diálogo económico. Acción 22: acción 21, pero con crédito a 15 años en lugar de a 20.

Interesa en este punto echar un vistazo por ejemplo a que pasaría si, en estas condiciones, el plazo de nuevo se planteara a 30 años:

Con todo lo que se ha hecho, más las aportaciones de dinero público, en este caso ¡el retorno sería más del triple del coste! (Fig. 34).

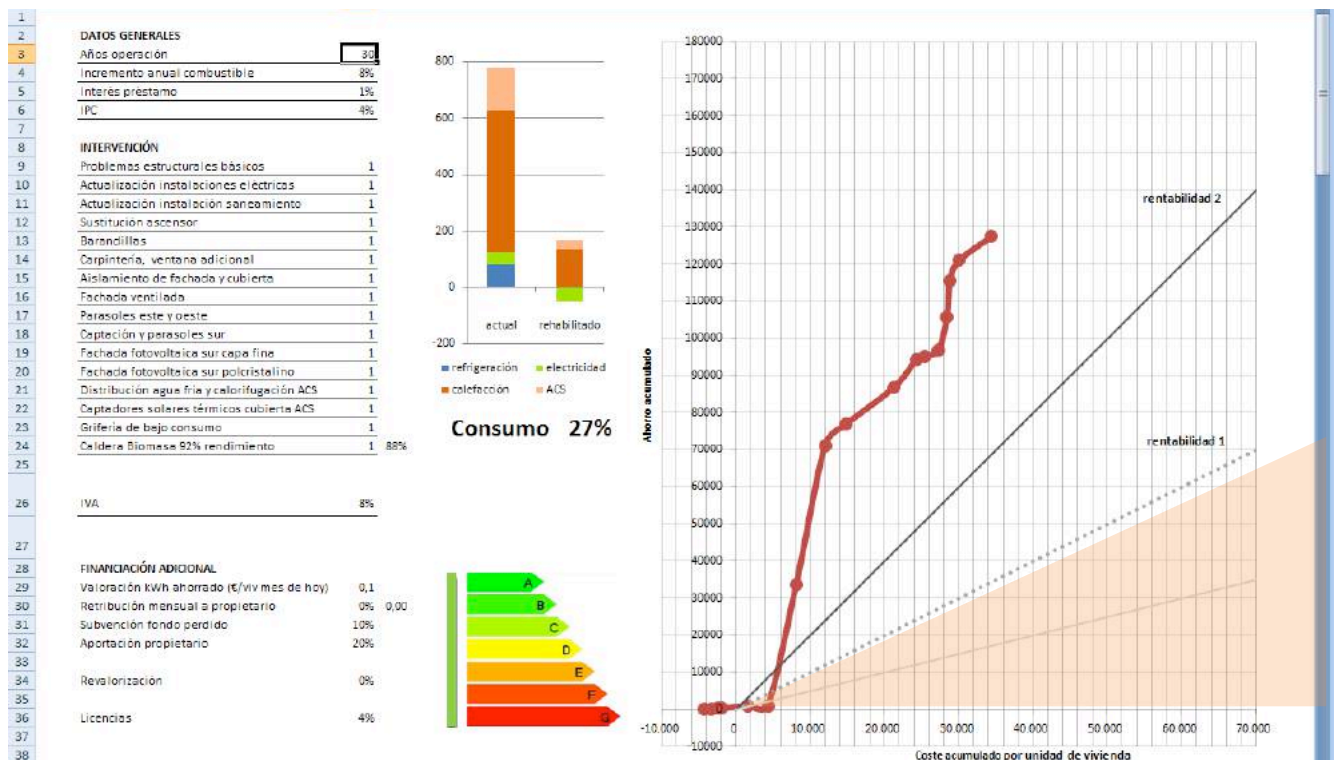


Fig. 34. Herramienta de diálogo económico. Acción 23: acción 22, pero con crédito a 30 años en lugar de a 15.

Pero bueno, volviendo a donde estábamos (Fig. 33), a 15 años, interesa contemplar otras hipótesis, como por ejemplo que el incremento del combustible fósil sea superior al 2% por encima del interés, que a su vez estaba un 2% por encima de la inflación.

Si el combustible fósil sube (de media, a lo largo del plazo de la operación) un 4% más, el resultado es que la eficiencia económica de la operación se sitúa en torno a 1,5 (Fig. 35).

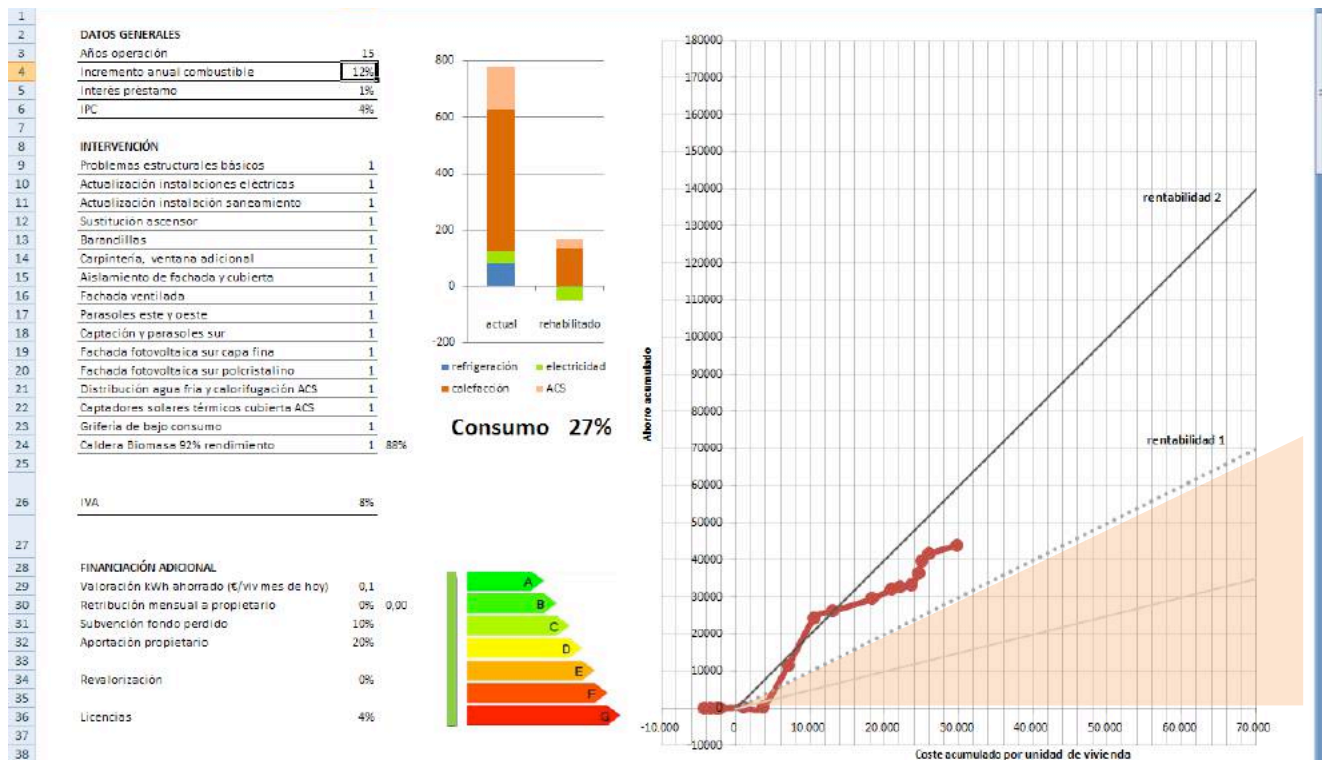


Fig. 35. Herramienta de diálogo económico. Acción 24: acción 22 (crédito a 15 años) + hipótesis subida del combustible fósil un 4% más.

Y hay otras cuestiones que todavía no hemos considerado, como por ejemplo el incremento de valor del bien inmueble, que para un propietario haría que la gráfica pudiera tener este aspecto (Fig. 36), suponiendo que la

vivienda se revaloriza solamente una cantidad igual al 50% del coste de la intervención. O éste (Fig. 37), suponiendo que la vivienda se revaloriza una cantidad igual al 100% del coste de la intervención.

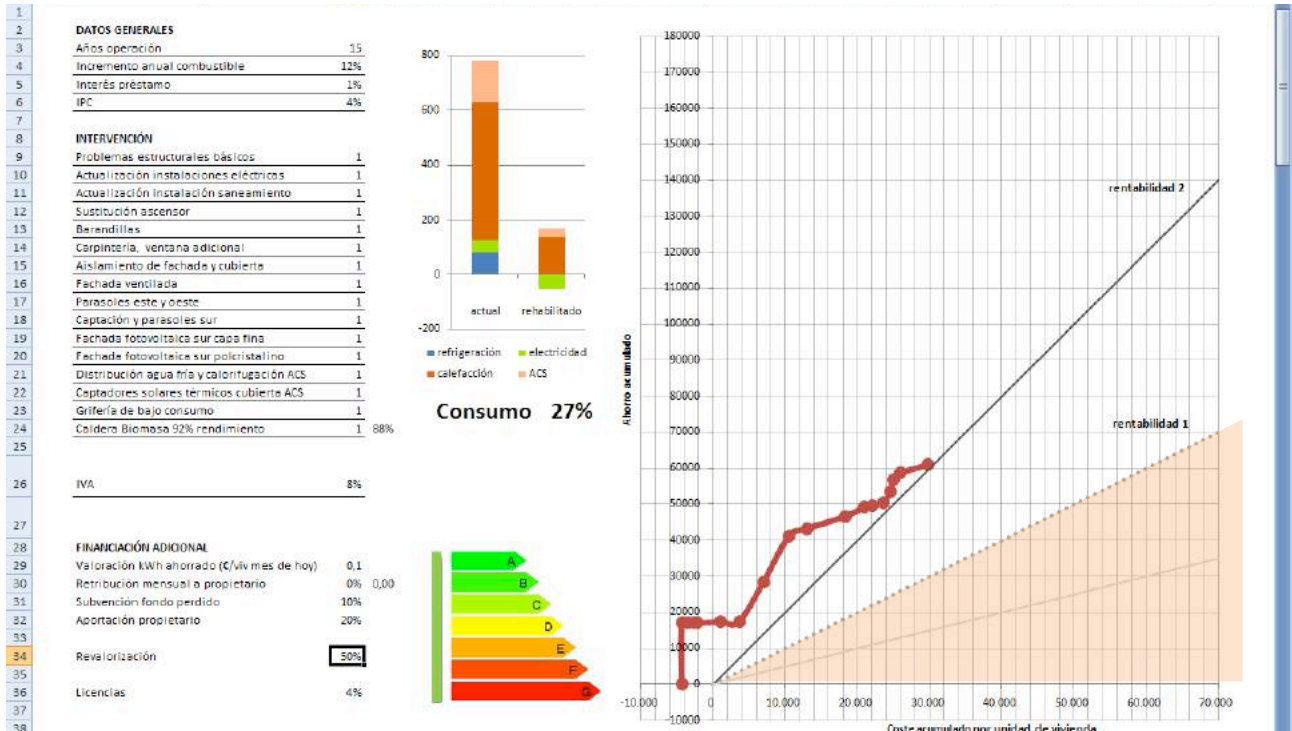


Fig. 36. Herramienta de diálogo económico. Acción 25: acción 24 + consideración revalorización del inmueble en un 50%.

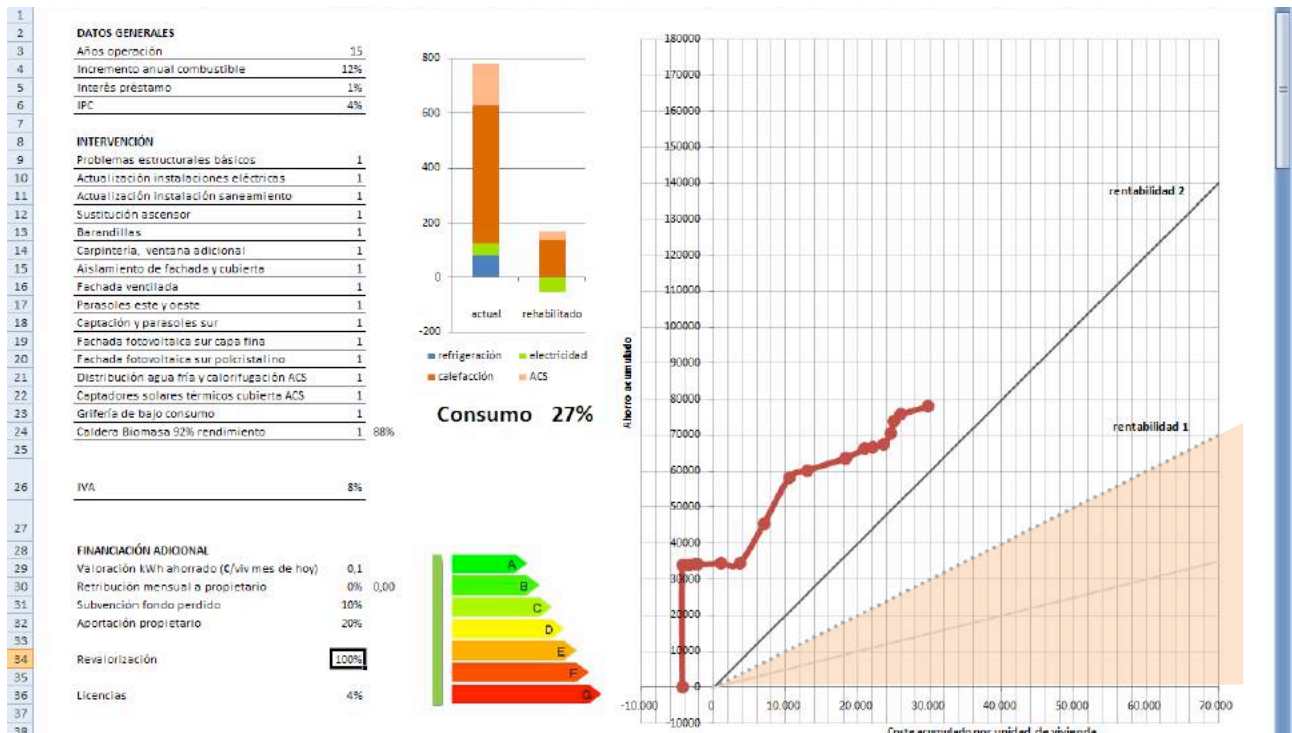


Fig. 37. Herramienta de diálogo económico. Acción 26: acción 24 + consideración revalorización del inmueble en un 100%.

En realidad la revalorización probablemente será mayor. Éste es un aspecto de gran importancia en este tipo de intervenciones, entre otras cosas porque puede contribuir a reducir el riesgo económico, pero hemos decidido dejarlo fuera de esta exposición porque generalmente no se aprecia como un beneficio práctico inmediato por los propietarios,

que han de seguir habitando la vivienda.

Pero, olvidando esta última parte, y volviendo adonde nos habíamos quedado (Fig. 38), e incluso suponiendo que el propietario no puede hacer una aportación inicial, Fig. 39.

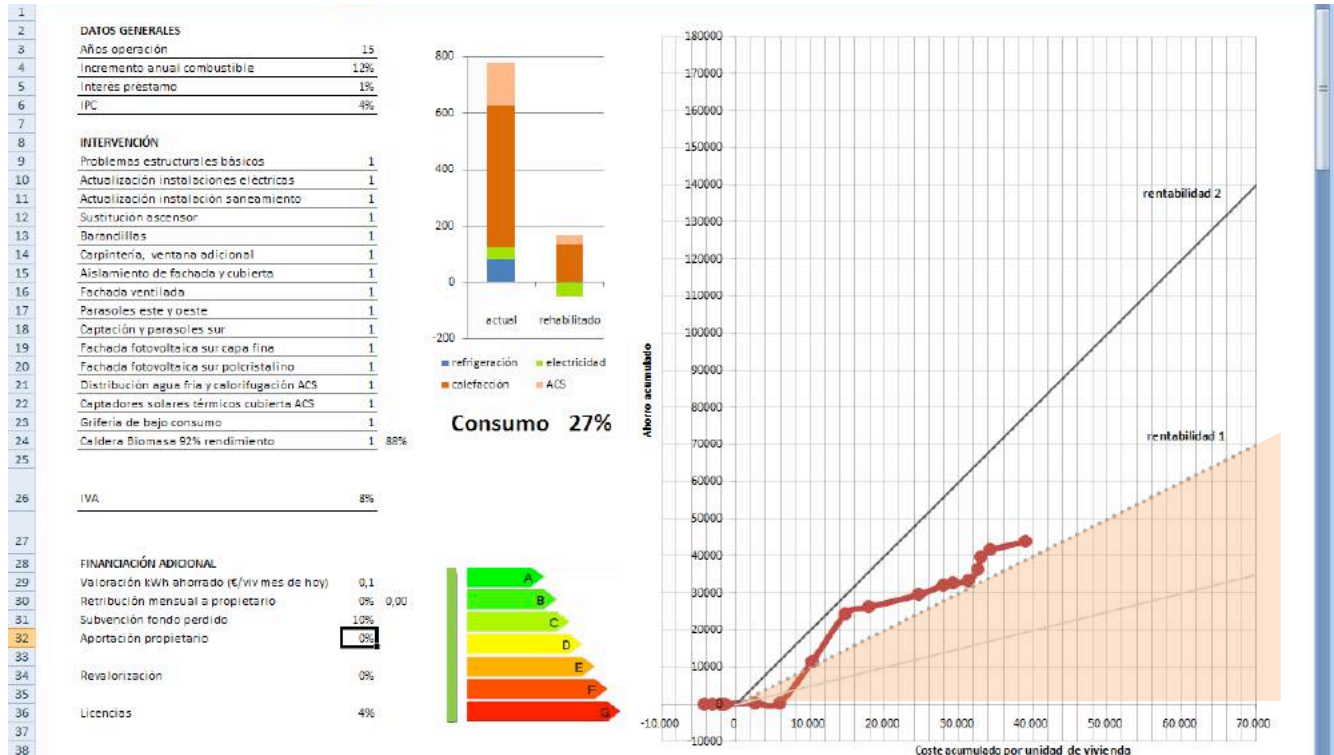


Fig. 38. Herramienta de diálogo económico. Acción 27: acción 24 sin aportación inicial del 20% del coste por parte del propietario.

El esquema permitiría remunerarle una cantidad de unos diez euros mensuales de hoy día, que, aunque es una cantidad pequeña, seguramente haría que se implicaran con más interés en la intervención.

Como resultado final: un edificio totalmente rehabilitado, activación económica, reducción del paro y respeto medioambiental (Fig. 40).

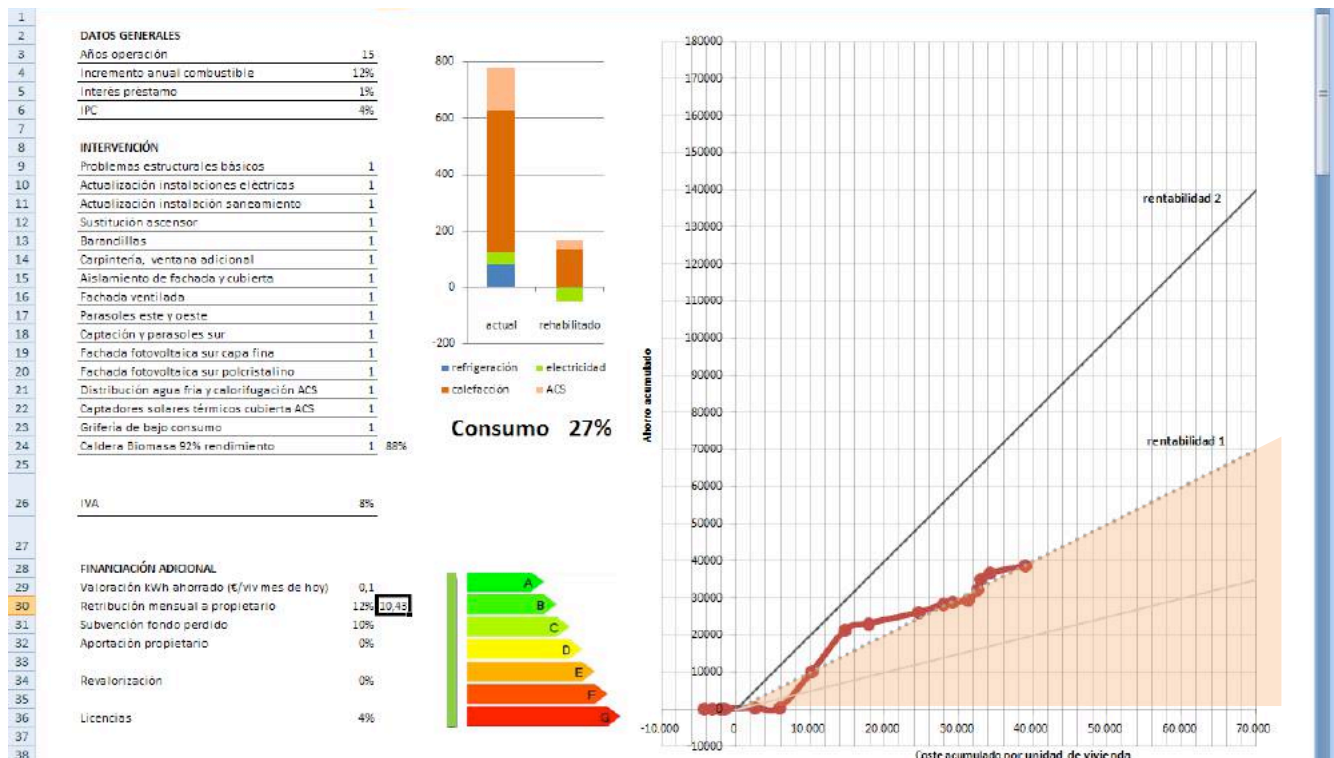


Fig. 39. Herramienta de diálogo económico. Acción 28: acción 27 + remuneración 10 € mensuales al propietario.

6. Conclusiones

El propósito de esta gráfica es servir como HERRAMIENTA DE DIÁLOGO ECONÓMICO

Aquí se presenta siguiendo un recorrido fijado de antemano para demostrar que:

1. Las intervenciones de rehabilitación energética profunda en la edificación son totalmente viables con préstamos a largo plazo, y
2. Un apoyo público del orden del 30% puede facilitar inicialmente su proceso hacia una mayor bancabilidad.

Pero el motor de cálculo que tiene detrás permite tantear tantas combinaciones e hipótesis como se desee, para elegir la mejor opción.

También permite una comprensión clara, en términos económicos básicos, y por parte de todos, de la complejidad de este tipo de intervención, como una operación financiera pura a un plazo determinado, trascendiendo el concepto de período de retorno de la inversión (payback period).

Permitiendo de este modo una discusión más clara de su viabilidad.

Y facilitando el camino a un mayor número de realizaciones de rehabilitación energética profunda.

En la actualidad se encuentra en un estado preliminar, siendo necesario desarrollarla hasta que se convierta en una herramienta online que pueda utilizarse ampliamente.

Glosario

Bancabilidad: posibilidad de una operación de ser canalizada a través de una institución bancaria.

Calificación Energética: Medición de la eficiencia energética de un edificio. Mediante una etiqueta de eficiencia energética, se asigna a cada edificio una Clase Energética de eficiencia.

Consumo de energía: Cantidad de energía que gasta un edificio para satisfacer su demanda.

Coste-Beneficio: Sistema de análisis y decisión mediante el cuál se calculan y comparan los costes y beneficios de un determinado proyecto.

Demanda de energía: Energía que requiere un edificio para mantener en el interior unas determinadas condiciones de confort. Depende principalmente del clima y de las características del edificio.

Eficiencia Energética: Reducción de la relación entre el consumo de energía y los servicios obtenidos con la misma.

Energía final: Es la energía lista para consumir por el usuario final. La energía final es el resultado de la transformación, almacenaje, transporte y distribución de la energía primaria.

Energía primaria: La energía primaria designa a la energía contenida en la naturaleza antes de ser convertida o transformada. En relación a la energía final, hace referencia a la cantidad de energía que hay que obtener de la naturaleza por cada unidad de energía final.

Rehabilitación Energética: Intervención constructiva que se realiza en un edificio existente, cuyo fin principal es la mejora de su eficiencia energética.

Viabilidad Económica: Análisis que evalúa la conveniencia de realización de un proyecto teniendo en cuenta los recursos necesarios para hacerlo.

Listado de acrónimos y abreviaciones

ACS: Agua caliente sanitaria.

SATE: Sistema de aislamiento térmico exterior.

Referencias

- [1] Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie – ADEME. (2008). *L'efficacité énergétique dans l'Union Européenne: panorama des politiques et des bonnes pratiques*. Angers, Francia. ADEME. <http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?sort=-1&cid=96&m=3&id=58124&ref=&nocache=yes&p1=111>
- [2] Ministerio de Industria, Energía y Turismo - Secretaría General Técnica. (2012). *La energía en España 2011*. Madrid, España. Centro de publicaciones MINETUR. http://www.minetur.gob.es/energia/es-es/documents/energia_espana_2011_web.pdf
- [3] WWF, Climate Strategy & Partners, Sweatman, P., Tragopoulos, G. (2012). *Retos y oportunidades de financiación para la rehabilitación energética de viviendas en España*. Madrid, España. WWF/Adena. http://awsassets.wwf.es/downloads/financiacion_rehab_edif.pdf
- [4] Cuchi, A., Sweatman, P., Grupo de Trabajo sobre Rehabilitación. (2012). *Informe GTR 2012. Una visión-país para el sector de la edificación en España. Plan de acción para un nuevo sector de la vivienda*. Madrid, España. Green Building Council España, Fundación CONAMA. <http://www.gbce.es/es/GTR>
- [5] Klinckenberg, F., Forbes Pirie, M., McAndrew, L. (2013). *Renovation Roadmaps for Buildings*. The Policy Partners for Eurima. http://www.eurima.org/uploads/ModuleXtender/Publications/96/Renovation_Roadmaps_for_Buildings_PP_FINAL_Report_20_02_2013.pdf
- [6] Ministerio de Vivienda. (2010). *La Rehabilitación del Parque Residencial Existente en la Unión Europea y otros Países Europeos. XVIII Reunión informal de Ministros responsables de vivienda de la Unión Europea*. Toledo, España. Ministerio de Vivienda. http://www.fomento.es/NR/rdonlyres/282E44DB-0824-496A-BFD0-BE034647BA0F/111524/2_rehabilitacion_parque.pdf
- [7] Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie – ADEME. (2011). *RENOVENERGIE : la rénovation énergétique des logements du secteur privé. Analyse des facteurs qui participent au déploiement et à la réussite des opérations de rénovation énergétique, au travers l'observation des pratiques en Allemagne, Espagne, France, Italie et Suisse. Rapport final – 25 janvier 2011*. Valbonne, Francia. Alphééis. <http://www2.ademe.fr/servlet/doc?id=75709>

Bibliografía

Sweatman, P. (2012). *Financing Mechanisms for Europe's Buildings Renovation. Assessment and Structuring Recommendations for Funding European 2020 Retrofit*. Bruselas, Bélgica. Eurima. <http://www.eurima.org/financing>

Webgrafía

<http://www.building-typology.eu/>

Protocolo Gráfico de Sostenibilidad y Eficiencia Energética en Arquitectura y Urbanismo

The Environmental & Energy Efficiency Graphical Protocol in Architecture & Urbanism

María Aranjuelo Fernández-Miranda^{a*}

^a Dra. Arquitecto. Directora de SARCH Sustainability & Architecture. Illinois Institute of Technology y Universidad del País Vasco

Resumen

La Sostenibilidad es un apartado imprescindible en los proyectos de Arquitectura y Urbanismo. La Infografía –representación gráfica visual- es una poderosa herramienta de transmisión de conocimiento, información y datos. La inclusión de un apartado de representación gráfica sobre Sostenibilidad en los proyectos arquitectónicos y urbanísticos es absolutamente necesaria. Las Eco-Infografías o Infografías sobre Sostenibilidad en Arquitectura y Urbanismo deben estar presentes en todos los proyectos para la transmisión efectiva del concepto de Sostenibilidad. Ante esta necesidad surge el Protocolo Gráfico de Sostenibilidad y Eficiencia Energética en Arquitectura y Urbanismo, el Protocolo Gráfico EEE. El *Environmental & Energy Efficiency Graphical Protocol in Architecture and Urbanism* es una herramienta universal de evaluación ambiental con enfoque holístico integral aplicable a cualquier edificio y desarrollo urbano.

Palabras clave: Sostenibilidad, Ecoinfografía, Protocolo Gráfico Medioambiental Universal, Eficiencia Energética, Diseño Medioambiental

Abstract

Sustainability is essential in architectural and urban projects. Infographics -graphical visualization- are powerful knowledge, information and data transfer tools. The inclusion of a graphical representation section about Sustainability in architectural and urban planning projects is absolutely necessary. Eco-infographics or Infographics about Sustainability in Architecture and Urbanism should be present in every project for the effective transfer of Sustainability. The Environmental and Energy Efficiency Graphical Protocol in Architecture and Urbanism Proposal, the EEE Graphical Protocol arises considering the necessity of turning to Infographics for the effective transfer of Sustainability in Architecture and Urbanism. The Environmental & Energy Efficiency Graphical Protocol in Architecture and Urbanism is a universal environmental assessment tool with integrated holistic approach applicable to any building and urban development.

Keywords: Sustainability, Eco-Infographics, Universal Environmental Graphical Protocol, Energy Efficiency, Environmental Design

1. Introducción

A pesar de la gran necesidad de una Arquitectura y Urbanismo Ecológicos que respeten la Naturaleza y el Medio Ambiente, y aunque vivimos en la era de la imagen, se observa una clara carencia de infografías sobre sostenibilidad o ecoinfografías en arquitectura y urbanismo. Actualmente no existe casi comunicación visual -desarrollo de Infografías- sobre los aspectos medioambientales de los proyectos arquitectónicos y urbanísticos: edificios y desarrollos urbanos. Esto llama poderosamente la atención si se tiene en cuenta la exigencia de la normativa,

certificaciones y sobre todo, la gran necesidad de tomar medidas ambientales urgentes para frenar los daños que el sector de la Construcción causa y puede causar a la Naturaleza.

UNA IMAGEN VALE MÁS QUE MIL PALABRAS

La infografía es una poderosa herramienta de comunicación y transmisión de ideas, conceptos, conocimiento. Actualmente la Infografía es utilizada por todos los medios y disciplinas para llegar al gran público. Un ejemplo claro de ello es el empleo actual de infografías en arquitectura y urbanismo en todos los proyectos arquitectónicos y urbanísticos.

* mariaaranjuelo@gmail.com ; maranjue@iit.edu

Citar como: Aranjuelo_Fernández-Miranda, M. (2019). The Environmental & Energy Efficiency Graphical Protocol in Architecture & Urbanism. En R. Hernández_Minguillón, O. Irulegi, M. Aranjuelo_Fernández-Miranda (Eds.), *Arquitectura Ecoeficiente* (Tomo II, pp. 142 –168). San Sebastián, España. Servicio Editorial de la UPV/EHU

2. Concepto: Protocolo Gráfico EEE de Sostenibilidad

El Protocolo Gráfico EEE de Sostenibilidad y Eficiencia Energética en Arquitectura y Urbanismo es una **herramienta universal de evaluación ambiental** (aspectos ecológicos + económicos + sociales) **con enfoque holístico** integral aplicable a cualquier edificio y desarrollo urbano. [5]

Se trata de un protocolo gráfico basado en el análisis de ciclo de vida global cerrado, empleado para valorar el comportamiento ambiental de un edificio, urbanización y/o subsistemas. Este Protocolo además de centrarse en la variable ambiental, adopta criterios que encajan las variables económica y social.

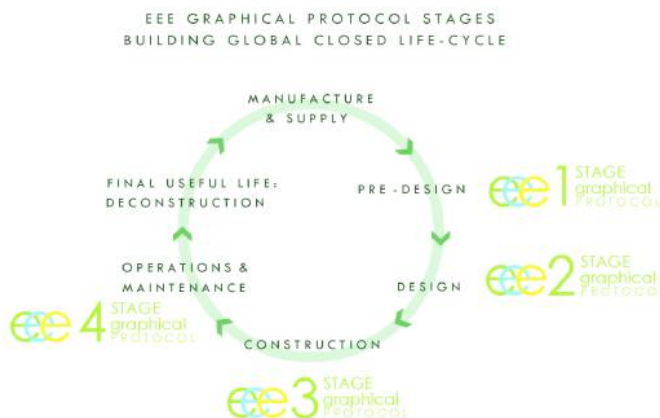


Fig. 3. Etapas del Protocolo Gráfico EEE de Sostenibilidad en Arquitectura y Urbanismo -Environmental & Energy Efficiency Graphical Protocol in Architecture & Urbanism- para un ciclo de vida global cerrado. Fuente: Aranjuelo Fernández-Miranda, M.

El Protocolo Gráfico EEE proporciona al equipo de diseño un listado de las medidas o estrategias a adoptar plasmadas en infografías para la consecución de edificios y urbanizaciones sostenibles a lo largo de las distintas etapas que conforman el proceso constructivo ecológico: global y cerrado. Esta herramienta de diseño potencia el carácter educativo y de transferencia de conocimiento, con el fin de mejorar la calidad en el proceso constructivo.

El Protocolo Gráfico EEE dota a los proyectos arquitectónicos y urbanísticos de un apartado de representación gráfica en todas las etapas del proceso constructivo cuyo fin es:

1. Favorecer y fomentar la reflexión, el razonamiento, la información y el análisis en la toma de decisiones -que ha de ser informada- del equipo de proyectos y resto de personas que intervienen en el proceso constructivo. La aplicación de este protocolo supone crear la necesidad de sentarse a reflexionar y sintetizar las ideas hasta que se les de forma con un esquema o boceto (tanto en las primeras fases como en las últimas en el ciclo de vida cerrado), o una infografía resultado de la aplicación de una herramienta software específica sobre comportamiento

energético, mecánica de fluidos computacional (CFD), análisis de ciclo de vida, soleamiento, iluminación,...

2. Aportar una visión global y holística sobre el proceso de diseño y construcción medioambiental en los proyectos de edificios y urbanizaciones a todas las partes que intervienen en dicho proceso a través de la representación gráfica, la comunicación visual, fomentando de esta forma la transmisión del concepto de Sostenibilidad en Arquitectura y Urbanismo.

3. Que la Sostenibilidad llegue a toda la Sociedad y contribuir potencialmente en la concienciación por el respeto a la Naturaleza y el Medio Ambiente. Los gráficos son un gran recurso para ello puesto que la comunicación visual es una poderosísima herramienta de comunicación: una imagen vale más que mil palabras. Es posible comunicar los conceptos científicos y técnicos más complejos a través de imágenes y que éstas puedan ser entendidas por cualquier persona ajena al mundo de la construcción.



Fig. 4. Gráfico sobre la mitigación del Cambio Climático en las ciudades. Integración de los sectores medioambientales prioritarios para lograr ciudades Low Carbon, bajas en carbono.

Fuente: Aranjuelo Fernández-Miranda, M.

El Protocolo Gráfico Medioambiental EEE será por tanto una herramienta para la obtención de un sistema de certificación (LEED, WELL, BREEAM, etc) puesto que la materialización de cada una de las imágenes o infografías supone la reflexión y la sintetización de todos los conceptos sobre Ecoeficiencia [4] y Sostenibilidad por parte del equipo redactor y resto de personas y agentes que intervienen en la toma de decisiones en la definición y consecución del proyecto edificatorio o urbanístico. El Protocolo Gráfico EEE contribuye de forma significativa a que esta toma de decisiones sea informada y objetiva, elemental para lograr edificios y urbanizaciones sostenibles. Al mismo tiempo sirve de gran ayuda en la transmisión de Sostenibilidad al cliente, a los organismos y al usuario final, favoreciendo la consecución de la máxima certificación para edificios en uso: los usuarios utilizarán y mantendrán mejor los edificios y desarrollos urbanos.

Este Protocolo está sometido a un proceso de mejora continua basado en las necesidades del mercado, los avances en su investigación y desarrollo, y la innovación.



Fig. 5. Logotipo del Protocolo Gráfico de Sostenibilidad y Eficiencia Energética en Arquitectura y Urbanismo.
Fuente: Aranjuelo Fernández-Miranda, M.

3. ¿Por qué el Protocolo Gráfico EEE de Sostenibilidad?

En la actualidad no se recurre apenas a la infografía para la transmisión del concepto de Sostenibilidad en Arquitectura.

El resultado de la investigación realizada en la Tesis Doctoral “Sustainability, Certification & Transfer” (M. Aranjuelo Fernández-Miranda, 2014) [5] sobre el actual mercado de la Infografía o la Representación Gráfica sobre Sostenibilidad en Arquitectura y Urbanismo, refleja una clara carencia, una gran necesidad de desarrollo y una gran oportunidad de mercado.

Por otro lado, se observa que es necesario dedicar mucho más tiempo a la profundización en el conocimiento de medidas o estrategias de sostenibilidad, eficiencia energética en arquitectura y urbanismo si queremos ser rápidos y efectivos a la hora de frenar los efectos nocivos de la construcción en la Naturaleza: cambio climático, recursos hídricos y naturales, biodiversidad, salud humana... La puesta en práctica del Protocolo EEE

favorece el análisis, razonamiento y evaluación de la sostenibilidad y la ecoeficiencia de los edificios y desarrollos urbanos.



Fig. 6. El proceso Integrativo en la toma de decisiones de un proyecto es clave en la consecución del Protocolo Gráfico EEE de Sostenibilidad.

A través del Protocolo Gráfico EEE los equipos de arquitectos, ingenieros, científicos, consultores y demás profesionales del mundo de la Construcción podrán realizar de forma más fácil, sencilla, eficiente y exitosa la tarea de proyectar y construir edificios y desarrollos urbanos respetuosos con el Medio Ambiente. A su vez estos edificios y desarrollos urbanos podrán disponer de las clasificaciones más altas en los sistemas de certificación ambientales. Al mismo tiempo, al tratarse de un Protocolo compuesto de una serie de Eco-Infografías, éstas resultarán muy atractivas al promotor, cliente o usuario final porque serán fácilmente comprensibles.

Conocer y aplicar el Protocolo Gráfico EEE permite mejorar la calidad de vida de los usuarios, mejorar los costes a medio y largo plazo y reducir el impacto ambiental en construcción.

4. Requisitos y Principios para el desarrollo del Protocolo Gráfico EEE de Sostenibilidad

El Protocolo Gráfico EEE se basará en el cumplimiento de las Estrategias para la Sostenibilidad y la Ecoeficiencia en Arquitectura y Urbanismo, en las categorías de los sistemas de certificación ambientales internacionales (LEED/WELL//BREEAM/) para satisfacer los criterios de los Edificios Sostenibles y los Principios de Edward Tufte para la excelencia en Infografía y visualización de datos. Véase Tabla 1.

4.1. Por qué

El Protocolo Gráfico EEE de Sostenibilidad en Arquitectura y Urbanismo está basado en los siguientes principios (Tabla 1):

- Las Estrategias para la Sostenibilidad y la Ecoeficiencia en Arquitectura y Urbanismo son elementales para lograr la consecución de una Arquitectura y Urbanismo Ecológicos, objetivo fundamental del Protocolo Gráfico EEE.
- LEED/WELL/BREEAM son actualmente los sistemas de Certificación ambiental más utilizados a nivel internacional. Las Categorías de estos sistemas de certificación son sometidas a revisión continua y están basadas en las necesidades del mercado. [7] [8] [9]
- Los Principios de Edward Tufte para la Excelencia en Infografía se basan en la objetividad y en la transferencia de la información o conocimiento más complejo de forma sencilla, clara y objetiva.[3] [4] [5]

Tabla 1
Principios y Requisitos del Protocolo Gráfico de Sostenibilidad EEE

Fuente: Aranjuelo Fernández-Miranda, M.

| PRINCIPIOS DEL PROTOCOLO GRAFICO EEE DE SOSTENIBILIDAD EN ARQUITECTURA & URBANISMO | | |
|--|--|---|
| ESTRATEGIAS DE SOSTENIBILIDAD | CATEGORIAS DE LOS SISTEMAS DE CERTIFICACIÓN INTERNACIONALES LEED/BREEAM/WELL | PRINCIPIOS DE EDWARD TUFTE PARA LA EXCELENCIA EN INFOGRAFÍA |
| Ciclo de Vida Cerrado y Global | Proceso Integrativo | Mostrar comparaciones, contrastes, diferencias |
| Estrategias Pasivas | Localización & Transporte | Mostrar la causalidad, explicación |
| Estrategias Activas | Parcelas Sostenibles | Análisis multivariable |
| Industrialización | Agua | Integración de palabras, números e imágenes |
| Urbanismo Ecológico | Energía & Atmósfera | Alta proporción de datos-tinta, alta densidad |
| Control & Gestión | Materiales & Recursos (Residuos) | Mostrar el contenido |
| Innovación | Calidad del Aire Interior (Aire/Polución) | Evitar la información que no interesa |
| Participación | Localización Inteligente & Conectividad | Micro & Macro: Mostrar los datos a múltiples escalas |
| Gobernanza | Diseño del Desarrollo Urbano o Urbanización | Formato y diseño adecuado |
| | Infraestructuras Verdes & Arquitectura | Toda la información a un golpe de vista |
| | Salud & Bienestar (Confort, Nutrición, Mente) | |
| | Conciencia & Educación | |
| | Innovación | |
| | Prioridad Regional | |

5. Desarrollo y Metodología para la aplicación del Protocolo Gráfico de Sostenibilidad EEE

El *Environmental & Energy Efficiency Graphical Protocol in Architecture and Urbanism* es una **herramienta universal de evaluación ambiental** (aspectos ecológicos + económicos + sociales) con enfoque holístico integral aplicable a cualquier edificio y desarrollo urbano.

El Protocolo Gráfico EEE de Sostenibilidad en Arquitectura y Urbanismo cumple todas las estrategias de Sostenibilidad y los requisitos para los créditos de los sistemas de certificación internacionales.

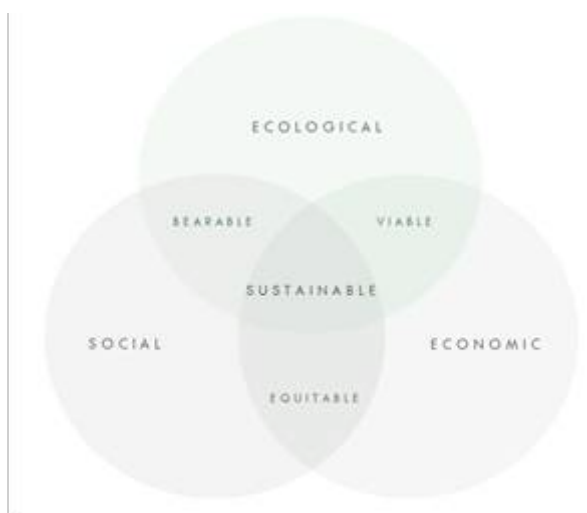


Fig. 7. Los tres pilares de la Sostenibilidad: Ecológico, Económico y Social.

El Protocolo Gráfico de Sostenibilidad EEE es concebido para un proceso de construcción de ciclo de vida cerrado y global. Véase Fig. 8.

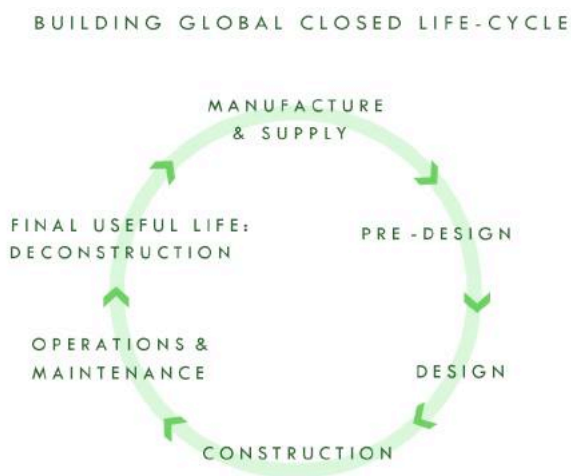


Fig. 8. Ciclo de Vida Cerrado y Global en Arquitectura y Urbanismo. Fuente: Aranjuelo Fernández-Miranda, M.

Se implementará en todas las etapas del proyecto arquitectónico o urbanístico en un ciclo de vida cerrado en la Construcción. (Fig.3). Las etapas del Protocolo Gráfico EEE son:

1. Etapa 1 del Protocolo Gráfico EEE: **Prediseño**
2. Etapa 2 del Protocolo Gráfico EEE: **Diseño**
3. Etapa 3 del Protocolo Gráfico EEE: **Obra**
4. Etapa 4 del Protocolo Gráfico EEE: **Mantenimiento y Uso del Edificio / Desarrollo Urbano**

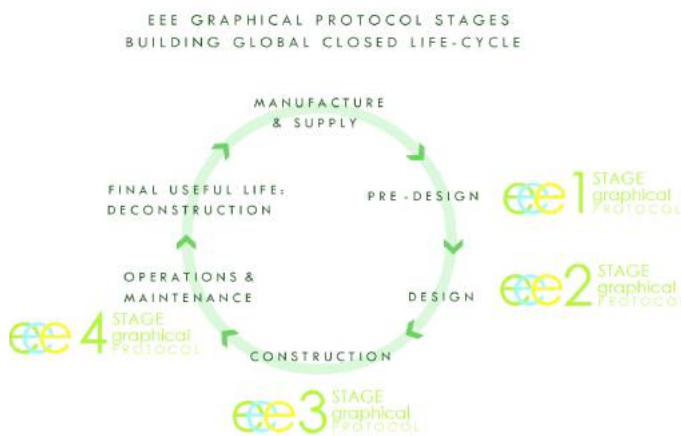


Fig. 3. Etapas del Protocolo Gráfico EEE de Sostenibilidad en Arquitectura y Urbanismo -Environmental & Energy Efficiency Graphical Protocol in Architecture & Urbanism- para un ciclo de vida global cerrado. Fuente: Aranjuelo Fernández-Miranda, M.

El objetivo es la aplicación de la perspectiva de ciclo de vida cerrado global a través de un enfoque holístico e integrado en la construcción.

5.1. Metodología del Protocolo EEE en cada etapa

La metodología para la implementación del *Environmental & Energy Efficiency Graphical Protocol* en Arquitectura & Urbanismo es la aplicación de un Protocolo Gráfico EEE en todas las etapas del ciclo de vida cerrado global de la Construcción. Habrá un protocolo gráfico para cada una de las etapas del proyecto arquitectónico o desarrollo urbano: prediseño, diseño, obra/construcción, uso & mantenimiento. El objetivo es una fuerte contribución en el cierre del ciclo de la construcción y el respeto a la naturaleza y el medio ambiente.

El *Environmental & Energy Efficiency Graphical Protocol* en Arquitectura & Urbanismo se compone de una serie de gráficos denominados Eco-Infografías que representan cada una de las distintas categorías o estrategias para el diseño medioambiental en Arquitectura y Urbanismo. Todas ellas son necesarias en todas las etapas del Protocolo Gráfico de Sostenibilidad siendo representadas de forma distinta de acuerdo con la etapa del Proyecto arquitectónico o urbanístico en el ciclo de vida cerrado global de la construcción. El Protocolo Gráfico

EEE se compone de los siguientes gráficos o Eco-Infografías en este orden:

1. Ecoinfografía que represente gráficamente el **PROCESO INTEGRATIVO**. El desarrollo del diseño arquitectónico y urbanístico integrativo promueve el diseño informado. El proceso basado en la integración multidisciplinaria favorece la toma de decisiones informada en el diseño medioambiental. [10]

2. Ecoinfografía que represente gráficamente el **URBANISMO ECOLÓGICO**. La evaluación de la Parcela y el Urbanismo para promover estrategias que minimicen el impacto de los ecosistemas y los recursos naturales: agua, energía, suelo, materiales y residuos. El urbanismo ecológico engloba las siguientes subcategorías:

- LOCALIZACIÓN & TRANSPORTE o MOVILIDAD & CONECTIVIDAD. Examinar las opciones de transporte fomentando la reducción del uso del vehículo propio: favorecer el andar y proporcionar un transporte público atractivo, accesible, fomentar el uso de vehículos eléctricos, permitir el teletrabajo, las reuniones virtuales utilizando la alta tecnología para reducir los desplazamientos por trabajo,...

- SUELO & ECOLOGIA. Promover la protección del suelo, el uso de las parcelas de alta prioridad, la vegetación, la reducción de la huella del edificio o de la urbanización evaluando el impacto de los ecosistemas y el paisajismo; aumentando la densidad y favoreciendo la mezcla de usos; satisfaciendo la demanda de alimentos y agricultura; y regenerando los *brownfields* y descontaminando el suelo contaminado.

- INFRAESTRUCTURAS VERDES:
 - Adecuada gestión de la energía y los recursos materiales.
 - Reducción de las consecuencias medioambientales de la construcción y la operatividad de los edificios e infraestructuras.
 - Implementación o conexión con redes de infraestructuras a gran escala y regionales como *district combined heat and power systems*.

- REGENERACION URBANA. Favorece la construcción en parcelas previamente desarrolladas o *infills* (reciclaje de suelo), en parcelas de alta prioridad y la resiliencia. Enfatiza los desarrollos urbanos compactos, donde se pueda andar, “vibrantes”, con usos mixtos con buenas conexiones a los barrios o comunidades cercanas.

3. Ecoinfografía que represente el **ANÁLISIS DE LA PARCELA + CLIMA**. Evaluación de la parcela y análisis de la topografía existente y del clima. El diseño comienza con el análisis de todos los recursos naturales disponibles en la parcela: orientación y sombreado, velocidad y

dirección del viento, disponibilidad de agua sobre y bajo tierra, temperaturas diurnas y estacionales, etc [11]:

- ANÁLISIS SOLAR: orientación solar, control solar & brillo/resplandor y protección solar.

- ANÁLISIS DE TEMPERATURA & HUMEDAD.

- ANÁLISIS DE VIENTO. Dirección y velocidad del viento, estudios de los vientos predominantes para promover la ventilación natural.

- ANÁLISIS DE LA TOPOGRAFÍA EXISTENTE o ANÁLISIS MEDIOAMBIENTAL DE LA GEOFÍSICA: favorecer la biodiversidad, permeabilidad,...

4. Ecoinfografía que represente gráficamente el análisis de la **GEOMETRÍA (FORMA)**, **MASA** (propiedades termofísicas) & **ORIENTACION DEL EDIFICIO**. Maximizar el potencial de la luz natural y el sombreado, las ganancias solares, el comportamiento energético, la captación del viento para la ventilación natural a través de la orientación del edificio y su geometría.

La física de edificios explica cómo funcionan los edificios. Es el estudio de cómo el calor, el aire, la humedad y la luz se mueven a lo largo de un edificio.

5. Ecoinfografía que represente gráficamente el **ANÁLISIS DE LA ENVOLVENTE**. Diseñar una envolvente de alto rendimiento: explotar las propiedades termofísicas de la masa del edificio para refrigeración y aprovechar las ganancias solares para calefacción, garantizar la estanquidad, promover la ventilación natural cuando el aire exterior no esté contaminado y el clima lo permita,... El análisis de la envolvente (fachada y cubierta) incluye:

- Análisis de la orientación,

- Análisis y cálculos de la transmisión de calor para optimizar la eficiencia energética: espesor, propiedades físicas, posición adecuada de los materiales y aislamiento, prevención de las condensaciones intersticiales y superficiales (puentes térmicos), ventilación, instalación de huecos practicables,...

- Análisis de la humedad y la condensación.

6. Ecoinfografía que represente gráficamente la **VENTILACION NATURAL**. Promover la ventilación natural para minimizar el uso de las instalaciones de climatización: calefacción, ventilación y aire acondicionado. Esta infografía será de aplicación cuando la ventilación natural sea posible porque la cantidad de polución en el aire no haga necesario filtrar el aire en cuyo caso será necesario un sistema de ventilación mecánica con filtros.

En la etapa de diseño detallado el análisis mediante el cálculo de la dinámica de cálculo computacional (CFD) se emplea para estudiar la ventilación y la calidad del aire interior. Refleja el comportamiento detallado de los fluidos de una zona en un instante. La simulación resultante se emplea para la verificación de la eficiencia energética.

7. Ecoinfografía LUZ NATURAL + VISTAS. Promover el acceso a la luz natural y las vistas, minimizar la iluminación artificial.

Un diseño de la iluminación adecuado es esencial para la satisfacción del usuario en los espacios ocupados, así como fundamental para la eficiencia energética de los edificios. Las estrategias de iluminación de baja energía integran la iluminación natural y la artificial sin problema. Un objetivo fundamental para los proyectos es la maximización del uso de la iluminación natural y esto requiere la consideración desde el principio (etapa de prediseño) de la forma del edificio, su orientación y su entorno.

Los cálculos de iluminación natural incluyen gráficos precisos. RADIANCE, DIAL son softwares que permiten estos cálculos.

La utilización del protocolo DALI permite el control de la iluminación artificial y por tanto una mayor eficiencia energética.

8. Ecoinfografía que represente gráficamente la **FLEXIBILIDAD**. Planear para cambiar: espacios, distribuciones, instalaciones. Anticipar y diseñar para cambios de clima, de tecnologías, de función y asegurar un fácil mantenimiento.

9. Ecoinfografía que represente gráficamente la gestión del **AGUA**. Favorecer un uso del agua más inteligente, reducir el consumo de agua:

- Reducción del uso de agua interior (edificio)/exterior (urbanización/desarrollo urbano),
- Reutilización del agua interior/exterior,
- Reciclaje del agua interior/exterior,
- Medición/Control del agua para el uso y demanda

10. Ecoinfografía que represente gráficamente la categoría **ENERGIA & ATMOSFERA**. Lo primero es la reducción de la carga de energía atribuida al edificio y después la promoción de la eficiencia energética a través de la optimización de los sistemas, estrategias innovadoras y un consumo controlado:

ESTRATEGIAS DE ENERGÍA:

- Reducción del consumo de energía.
- Empleo de Energías Renovables como geotermia, biomasa, solar, eólica, hidráulica, etc. La combinación de energía renovable generada in situ en la parcela con energía verde.

La tecnología renovable más adecuada para una parcela ha de ser evaluada al comienzo del proyecto. Es el equilibrio entre los recursos naturales, el perfil energético del edificio o desarrollo urbano, los requisitos normativos y el presupuesto económico versus el incentivo económico en el futuro. Cualquier solución requiere ser integrada en el edificio y en la estrategia de Monitorización y Evaluación (estrategia M&E).

- Innovación: alta tecnología.
- Infraestructuras energéticas: *Energy Networks*.

- Medición a nivel del edificio y a nivel del desarrollo urbano: que en cada proyecto sea capaz de medirse la energía utilizada.

- Medición avanzada de Energía.

- Programas de demanda y respuesta: favorecer la participación para controlar el consumo. Programas que fomenten la comunicación bidireccional entre los edificios y las centrales eléctricas, apoyando una gestión sofisticada para las dos partes.

ESQUEMAS DE MODELIZACIÓN ENERGÉTICA:

Los esquemas de modelización energética sirven para evaluar las estrategias y demostrar el cumplimiento de la normativa o de un sistema certificación ambiental.

BUILDING PHYSICS & MODELIZACION: La física de edificios explica cómo funcionan los edificios. Es el estudio de cómo el calor, el aire, la humedad y la luz se mueven a lo largo de un edificio.

Los programas para las simulaciones energéticas o el modelado energético son los siguientes:

- IES, Integrated Environmental Solution [12] [13]
- TRNSYS, Transient System Simulation Tool [14]
- EnergyPlus [15]
- DesignBuilder [16]
- Ecotect (para primer análisis) [17]
- TAS [18]
- eQUEST, the Quick Energy Simulation Tool. [19]
- BEopt: Building Energy Optimization. Simulaciones para uso residencial [20]
- Green Building Studio / Vasari [21]
- OpenStudio [22]
- Simergy [23]
- Revit
- otros,...

11. Ecoinfografía que represente gráficamente los **SISTEMAS MEDIOAMBIENTALES**. Arquitectura activa mediante estrategias innovadoras medioambientales:

- Reducción y minimización de los sistemas en los edificios como la climatización, la iluminación, los sistemas de control.

- Optimización & Ingeniería del Valor: Integración de las instalaciones o sistemas de bajo consumo energético para la producción de agua caliente sanitaria, calefacción, refrigeración, ventilación e iluminación, y la mejora de la eficiencia de los sistemas de control.

- Sistemas de Control Avanzado.

12. Ecoinfografía MATERIALES & RECURSOS. Fomentar el uso de materiales de construcción sostenibles y reducir los residuos.

- **ESTRATEGIAS DE MATERIALES & RECURSOS**
Dirigir la sostenibilidad a todas las etapas del ciclo de vida cerrado y global de la Construcción:

- Selección adecuada de materiales sostenibles de acuerdo con el proyecto.
- Materiales & Recursos locales o regionales,
- Materiales bajo emisivos,
- Información del Producto de Construcción & Optimización: declaración de producto ambiental,
- Información del Producto de Construcción & Optimización: extracción de materias primas responsable,
- Reutilización,
- Reciclaje,
- Gestión de Residuos: Residuos = Producto. Como ejemplos, la utilización de Residuos para generar Energía (infraestructura *Waste to Energy*) o la reutilización.
- Construcción para la *Desconstrucción*: pensar sobre la futura desconstrucción. Minimizar los residuos de construcción mediante la prefabricación y el desmontaje. [25]

- COMISION & GESTION adecuados en todas las etapas del ciclo de vida cerrado y global de la construcción: la gestión del Proyecto correcta durante las fases de prediseño, diseño, obra, uso; comisión & gestión adecuadas en la etapa de uso y mantenimiento del edificio o desarrollo urbano por parte de los usuarios y de los managers del edificio o urbanización.



Fig. 10. Plataforma PANTOPTIX de Johnson controls. Los datos se convierten en información. Fuente: [27]

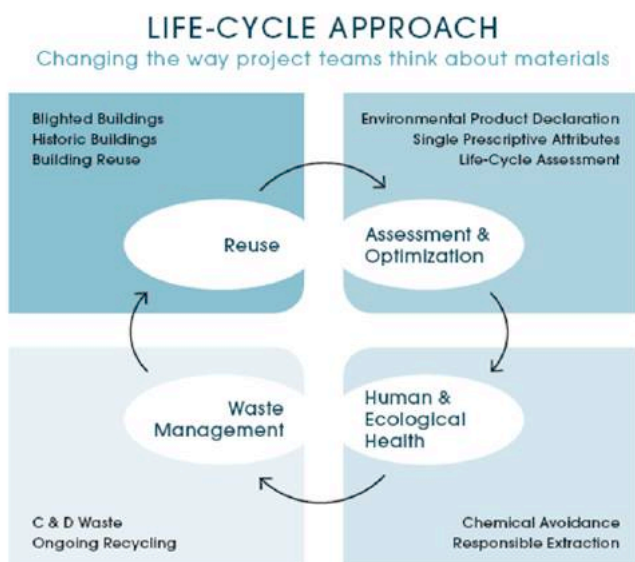


Fig. 9. Enfoque del Ciclo de Vida de los Materiales para LEED v4. Fuente: EDC Environmental Design + Construction. Magazine for the LEED Professional. May 2012. [26]

13. Ecoinfografía INDUSTRIALIZACIÓN. La Industrialización de la construcción favorece la sostenibilidad en Arquitectura:

- Prefabricación para la optimización,
- Favorecer la desconstrucción [25]: minimizar los residuos de construcción mediante la prefabricación y el desmontaje.

14. Ecoinfografía CONTROL & GESTION: para la optimización, la alta eficiencia energética, un proyecto de coste efectivo,... El control y la gestión correctas se logran mediante:

- ESTRATEGIAS PASIVAS.
- ESTRATEGIAS ACTIVAS: optimización de las instalaciones, sistemas de control y medición avanzada.

15. Ecoinfografía que represente gráficamente la **CALIDAD AMBIENTAL INTERIOR: SALUD & BIENESTAR.** Promover una mejor calidad del aire interior y el acceso a la luz natural y a las vistas. Mejorar la calidad de vida del usuario asegurando unos niveles confortables de ruido, temperatura, luz natural y calidad del aire para crear espacios que eleven el espíritu. Las estrategias para la Calidad Ambiental Interior son las siguientes:

- Estudios de confort térmico, visual (iluminación, vistas, belleza), acústico, olfativo.
- Análisis de la Calidad del Aire Interior.
- Materiales bajo emisivos.

16. Ecoinfografía INNOVACION. Estrategias de innovación que favorecen la sostenibilidad desarrolladas.

17. Ecoinfografía que represente la **COORDINACIÓN DE ESTRATEGIAS DE SOSTENIBILIDAD.** Ecoinfografía general mostrando la coordinación de todas las estrategias de sostenibilidad adoptadas en el proyecto o las principales.

El Protocolo Gráfico EEE de Sostenibilidad en Arquitectura y Urbanismo cumple todas las estrategias de Sostenibilidad y los requisitos para los créditos de los sistemas de certificación internacionales.

Cada Ecoinfografía del Protocolo Gráfico EEE representa una estrategia de sostenibilidad diferente. El orden establecido en el protocolo es importante para entender y desarrollar el diseño medioambiental en arquitectura y urbanismo. En algunas ocasiones una Ecoinfografía podrá representar varias estrategias de sostenibilidad y eficiencia energética al mismo tiempo.

Las Ecoinfografías deben transmitir y comunicar la sostenibilidad de forma clara y objetiva, con rigor científico. [5]



Fig. 11. Desde el Prediseño al Análisis Detallado, Cumplimiento y Participación en las etapas del Protocolo Gráfico EEE de Sostenibilidad y Eficiencia Energética en Arquitectura y Urbanismo. Fuente: Aranjuelo Fernández-Miranda, M.

5.2. Desarrollo de las Etapas del Protocolo Gráfico

De acuerdo con la etapa del Protocolo Gráfico de Sostenibilidad y Eficiencia Energética en Arquitectura y Urbanismo, el grado de cumplimiento de las medidas medioambientales y el nivel de detalle será más detallado gradualmente, incluyendo la participación del usuario en la etapa de uso y mantenimiento del edificio o desarrollo urbano en cuestión. Véase Fig. 11.

1. PREDISEÑO

La Etapa 1 de Prediseño del Protocolo Gráfico de Sostenibilidad en Arquitectura y Urbanismo es clave para el diseño ecológico arquitectónico y urbanístico. Se centra en el primer análisis.

El análisis previo es esencial en la toma de decisiones informada en el diseño medioambiental en Arquitectura y Urbanismo. Todas las Ecoinfografías de la etapa 1 de Prediseño del Protocolo Gráfico EEE representarán un primer análisis del proyecto.

2. DISEÑO

La Etapa 2 de Diseño del Protocolo Gráfico de Sostenibilidad en Arquitectura y Urbanismo es clave para el diseño ecológico arquitectónico y urbanístico. Se enfoca en el análisis detallado.

El análisis detallado es fundamental en la toma de decisiones informada en el diseño medioambiental en Arquitectura y Urbanismo. Todas las Ecoinfografías de la

etapa 2 de Protocolo Gráfico EEE representarán el análisis detallado del proyecto.

3. OBRA/CONSTRUCCIÓN

La Etapa 3 de Obra/Construcción del Protocolo Gráfico de Sostenibilidad en Arquitectura y Urbanismo es clave para el diseño ecológico arquitectónico y urbanístico. Se enfoca en el análisis detallado y en el cumplimiento de lo redactado y prescrito en el proyecto.

El Análisis Detallado y el Cumplimiento de lo prescrito en proyecto son esenciales en la etapa de obra en el diseño medioambiental en Arquitectura y Urbanismo. Todas las Ecoinfografías de la etapa 3 de Protocolo Gráfico EEE representarán el análisis detallado y el cumplimiento del proyecto.

4. USO & MANTENIMIENTO

La Etapa 4 de Uso y Mantenimiento del Protocolo Gráfico de Sostenibilidad en Arquitectura y Urbanismo es clave para el diseño sostenible arquitectónico y urbanístico. Se enfoca en el análisis detallado, el cumplimiento y la participación.

El diseño detallado, el cumplimiento y la participación son esenciales en la etapa de uso y mantenimiento en el diseño medioambiental en Arquitectura y Urbanismo. Todas las Ecoinfografías de la etapa 4 de Protocolo Gráfico EEE representarán el análisis detallado, el cumplimiento del proyecto construido y el grado de participación del usuario y manager del edificio o comunidad para el mantenimiento del edificio o desarrollo urbano. Estas

ecoinfografías formarán parte del Libro del Edificio y de la Guía del Usuario.

En esta etapa las Ecoinfografías deberán ir acompañadas de fotografías del edificio o la urbanización cuando proceda.

En la Etapa 4 la participación es clave para el cierre adecuado del ciclo de vida del proceso constructivo. Involucrar a los usuarios y managers del edificio o urbanización contribuye de forma encarecida a la información sobre el diseño de futuros proyectos (medición y verificación); al correcto mantenimiento del edificio o desarrollo urbano y a la posibilidad de pasar a la siguiente etapa del ciclo de vida: la desconstrucción.

5.3. Ejemplos de Ecoinfografías para el Protocolo Gráfico de Sostenibilidad EEE

Tras la exposición del desarrollo de la metodología para la aplicación del Protocolo Gráfico de Sostenibilidad y Eficiencia Energética en Arquitectura y Urbanismo se presentan distintos ejemplos de ecoinfografías en las

siguientes figuras. Algunas de las ecoinfografías podrían ser empleadas en varias etapas del Protocolo Gráfico dependiendo del nivel de detalle del proyecto; y pueden representar más de una categoría o estrategia ambiental del Protocolo Gráfico EEE. Existe cierta flexibilidad en la representación gráfica medioambiental -aunque seguir el orden establecido es recomendable para no dejar de desarrollar ninguna de las estrategias medioambientales.

Los ejemplos a continuación corresponden a casos reales, ecoinfografías utilizadas en distintos proyectos llevados a cabo por algunos de los pocos equipos de diseño y consultores internacionales que actualmente recurren a la representación gráfica de la sostenibilidad en arquitectura y urbanismo.

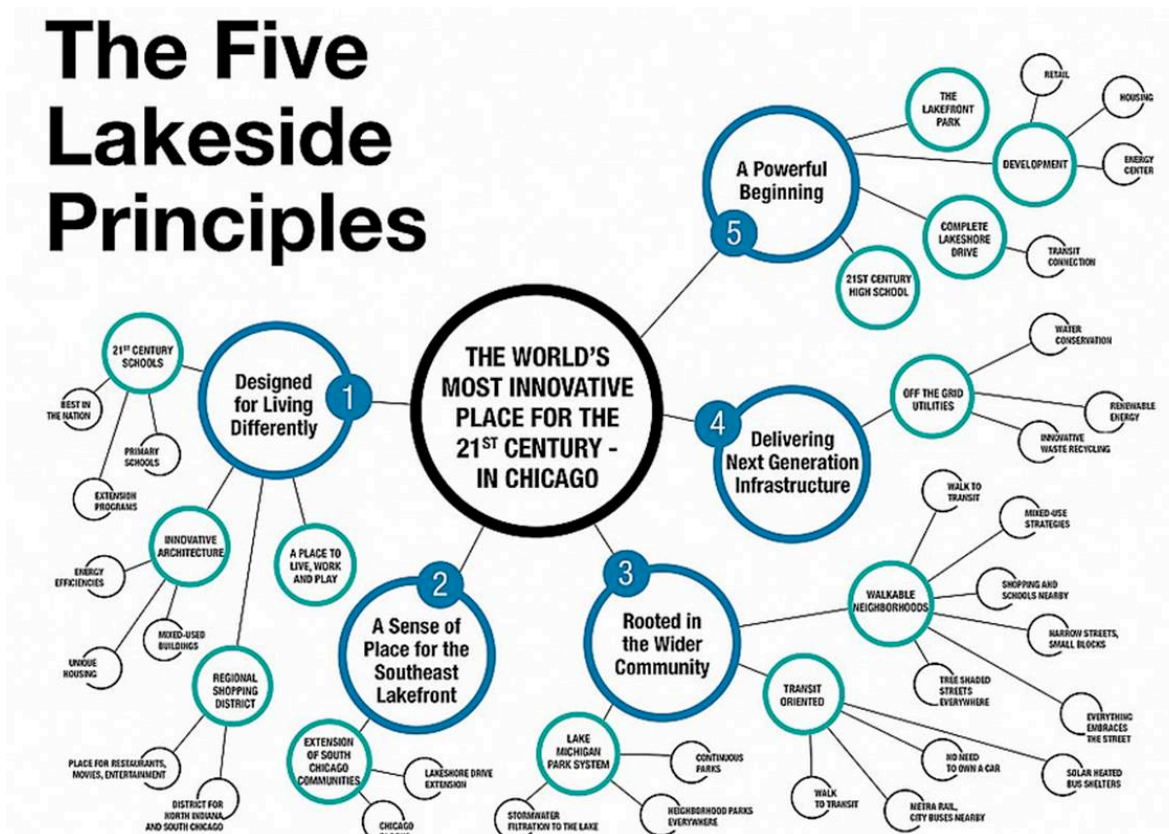


Fig. 12. Ejemplo de Ecoinfografía 1 & 2: PROCESO INTEGRADOR & URBANISMO ECOLÓGICO. Infografía de Sostenibilidad sobre el Master Plan en Chicago, Illinois (EE.UU.). Fuente: SOM. [29]

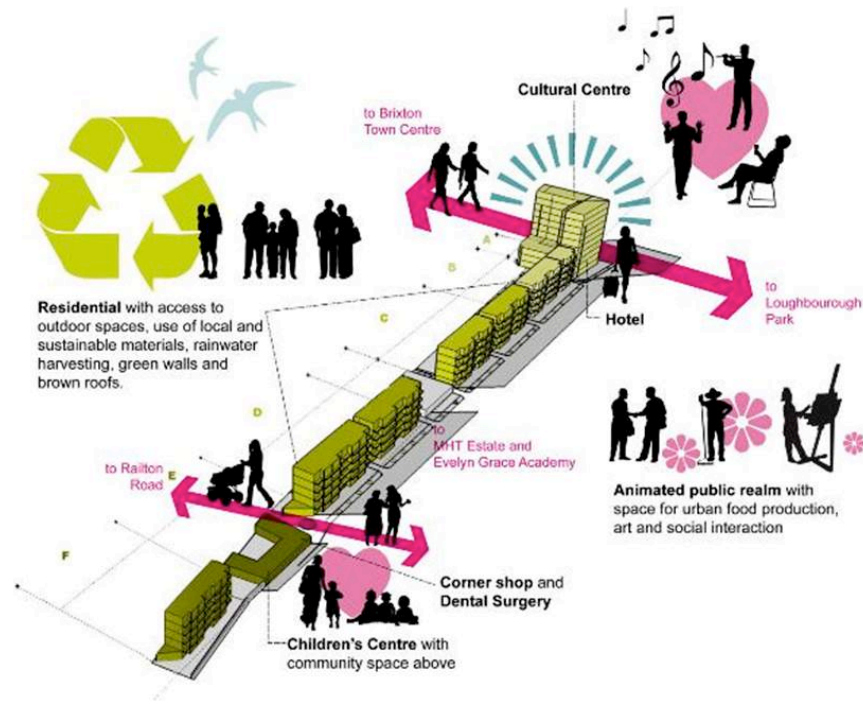


Fig. 13. Ejemplo de Ecoinfografía 2: URBANISMO ECOLOGICO.
Ecoinfografía de Brixton Green. Comunidades Sostenibles. Fuente: Feilden Clegg Bradley Studios. [30]

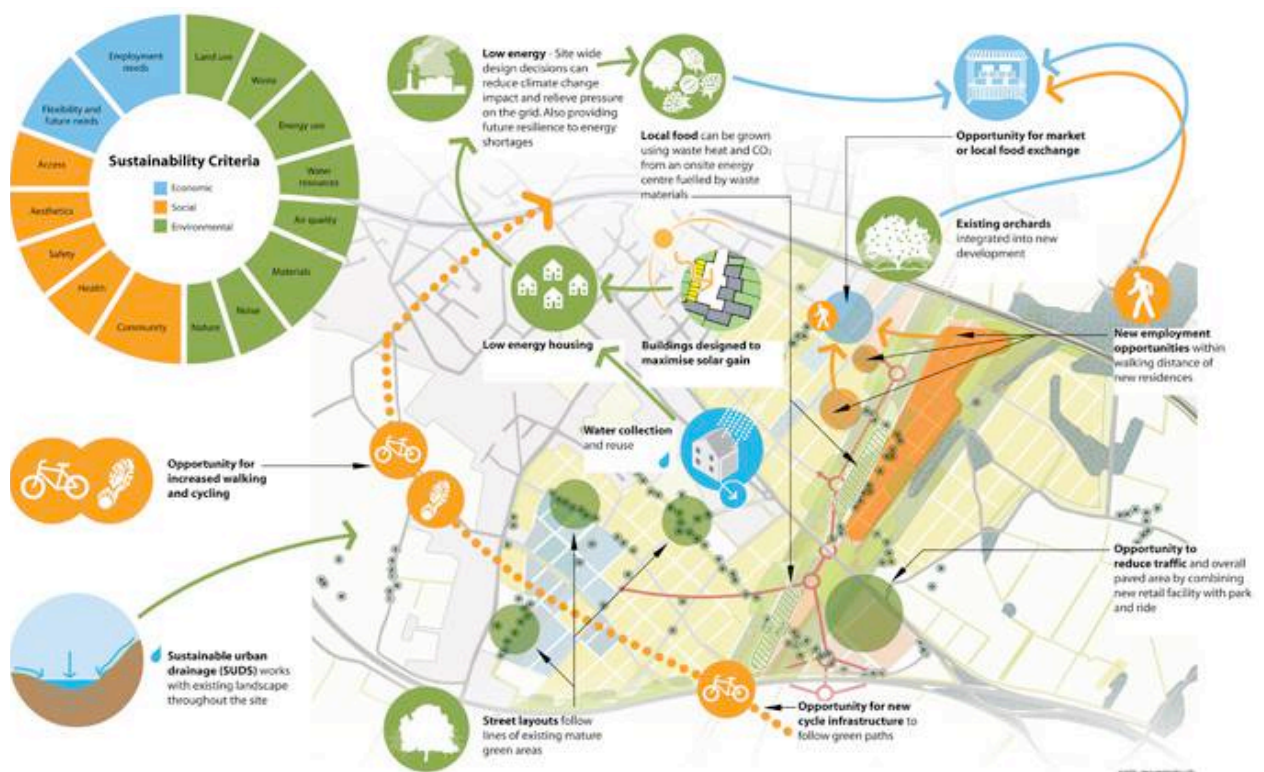


Fig. 14. Ejemplo de Ecoinfografía 2: URBANISMO ECOLOGICO.
Se incorporan todos los aspectos del diseño medioambiental en la visión del Masterplan y trabajando con las sinergias se crea una estrategia sostenible global rotunda. Fuente: Max Fordham Engineering. [32]

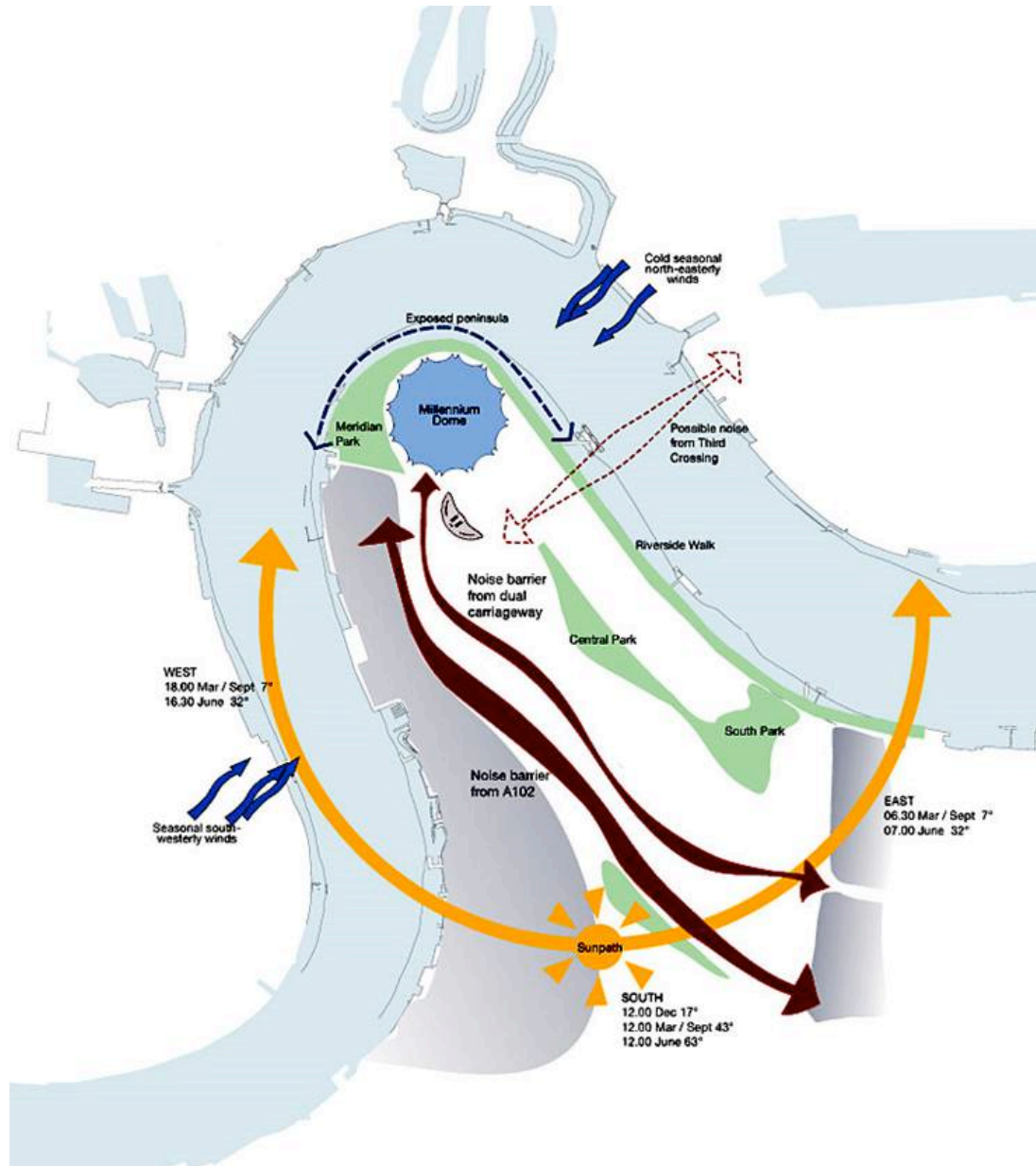


Fig. 15. Ejemplo de Ecoinfografía 3: PARCELA/SUELO + CLIMA.
Restricciones Medioambientales. Greenwich Peninsula Masterplan. Londres, Inglaterra.
Fuente: Rogers Stirk Harbour + Partners [31]

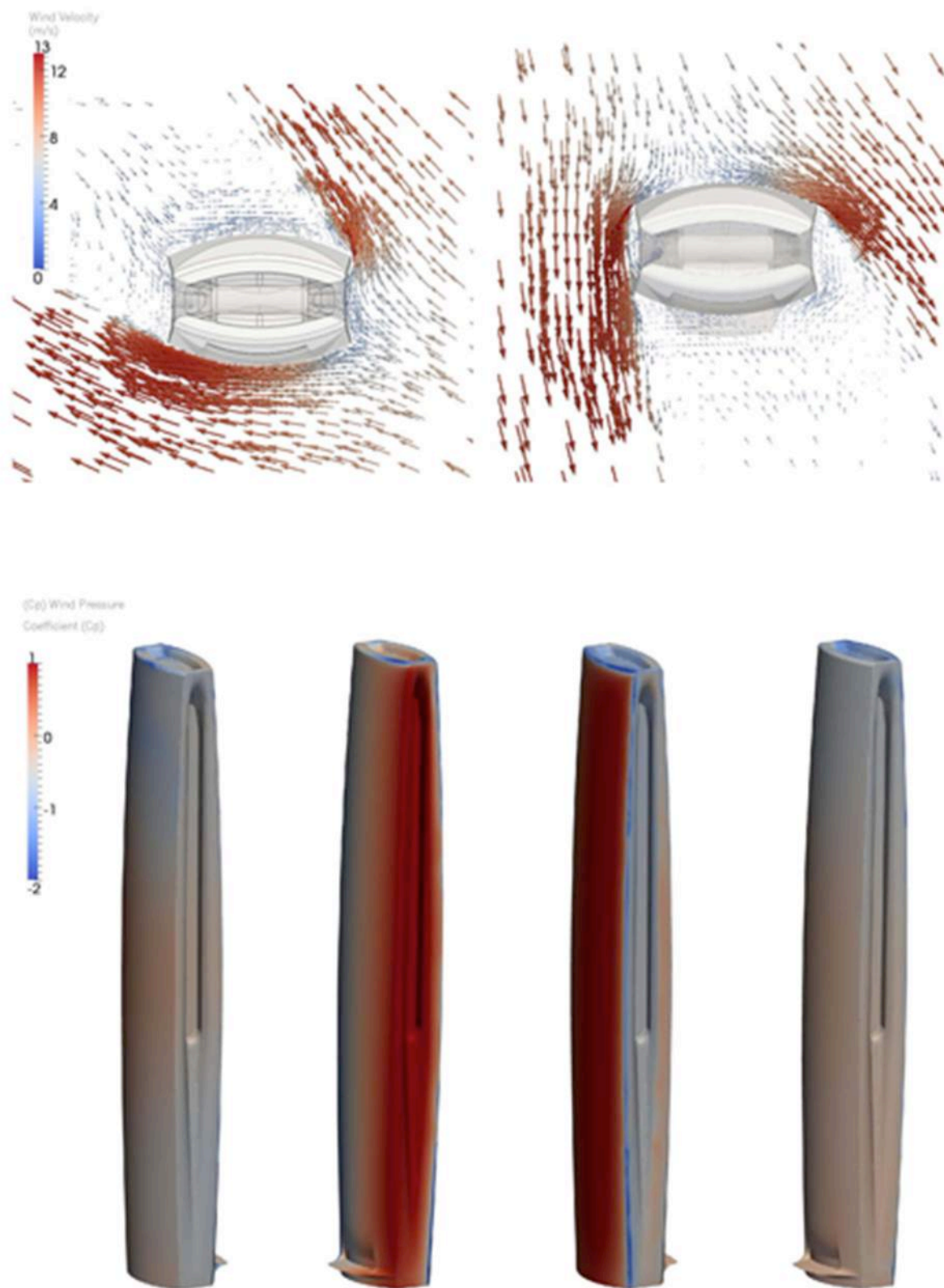


Fig. 16. Ejemplo de Ecoinfografía 3: PARCELA/SUELO + CLIMA: ANALISIS DE VIENTO.
Infografías del Estudio de la Presión del Viento. Greenland Center. Wujiang, Jiangsu China.
Fuente: SOM, Engineering + Design Book. [28]

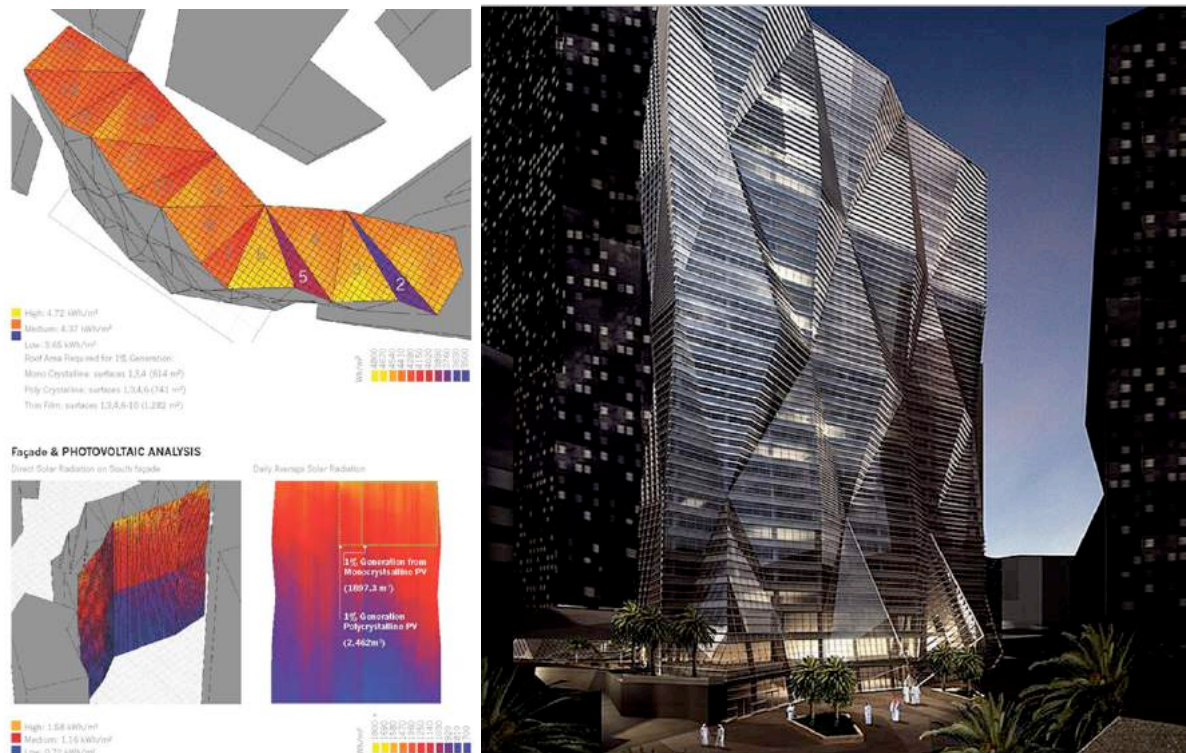


Fig. 17. Ejemplo de Ecoinfografía 5 & 10: ANALISIS DE LA ENVOLVENTE + ENERGIA & ATMOSFERA. Infografías del Análisis fotovoltaico de la Fachada: radiación solar directa y radiación solar media diaria en Wh/m^2 . Kafd Muqarnas Tower. Saudi Arabia. Fuente: SOM [29]

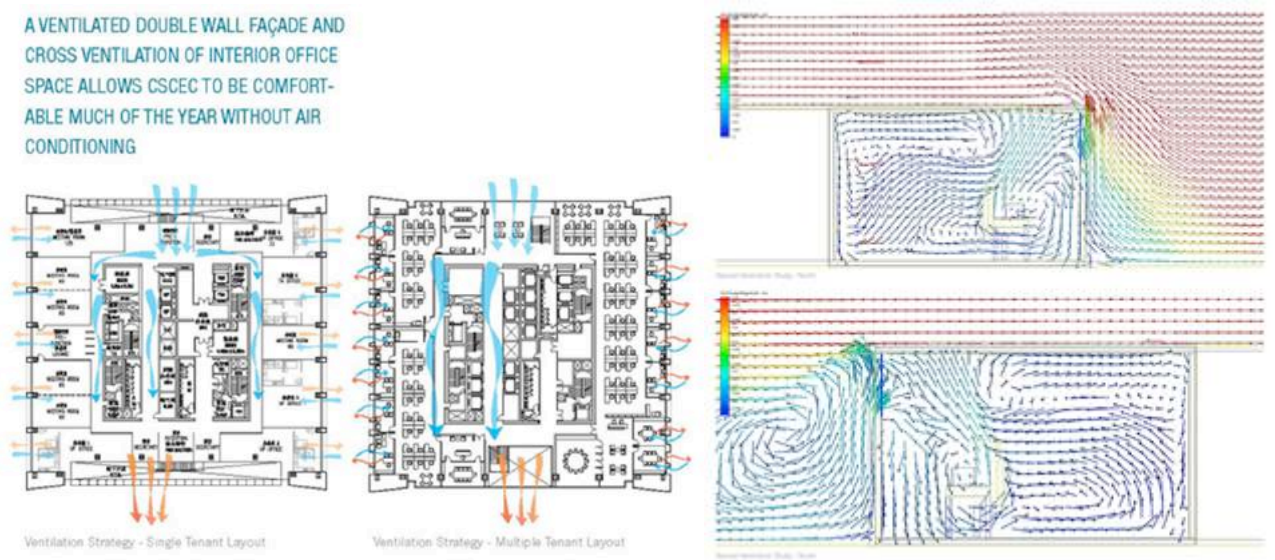


Fig. 18. Ejemplo de Ecoinfografía 6: VENTILACION NATURAL. Infografías del análisis detallado de la ventilación natural. Beijing CSCEC Olympic Park CBD mixed use. Beijing, China. Fuente: SOM, Engineering + Design Book. [28]



Fig. 19. Ejemplo de Ecoinfografía 11 & 15: CALIDAD AMBIENTAL INTERIOR & SISTEMAS MEDIOAMBIENTALES. Edificio La Roche, EEUU. Fuente: Aranjuelo Fernández-Miranda, M. SOM [29]

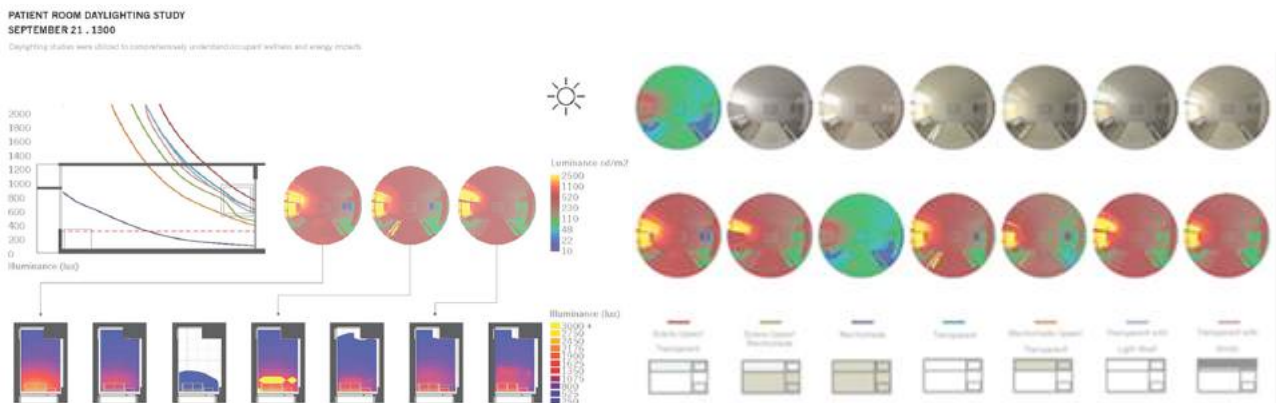


Fig. 20. Ejemplos de Ecoinfografía 7: ILUMINACION NATURAL & VISTAS. Infografías del Análisis detallado para iluminación natural. Los estudios de iluminación han sido realizados para entender en profundidad la salud y bienestar del ocupante y analizar el impacto energético. The Christ Hospital. Cincinnati, Ohio. Fuente: SOM, Engineering + Design Book. [28]

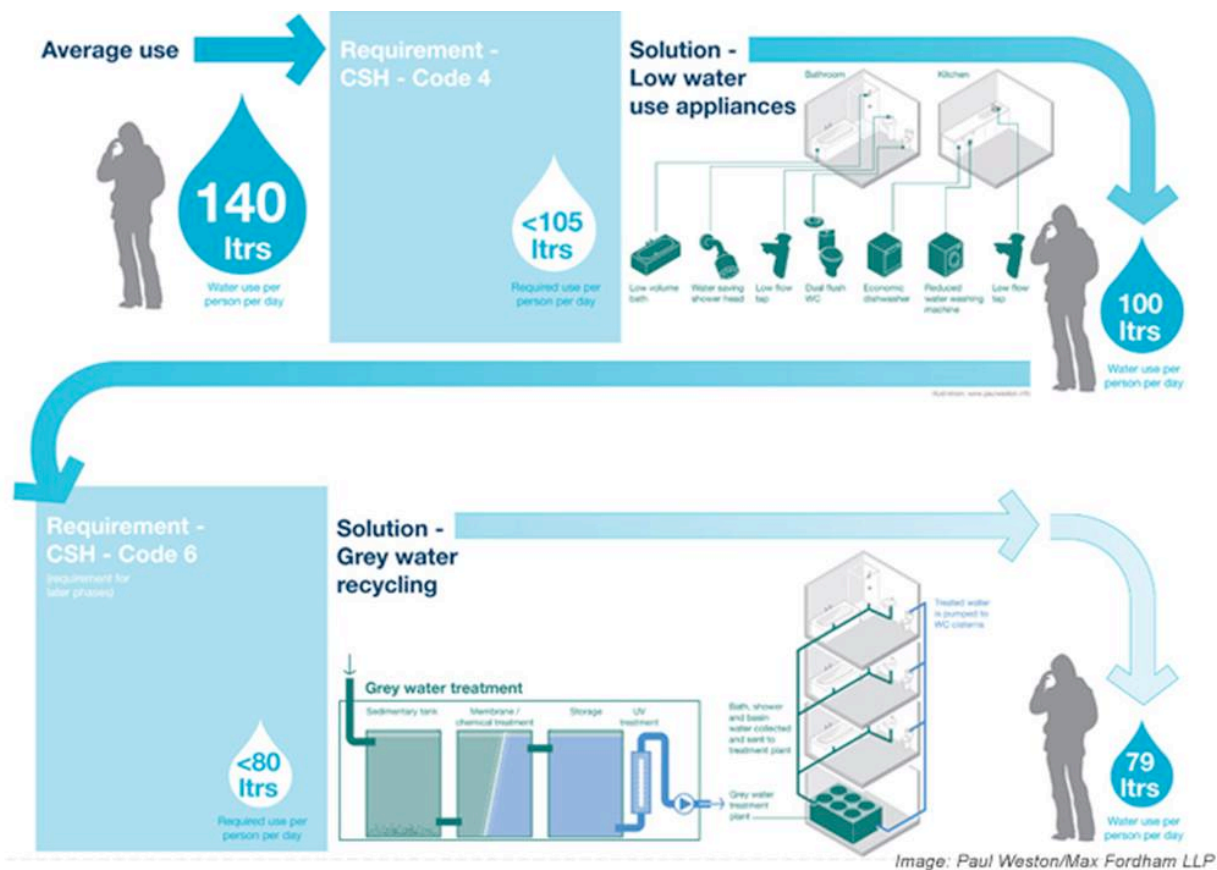


Fig. 21. Ejemplo de Ecoinfografía 9: AGUA. Estrategia para la conservación del agua en The Wharves: incorporar una opción para lograr el nivel más alto de cumplimiento del Código para viviendas sostenibles. Fuente: Max Fordham Engineering. [32]

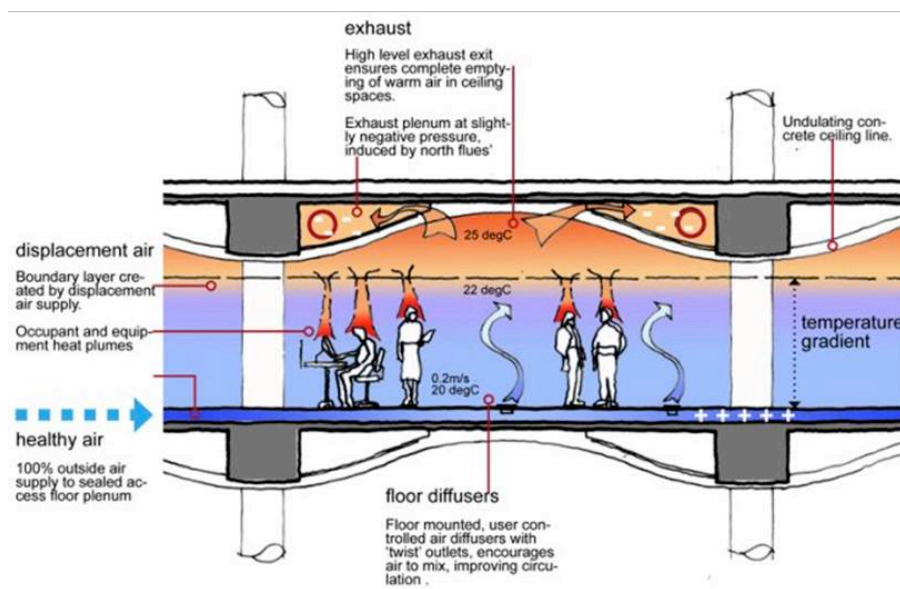
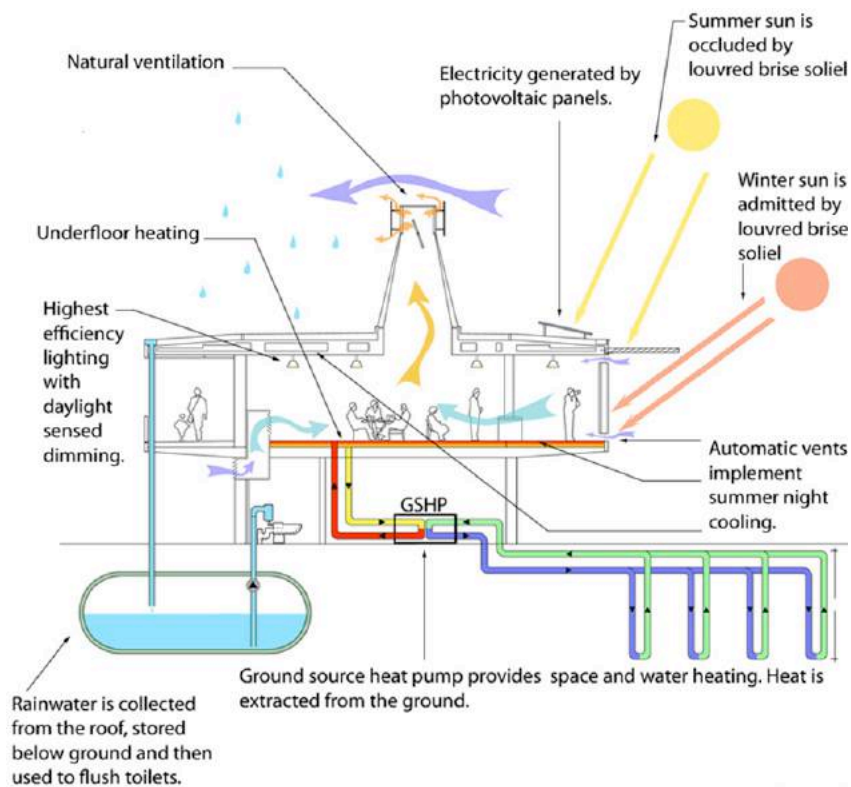


Fig. 22. Ejemplo de Ecoinfografía 11 & 15: CALIDAD AMBIENTAL INTERIOR & SISTEMAS MEDIOAMBIENTALES. Fuente: DesignInc [33]



Imagía: MPELLJ

Fig. 23. Ejemplo de Ecoinfografía 17: COORDINACION DE ESTRATEGIAS DE SOSTENIBILIDAD. Estrategia de Bajo consumo energético. Fuente: Max Fordham, Environmental Design [32]

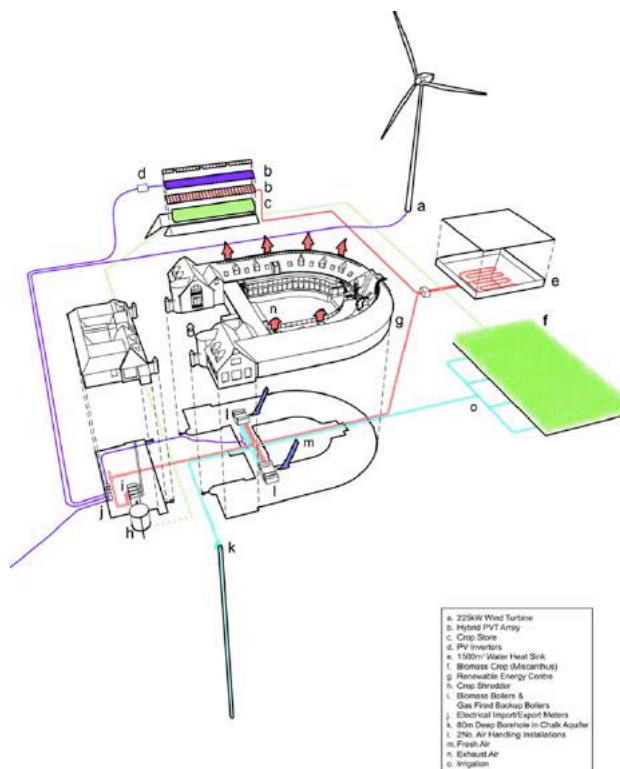


Fig. 24. Ejemplo de Ecoinfografía 10: ENERGIA. Infografía para la Estrategia Energética. Fuente: Max Fordham, Energia Renovable. [32]

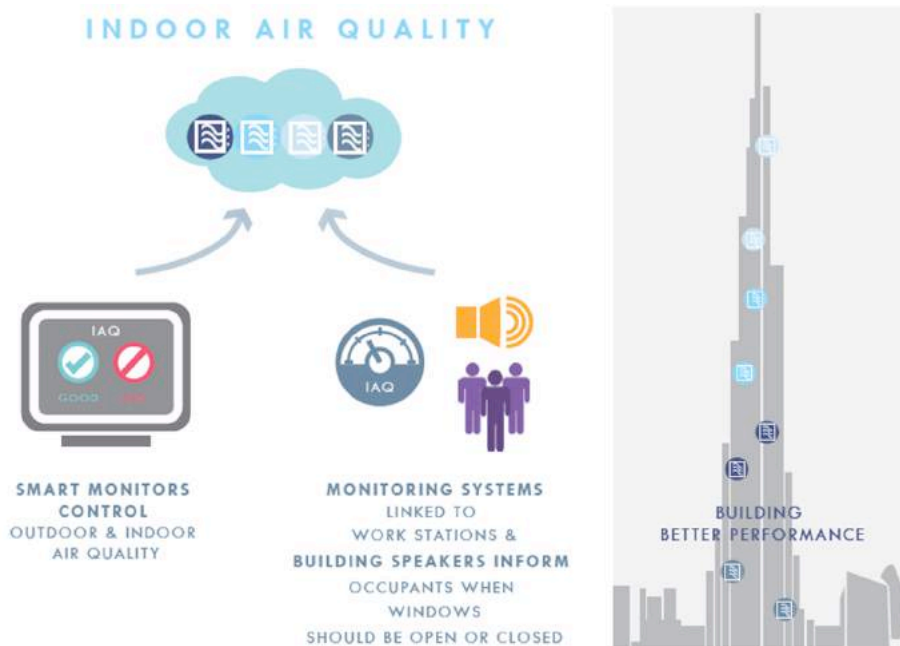


Fig. 25. Ejemplo de Ecoinfografía 14 & 15: CALIDAD AMBIENTAL INTERIOR & CONTROL. Análisis de la Calidad del Aire Interior en los distintos niveles del Burj Khalifa y Control Avanzado de Sistemas para su control. Fuente: Aranjuelo Fernández-Miranda, M., SOM. [29]

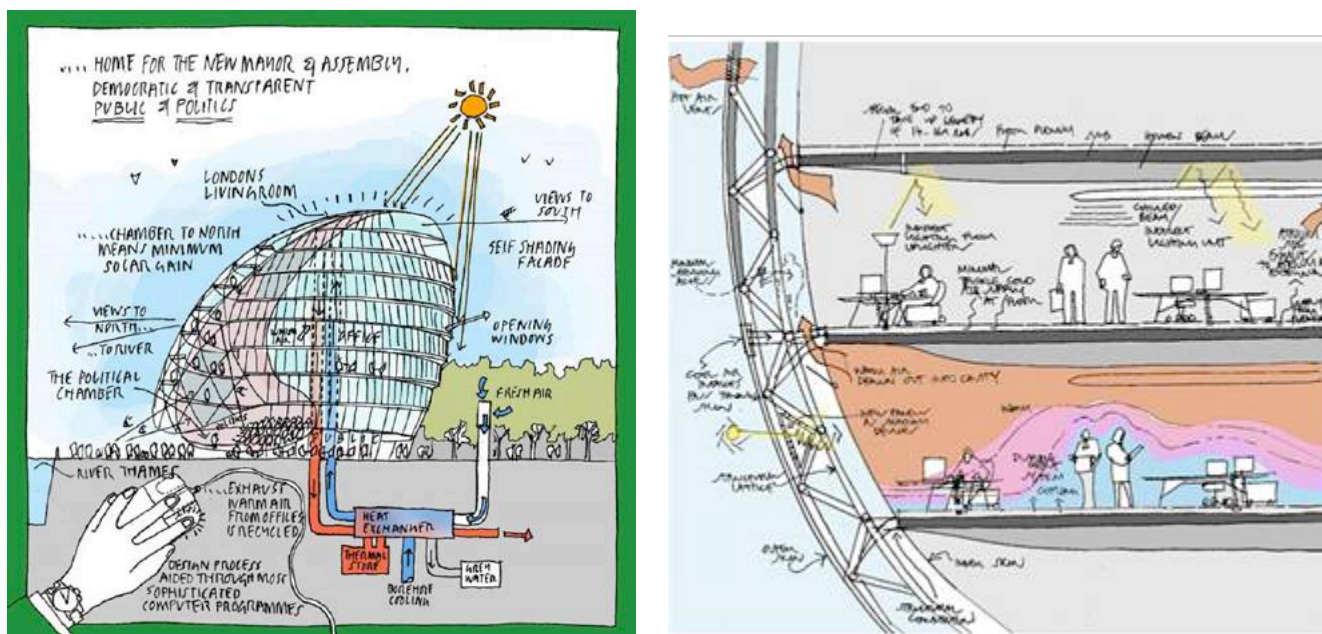


Fig. 26. Ejemplo de Ecoinfografías 4 & 17: GEOMETRIA, MASA Y ORIENTACION DEL EDIFICIO & COORDINACION DE ESTRATEGIAS DE SOSTENIBILIDAD. Ecoinfografía 5: ANALISIS DE LA ENVOLVENTE. Infografía del City Hall. Londres. [34]
Fuente: Foster + Partners

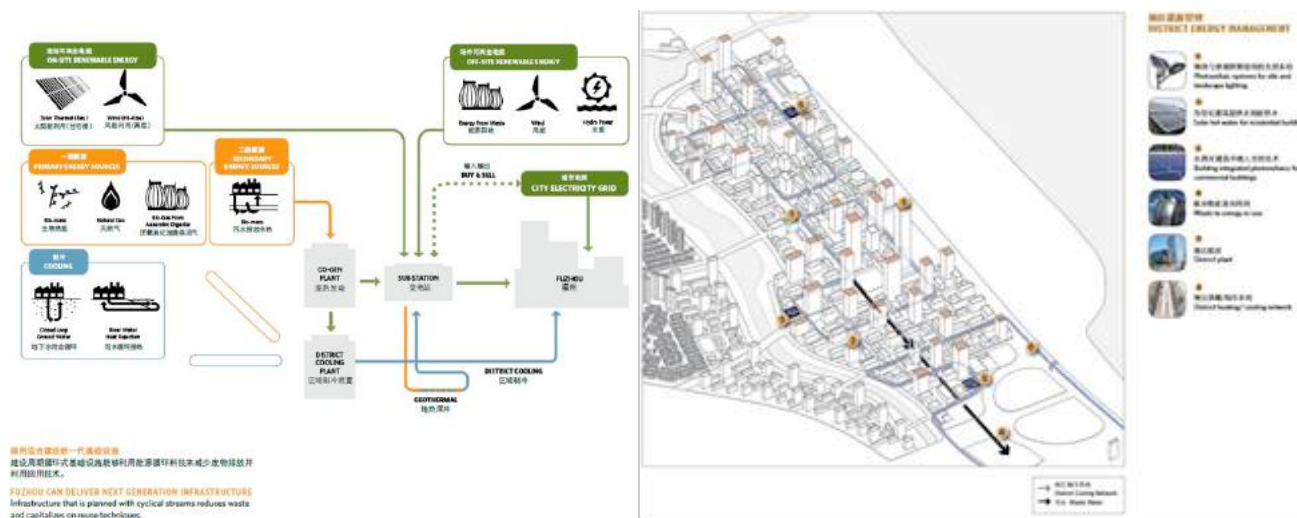


Fig. 27. Ejemplo de Ecoinfografía 10: ENERGIA. Estrategias energéticas en un desarrollo urbano, Fuzhou, China.
 Fuente: SOM, Engineering + Design Book. [28]

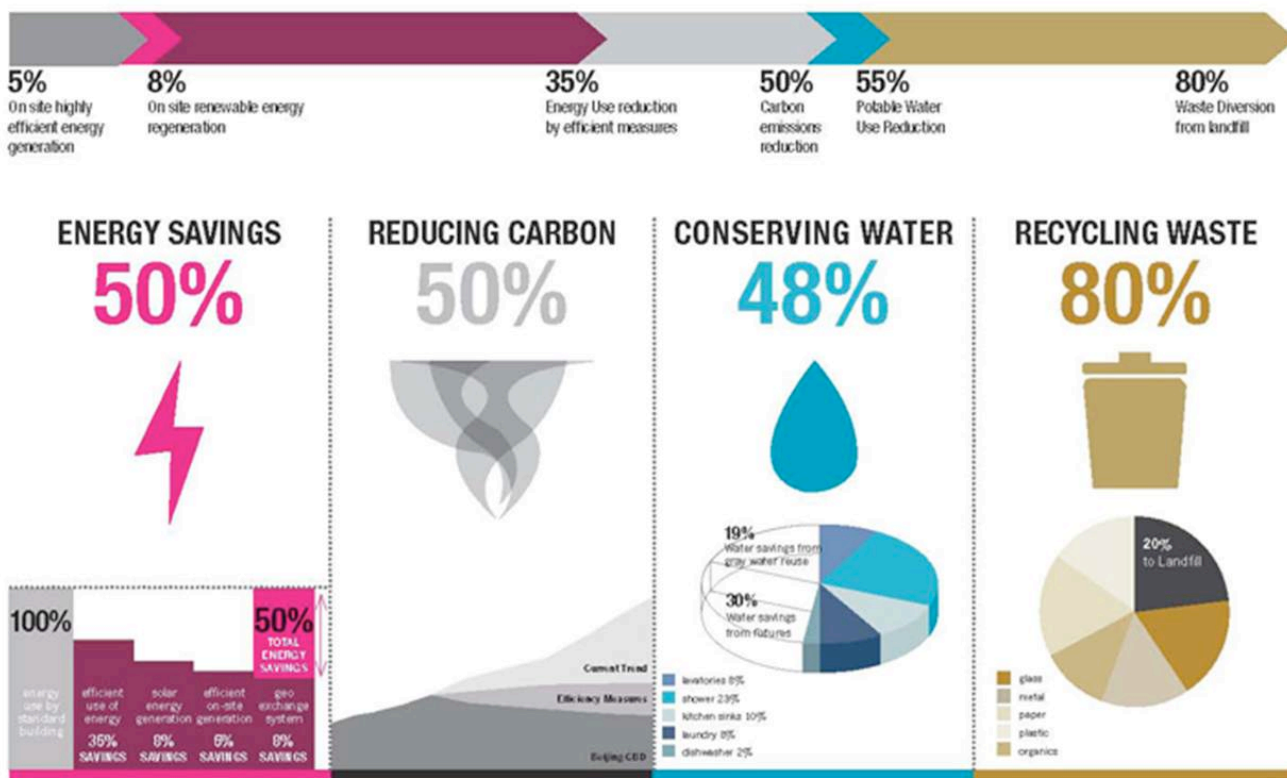


Fig. 28. Ejemplo de Ecoinfografía 17: COORDINACION DE ESTRATEGIAS DE SOSTENIBILIDAD. Infografía de Sostenibilidad para el Master Plan de Beijing, China.
 Fuente: SOM, Engineering + Design Book. [28]

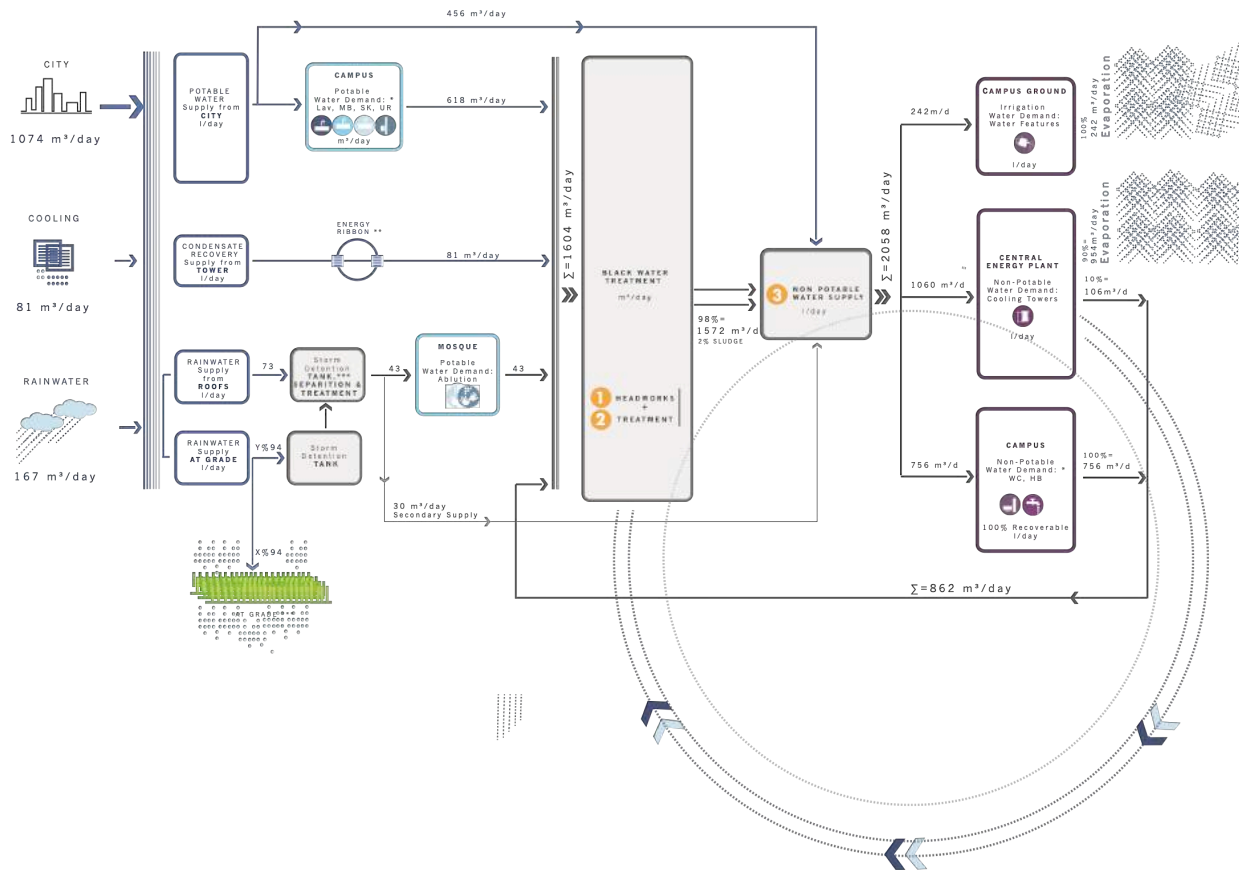


Fig. 29. Ejemplo de Ecoinfografía 16: INNOVACION: AGUA.
Infografía de Innovación en la Estrategia de Agua para Pertamina Energy Tower, Indonesia. Fase Proyecto de Ejecución.
Fuente: Aranjuelo Fernández-Miranda, M. SOM, 2015

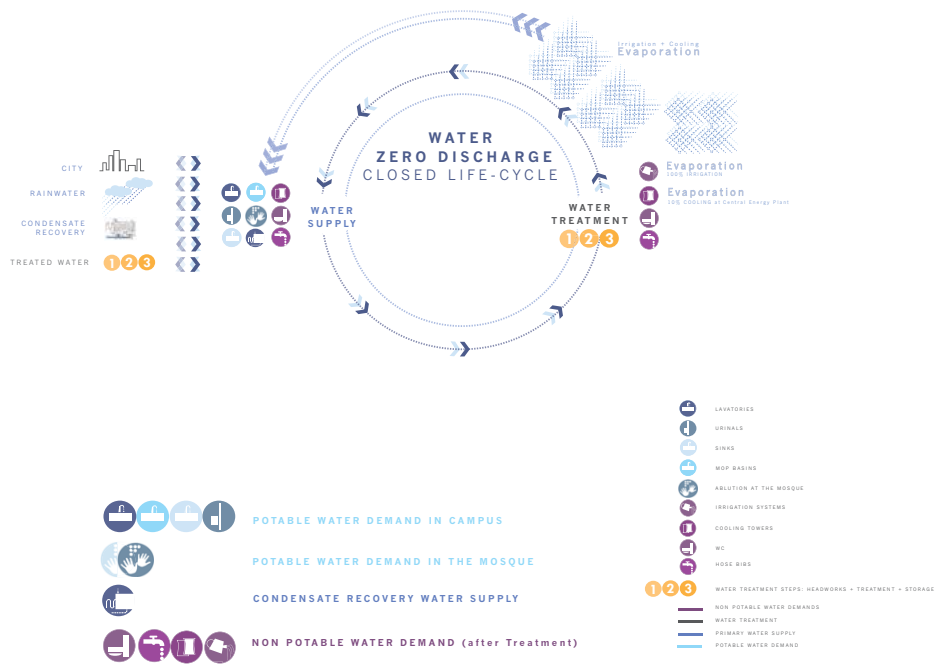


Fig. 30. Ejemplo de Ecoinfografía 16: INNOVACION: AGUA.
Infografía de Innovación en la Estrategia de Agua para Pertamina Energy Tower, Indonesia. Fase Proyecto de Ejecución.
Fuente: Aranjuelo Fernández-Miranda, M. SOM, 2015

6. Ventajas de la aplicación del Protocolo Gráfico de Sostenibilidad EEE

El Protocolo Gráfico Medioambiental y de Eficiencia Energética en Arquitectura y Urbanismo es un sistema de evaluación ambiental universal aplicable a cualquier edificio y desarrollo urbano.

Las ventajas de la aplicación del Protocolo Gráfico Medioambiental y de Eficiencia Energética en Arquitectura y Urbanismo son las siguientes:

1. Esencial o clave para la transferencia de la Sostenibilidad y Ecoeficiencia: permite la comunicación y la transferencia de los conceptos más complejos de forma clara, precisa, eficiente e intuitiva a todas las partes: desde el equipo diseñador multidisciplinar hasta el usuario final o cliente. A través de las Ecoinfografías es posible transmitir los conceptos más complejos sobre Sostenibilidad y Ecoeficiencia en Arquitectura y Urbanismo. Contribuye de forma importante a crear conciencia social sobre el respeto al medio ambiente.

2. Herramienta de Evaluación Ambiental Universal clave para el desarrollo de proyectos de edificación y urbanismo sostenibles y ecoeficientes.

3. Herramienta de diseño universal ante la necesidad de un lenguaje común para la evaluación de edificios y desarrollos urbanísticos sostenibles.

4. Promueve la objetividad y la transparencia: contribuye a fomentar la objetividad y la transparencia al informar a todos los agentes implicados en el proceso constructivo: cliente, promotor, administración, equipo diseñador, constructora, empresas, usuario final...

5. De fácil aplicación para el equipo de diseño. Marca unas pautas de trabajo claves para el diseño y construcción de un edificio o desarrollo urbano sostenible, eficiente desde el punto de vista energético, respetuoso con el medio ambiente: se aplica en todas las etapas que conforman el ciclo de vida cerrado del proceso constructivo del edificio o urbanización. Simplifica el proceso de trabajo del equipo multidisciplinar diseñador.

6. Promueve el Proceso de Diseño y Construcción Integrador: favorece la comunicación, la participación y el trabajo en equipo multidisciplinar, la sinergia entre disciplinas. Mediante la aplicación del Protocolo Gráfico EEE se comunican mejor todos los profesionales o equipos que intervienen en el diseño y en la toma de decisiones sobre el proyecto edificatorio o urbanístico.

7. Herramienta de evaluación útil para la autoevaluación.

8. Fomenta la reflexión y la toma de decisiones informada en cada una de las etapas del ciclo de vida cerrado global por todas las partes en un proceso de diseño integrador: equipo multidisciplinar redactor, cliente, inversor, constructor, proveedor, agente gestor, etc.

9. Fácilmente entendible y muy comunicativo, intuitivo y atractivo a la vista para el cliente, promotor, constructora, administración,... y resto de los agentes de la edificación.

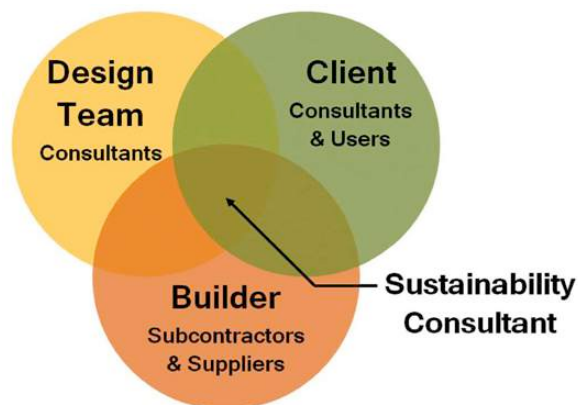


Fig. 31. Diseño Integrador.

Fuente: EDC Environmental Design + Construction. Magazine for the LEED Professional. Junio 2013. [26]

10. Carácter Integrador: Integra los tres pilares que conforman el concepto de Sostenibilidad: económico, social y medioambiental.

11. Promueve la mejora continua, y la puesta en práctica del método *Best Practices*, dirigido por las necesidades del mercado, la investigación y la innovación.

12. Facilita la obtención de la más alta Certificación en los procesos de Certificación internacionales como LEED, WELL o BREEAM, etc. Se trata de un Protocolo Gráfico universal, válido para la obtención de cualquier certificación.

13. Potencia el Diseño Medioambiental, la relación diseño-ecología, absolutamente necesaria para un buen resultado de proyecto.

14. Al potenciar el grado más alto de Sostenibilidad del Edificio o desarrollo urbano, potencia el ahorro económico y el hecho de que los edificios o desarrollos urbanos resultantes sean más competitivos económicamente.

15. Potencia el ahorro de recursos en el proceso de edificación, potenciando por tanto el ahorro económico además del ahorro energético. "Hacer más con menos". Se favorece la economía verde.

16. Promueve "Piensa Globalmente, actúa Localmente".

17. Promueve la Participación ciudadana. "Sustainability is a living process".

18. Promueve la Innovación como herramienta indispensable para lograr el objetivo de mejora continua: edificios y urbanizaciones cada vez más sostenibles y ecoeficientes: Innovador.

19. Promueve la investigación puesto que deja abierto un amplio campo de investigación: crear un código universal, un lenguaje común para cada esquema gráfico o Eco-Infografía que forma parte del Protocolo Gráfico EEE.

Todas estas ventajas demuestran que la aplicación del Protocolo Gráfico Medioambiental y de Eficiencia Energética en Arquitectura y Urbanismo es absolutamente necesaria en la búsqueda de la excelencia ambiental.

7. Conclusiones

El Protocolo Gráfico EEE surge ante la búsqueda de la excelencia ambiental en Arquitectura y Urbanismo.

La efectividad y la capacidad de la Infografía para transmitir el concepto de Sostenibilidad es indiscutible. Sin embargo, en la actualidad se ha analizado y comprobado que en Arquitectura y Urbanismo no se recurre lo suficiente a la Infografía para transmitir la Sostenibilidad y la Ecoeficiencia [5]; son muy pocos los arquitectos, consultores y equipos de diseño que reflejan sus análisis sobre la Sostenibilidad de los proyectos con esquemas gráficos. En Arquitectura no es habitual que las infografías o esquemas gráficos sobre sostenibilidad formen parte de los proyectos arquitectónicos o urbanísticos. [5]

Tal y como se expone a lo largo del presente capítulo, la representación de la Sostenibilidad a través de infografías, grafismos e imágenes debe formar parte de todos los proyectos arquitectónicos y urbanísticos, y entenderse como un apartado más de representación y análisis, fundamental para lograr el objetivo de diseñar, construir, utilizar/mantener, desconstruir edificios y desarrollos urbanos ecológicos, sostenibles o ecoeficientes.

Las ecoinfografías o infografías sobre sostenibilidad en arquitectura y urbanismo deben estar presentes en todos los proyectos arquitectónicos y urbanísticos. De esta forma se fomentará la reflexión sobre esta cuestión y se favorecerá el diseño, la ejecución, el uso, mantenimiento y fin de vida útil de edificios y desarrollos urbanos sostenibles, ecológicos. Se ha de imponer un apartado gráfico sobre sostenibilidad. De este modo, surge la necesidad de introducir un protocolo gráfico de sostenibilidad y ecoeficiencia universal en los proyectos de arquitectura y urbanismo.

El Protocolo Gráfico de Sostenibilidad EEE es una herramienta universal de evaluación ambiental (aspectos ecológicos + económicos + sociales) con enfoque holístico integral aplicable a cualquier edificio y desarrollo urbano.

Se trata de un protocolo gráfico basado en el análisis de ciclo de vida global cerrado empleado para valorar el comportamiento ambiental de cualquier edificio, urbanización y/o subsistemas. Este Protocolo además de centrarse en la variable ambiental, adopta criterios que encajan las variables económica y social.

El Protocolo Gráfico EEE se basa en el cumplimiento de las Estrategias para la Sostenibilidad y la Ecoeficiencia en Arquitectura y Urbanismo, en las categorías de créditos de los sistemas de certificación internacionales LEED, WELL, BREEAM para satisfacer los criterios de los Edificios Verdes y los Principios de Edward Tufte para la excelencia en Infografía y visualización de datos.

A través de la implementación del *Environmental & Energy Efficiency Graphical Protocol* se pretende lograr un lenguaje gráfico universal a aplicar como herramienta de diseño y comunicación claro, eficiente, preciso, objetivo e intuitivo, la búsqueda de la Excelencia Ambiental en Arquitectura y Urbanismo.

El Protocolo Gráfico EEE dota a los proyectos arquitectónicos y urbanísticos de un apartado de representación gráfica en todas las etapas del proceso constructivo - Análisis de Ciclo de Vida Global y Cerrado - cuyo fin es:

1. Favorecer y **fomentar la reflexión, el razonamiento, la información y el análisis en la toma de decisiones del equipo de proyectos multidisciplinar** y resto de personas y agentes que intervienen en el proceso constructivo. La aplicación de este protocolo supone crear la necesidad de sentarse a reflexionar y sintetizar las conceptos sobre Sostenibilidad y Ecoeficiencia y las ideas del proyecto hasta que se les dé forma con un esquema o boceto (tanto en las primeras fases como en las últimas en el ciclo de vida global cerrado), o una infografía resultado de la aplicación de una herramienta software específica sobre comportamiento energético, análisis de ciclo de vida, soleamiento, viento, calidad del aire, iluminación,... El *Environmental & Energy Efficiency Graphical Protocol in Architecture & Urbanism* contribuye potencialmente a que la toma de decisiones sobre el diseño, la construcción, el uso, mantenimiento y desconstrucción del proyecto edificatorio o urbanístico en cuestión sea informada y objetiva, adecuada, y por tanto se logre una Arquitectura y Urbanismo Ecológicos.

2. **Aportar una visión global y holística sobre el proceso de diseño y construcción medioambiental en los proyectos de edificios y urbanizaciones** a todas las partes que intervienen en dicho proceso a través de la representación gráfica, la comunicación visual, fomentando de esta forma la transmisión efectiva del concepto de Sostenibilidad en Arquitectura y Urbanismo.

3. Que **la Sostenibilidad llegue a toda la Sociedad y contribuir potencialmente en la concienciación por el respeto a la Naturaleza y el Medio Ambiente**. Los gráficos son un gran recurso para ello puesto que la comunicación visual es una poderosísima herramienta de comunicación: una imagen vale más que mil palabras. Es posible comunicar los conceptos científicos y técnicos más complejos a través de imágenes y que éstas puedan ser entendidas por cualquier persona ajena al mundo de la construcción. Este es el gran reto que se persigue con la presente propuesta puesto que no se debe olvidar que el respeto a la Naturaleza es cosa de todos, de toda la sociedad en su conjunto: promotor, instituciones, organismos, equipos de proyecto, compañías, clientes y usuarios finales han de contribuir de forma significativa en este proceso. La sostenibilidad es un modo de vida.

Las ventajas que supone la aplicación del Protocolo Gráfico EEE enumeradas en el apartado anterior son numerosas y demuestran que su aplicación contribuye potencialmente en la implementación de la Sostenibilidad en Arquitectura y Urbanismo.



Fig. 32. Envidia Ecológica. Rehabilitación de edificios.

Fuente: EDC Environmental Design + Construction. Magazine for the LEED Professional. Junio 2013. [26]

El *Environmental & Energy Efficiency Graphical Protocol in Architecture & Urbanism* es una herramienta clave para el diseño y construcción medioambiental que promueve la investigación, la innovación, la mejora continua, la economía verde y la participación e integración de todas las partes para lograr la excelencia ambiental.

LA SOSTENIBILIDAD ES UN ESTILO DE VIDA

La aportación de un Protocolo Gráfico Medioambiental y de Eficiencia Energética en Arquitectura y Urbanismo supone la incorporación de una herramienta visual de evaluación ambiental universal muy poderosa y útil para lograr el último objetivo propuesto: transmitir de forma efectiva y exitosa la Sostenibilidad en Arquitectura y Urbanismo a todas las escalas de la Sociedad y fomentar una mayor concienciación sobre el cuidado y respeto por nuestro planeta.

En definitiva, lograr la comunicación efectiva de la Sostenibilidad en Arquitectura y Urbanismo a través del Lenguaje Gráfico, la comunicación visual, para involucrar y concienciar a la Sociedad sobre la puesta en práctica de medidas y estrategias medioambientales en el ámbito de la Construcción. La sostenibilidad es un estilo de vida y todos debemos participar.

Glosario

Sostenibilidad: la capacidad para soportar, mantener y perdurar en el tiempo. Desde la perspectiva de la prosperidad humana y según el Informe Brundtland de 1987, la sostenibilidad consiste en satisfacer las necesidades de la actual generación sin sacrificar la capacidad de futuras generaciones de satisfacer sus propias necesidades.

En la Cumbre Mundial sobre Desarrollo Social de 2005 se expresó que la sostenibilidad requiere la reconciliación de las demandas medioambientales, sociales y económicas - los “tres pilares” de la sostenibilidad o las “tres Es”. Esta visión se ha expresado como una ilustración que emplea tres elipses sobrelapadas indicando que los tres pilares de la sostenibilidad no son mutuamente exclusivos y pueden reforzarse mutuamente. Estos tres pilares han servido como base común para numerosas normativas y sistemas de certificación sobre sostenibilidad en los últimos años.

Mejora continua o Best practice: método basado en la evaluación continua de un producto para su mejora. Es dirigido por las necesidades del mercado. Es un método o técnica que constantemente ha mostrado resultados mejores a otros logrados a través de otros métodos, y es utilizado como referencia.

Programas de Demanda y Respuesta: Programas que promueven la comunicación bidireccional entre los edificios y las centrales eléctricas, apoyando la gestión sofisticada en la medición por ambas partes. [2]

Infografía: Como indica el término, la infografía se ocupa de aportar y transferir información a través de la representación gráfica. La infografía es la representación gráfica visual de información, datos o conocimiento. Estos gráficos presentan la información compleja de forma rápida y clara.

Eco-infografía: Infografías sobre Sostenibilidad en Arquitectura y Urbanismo que constituyen el Protocolo Gráfico EEE de Sostenibilidad y Eficiencia Energética. Infografías ecológicas o medioambientales, gráficos o esquemas que expresan o representan estrategias medioambientales y de eficiencia energética en los proyectos arquitectónicos o urbanísticos para lograr una Arquitectura y Urbanismo Ecológicos.

Ecológico: medioambiental, verde, ecoeficiente, que respeta el medio ambiente.

Diseño Medioambiental: Diseño arquitectónico y urbanístico enfocado en el respeto al medio ambiente y la naturaleza.

Eficiencia energética: la relación entre la producción de un rendimiento, servicio, bien o energía, y el gasto de energía.

Análisis de ciclo de vida: el análisis del ciclo de vida (ACV) es una herramienta que se usa para evaluar el impacto potencial sobre el ambiente de un producto, proceso o actividad a lo largo de todo su ciclo de vida mediante la cuantificación del uso de recursos ("entradas" como energía, materias primas, agua) y emisiones ambientales ("salidas" al aire, agua y suelo) asociados con el sistema que se está evaluando. El Análisis del Ciclo de Vida de un producto típico tiene en cuenta el suministro de

las materias primas necesarias para fabricarlo, transporte de materias primas, la fabricación de intermedios y, por último, el propio producto, incluyendo el envase, la utilización del producto y los residuos generados por su uso.

Ciclo de Vida Global Cerrado: aplicación de una visión holística, es decir, de todo el producto en su totalidad, al aplicar el análisis o evaluación del ciclo de vida logrando su cierre. El ciclo de vida de un producto se cierra de la misma forma que la naturaleza cierra sus ciclos: el concepto de la cuna a la cuna, “*from cradle to cradle*”.

Economía Verde: economía que resulta en una salud humana mejorada y una sociedad igualada, mientras se reducen significativamente los riesgos medioambientales y las escaseces ecológicas. La economía verde es un modelo de desarrollo económico basado en el desarrollo sostenible y el conocimiento de la economía ecológica.

Proyectos de Alto Rendimiento (High performance) y coste efectivo (cost-effective): proyectos arquitectónicos y urbanísticos que cumplen los requisitos de alta eficiencia energética y sostenibilidad y que en consecuencia resultan menos caros a corto o a largo plazo.

Toma de Decisiones Informada: toma de decisiones basada en el conocimiento profundo y la información.

Proceso de Diseño Integrador: proceso basado en la integración multidisciplinar que favorece la toma de decisiones informada en el diseño medioambiental: se aporta una solución sencilla a la complejidad propia de la arquitectura y urbanismo contemporáneos. El Proceso de Diseño Integrador (IDP) abarca la complejidad promoviendo y gestionando el diseño colaborativo; considera diversidad de ideas y perspectivas en un método holístico que se desarrolla para armonizar los elementos de diseño relacionados con la energía, materiales, suelo, clima, construcción, economía, cultura y sociedad.

Perspectiva de la Construcción Global: visión integradora y global del edificio o desarrollo urbano necesaria para la implementación de la Sostenibilidad en Arquitectura y Urbanismo.

Código Universal: lenguaje común en todo el mundo. En este caso se refiere al diseño gráfico medioambiental en Arquitectura y Urbanismo. Es uno de los objetivos del Protocolo Gráfico EEE de Sostenibilidad y Eficiencia Energética en Arquitectura y Urbanismo.

Transferencia de la Sostenibilidad: transmisión y comunicación de la arquitectura y urbanismo sostenibles a la sociedad a través de distintas herramientas, en este caso el lenguaje gráfico.

Resiliencia: capacidad de anticiparse un riesgo para recuperarse rápidamente del impacto causado, evolucionando y/o fortaleciéndose. Es decir, es la capacidad de las comunidades, sociedades o sistemas expuestos a amenazas, para resistir, absorber, adaptarse y recuperarse.

Referencias

- [1] Renzo Piano Building Workshop.
- [2] Nigel Holmes Explanation Graphics. <http://nigelholmes.com/>
- [3] Tufte, E. R. 2001. *The Visual Display of Quantitative Information*. 2nd edition, Graphic Press, Cheshire, Connecticut.
- [4] Tufte, E. R. *Envisioning Information*. Graphic Press, Cheshire, Connecticut. 1990.
- [5] Aranjuelo_Fernández-Miranda, M. (2014). *Sustainability, Certification & Transfer*. Tesis Doctoral. San Sebastián. UPV/EHU.
- [6] Hernández_Minguillón, R., Irulegi, O., Aranjuelo_Fernández-Miranda, M. (Eds.). (2012). *Arquitectura Ecoeficiente* (Tomo I, 338 págs.). San Sebastián, España. Servicio Editorial de la UPV/ EHU. <http://www.masterconstruccionsostenible.org/download.html>
- [7] U.S. Green Building Council. LEED. Leadership in Energy and Environmental Design. <http://www.usgbc.org/leed>
- [8] International WELL Building Institute. <https://www.wellcertified.com/>
- [9] BREEAM. <https://www.breeam.com/>
- [10] Integrative Process. U.S. Green Building Council. <http://www.usgbc.org/node/2613097?return=/credits/new-construction/v4-draft>
- [11] Granados Menéndez, H. (2006) *Principios y Estrategias del diseño bioclimático en la arquitectura y el urbanismo. Eficiencia Energética*. Monografías CATS Consejo Superior de los Colegios de Arquitectos de España.
- [12] IES, Integrated Environmental Solutions. <http://www.iesve.com/software/ve-toolkits>
- [13] IES Software Solutions for LEED, EDC Magazine, June 2013. <http://www.iesve.com/software/ies-leed-solutions-software-spread.pdf>
- [14] TRNSYS software. <http://www.trnsys.com/>
- [15] EnergyPlus Energy Simulation Software. http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/?utm_source=EnergyPlus&utm_medium=redirect&utm_campaign=EnergyPlus%2Bdirect%2B1
- [16] DesignBuilder. <http://www.designbuilder.co.uk/>
- [17] Autodesk Ecotect Analysis. <http://usa.autodesk.com/ecotect-analysis/>
- [18] EDSL TAS. <http://www.edsl.net/main/>
- [19] eQUEST. <http://www.doe2.com/equest/>
- [20] BEopt. <http://beopt.nrel.gov/>
- [21] Autodesk Vasari. <http://autodeskvasari.com/>
- [22] OpenStudio. <http://openstudio.nrel.gov/>
- [23] Synergy. <https://simergy.lbl.gov/>
- [24] Zamora i Mestre, J.L. (2012). *Materiales edificatorios en una construcción industrializada ecológica*. En R. Hernández_Minguillón, O. Irulegi, M. Aranjuelo Fernández-Miranda (Eds.), *Arquitectura Ecoeficiente* (Tomo I, pp. 224-249). San Sebastián, España. Editorial de la UPV/EHU.
- [25] González Barroso, J.M. (2012). *Industrialización y sostenibilidad en la tecnología de la arquitectura*. En R. Hernández_Minguillón, O. Irulegi, M. Aranjuelo Fernández-Miranda (Eds.), *Arquitectura Ecoeficiente* (Tomo I, pp. 250 - 265). San Sebastián, España. Servicio Editorial de la UPV/ EHU
- [26] EDC Environmental + Design + Construction, The official magazine for LEED Profesional. 2013.
- [27] Johnson controls. The PANTOPTIX Platform. *Data becomes information*. <https://whatspossible.johnsoncontrols.com/community/panoptix/apps>
- [28] SOM. *Sustainable Engineering + Design Book. Helping to shape SOM's projects*.
- [29] SOM. Skidmore, Owings & Merrill.
- [30] Feilden Clegg Bradley Studios. <http://www.fcbstudios.com/>
- [31] Rogers Stirk Harbour + Partners. <http://www.rsh-p.com>
- [32] Max Fordham. <http://www.maxfordham.com/>
- [33] Design Inc. <http://www.designinc.com.au/>
- [34] Foster + Partners. <http://www.fosterandpartners.com>

Rehabilitación Energética

Energy Renovation

Helena Granados Menéndez ^{a*}

^a Arquitecta, consultora. ARC³-Arquitectura, Rehabilitación y Confort Climático en Ciudad, Comisión Europea, Consejo Superior de los Colegios de Arquitectos de España.

Resumen

Este capítulo pretende aportar algunos criterios para facilitar una intervención en el parque edificatorio construido orientada a reducir la demanda energética asociada a la consecución del confort higrotérmico para las actividades interiores. La complejidad de la rehabilitación edificatoria en un entorno construido consolidado implica un análisis singular y pormenorizado del comportamiento energético del edificio ajustado a las condiciones del entorno con el que se relaciona, desde el medio físico hasta el clima o la calidad del aire exterior. Esta compleja matriz que afecta tanto al diagnóstico como a la toma de decisiones requiere de una serie de aproximaciones que permitan simplificar el problema: esta simplificación se aborda en el texto mediante la identificación de tipos energéticos en las diferentes escalas de actuación en el ámbito urbano que permitan una primera lectura de la problemática energética del edificio o unidad energética. En resumen, mediante este capítulo se pretende facilitar al técnico, conocedor de la complejidad de los sistemas urbanos, edificatorios y constructivos, una lectura energética de los mismos que le ayude en la toma de decisiones en la rehabilitación energética.

Palabras clave: Eficiencia Energética, Rehabilitación Energética, Confort Térmico

Abstract

This chapter aims to provide some criteria that allow an easier approach to energy retrofitting focused on thermal comfort for human activities inside buildings. The complexity of energy retrofitting of buildings increases inside urban areas as the building has to be analysed as a piece of a bigger energy system: urban context, climate and air quality have to be taken into account. However, these complex matrix's terms can be reduced through a set of approaches that can provide energy typologies for the different scales inside urban context as a tool that can help to identify energy weaknesses for each building or energy unit. In summary, this chapter tries to provide an energy approach that can help architects and urban planners to tackle the energy retrofitting of buildings in its entirety.

Keywords: Energy Efficiency, Energy Retrofitting, Thermal Comfort

1. Introducción

El acceso a fuentes de abastecimiento energético de bajo coste basadas en la combustión ha propiciado el aumento exponencial del consumo energético en los dos últimos siglos. La actual crisis energética, el agotamiento de los combustibles fósiles, y los daños generados en el medio ambiente -entre los que destacan el alarmante crecimiento de las emisiones de CO₂ y el calentamiento global asociado- hacen necesario repensar este sistema de consumo insostenible en el espacio y en el tiempo

Desde los diferentes ámbitos administrativos se identifica, a través de parámetros estadísticos, el alto consumo energético que conlleva la edificación tanto en su

proceso de producción como en el de mantenimiento en condiciones de habitabilidad, seguridad y confort, haciéndose patente su incidencia en el consumo energético global en el mundo, tanto en energía primaria como en energía final.

A grandes rasgos, se estima que su consumo de energía final representa el 40% del total anual en la Unión Europea. En España, supone cifras algo menores, aunque su porcentaje anual supera la tercera parte del consumo de energía final global del país.

Por otra parte, la problemática de la ciudad actual está asociada a su crecimiento desaforado, basado en el uso de suelo como sistema de producción de plusvalía desarrollado durante las últimas décadas: se ha potenciado

* arc3@terra.com

Citar como: Granados Menéndez H. (2019). Rehabilitación energética. En R. Hernández Minguillón, O. Irulegi, M. Aranjuelo Fernández-Miranda (Eds.), *Arquitectura Ecoeficiente* (Tomo II, pp. 170–203). San Sebastián, España. Servicio Editorial de la UPV/EHU.

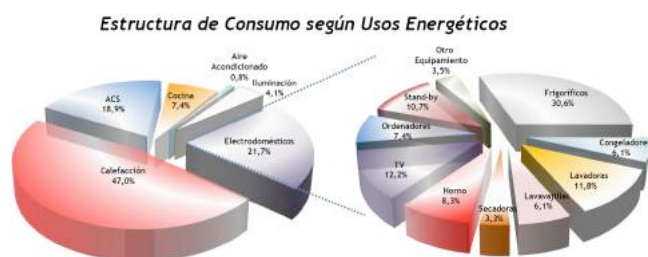
de forma sistemática la construcción de edificios de nueva planta frente al mantenimiento del parque edificatorio existente. En el momento actual, se estima que en nuestro país existe un stock de vivienda nueva sin vender de alrededor de 500.000, stock que alcanzó su máximo en 2009 con 649.780 viviendas, de acuerdo con los datos del Ministerio de Fomento. Dado el ritmo de reducción actual de ese stock, y después de una década de crisis, la digestión del parque inmobiliario nacional sin demanda solo se completaría alrededor de 2050.

Al crecimiento indiscriminado del número de espacios habitacionales hay que sumar la baja calidad energética de muchos de los edificios que componen el parque edificatorio existente y el efecto de su combinación con patrones de funcionamiento altamente derrochadores de energía.

La tendencia, soportada por sucesivas burbujas inmobiliarias ahora “pinchadas” y frenada por la actual crisis económica ha sido a un cada vez mayor número de hogares y cada vez menor número de habitantes por m²¹. Esta tendencia está asociada a una mayor demanda energética en el ámbito de la vivienda. Por otra parte, el parque edificatorio existente, poco adaptado, ha respondido a la evolución de los patrones de confort con modelos más consumidores de energía.

Dentro del parque edificatorio existente el sector residencial supone un 85% del parque construido, correspondiendo el 15% restante al sector terciario, por lo que la actuación sobre el parque residencial existente es clave a la hora de reducir los consumos energéticos globales.

Centrándose en el consumo asociado al funcionamiento de los edificios (climatización, iluminación, ACS y aparataje), los datos proporcionados por el IDAE muestran que el mayor porcentaje del consumo energético en el sector residencial corresponde al acondicionamiento térmico.



Fuente: IDAE. Proyecto SECH-SPAHOUSEC

Fig. 1. Estructura de consumo de los hogares españoles según usos energéticos

De la secuencia de las cifras anteriores emerge claramente la necesidad de actuar en el parque edificatorio existente para reducir los consumos energéticos asociados

¹ De acuerdo con datos procedentes del INE, en este momento hay una vivienda para cada 2, 49 habitantes.

al acondicionamiento térmico y surge un nuevo concepto en el ámbito de la actividad edificatoria, la rehabilitación energética.

La definición que propone el Diccionario de la lengua sobre “rehabilitar” es “Habilitar de nuevo o restituir a alguien o algo a su antiguo estado”. En edificación, la aplicación de este concepto a un parque edificatorio que resulta obsoleto en su comportamiento energético requiere, al menos, una serie de matizaciones.

El primero de los factores a considerar es la evolución en las condiciones consideradas de “confort térmico” a lo largo de las últimas décadas y su relación con la disponibilidad de una energía de fácil acceso y aparentemente ilimitada y, durante un tiempo, accesible a nivel económico para grandes sectores de la población.

Una primera pregunta que podría hacerse es cuántos de los edificios existentes fueron concebidos para mantener en su interior las actuales condiciones consideradas de confort, con un rango de temperatura que se corresponde con el de un individuo en estado de reposo y con ropa ligera que puede desplazarse por todos los espacios de estancia sin sentir alteraciones significativas en su temperatura de sensación.

La respuesta intuitiva es “no muchos”, considerando el rango que abarca el sector residencial, desde los edificios decimonónicos de grandes habitaciones y altísimos techos difícilmente calefactables hasta las viviendas de baja calidad constructiva que se construyeron a lo largo del siglo pasado para recoger a la población de aluvión que se incorporaba al ámbito urbano y que se estima en millones de viviendas².

Al incremento de la superficie de vivienda y consumo de energía por habitante hay que añadir, en el cómputo energético, los cambios producidos en la forma de construir que hacen que los edificios construidos en las últimas décadas se conviertan en sistemas derrochadores de energía en función de diferentes factores:

- el edificio se concibe como un contenedor cerrado al aprovechamiento de las aportaciones energéticas gratuitas del entorno, mientras que las necesidades de confort térmico se gestionan mediante sistemas de apoyo,
- el “boom” de la energía barata del siglo pasado acelera el proceso del “todo vale” en la concepción de la edificación como cobijo, generándose construcción rápida y de baja calidad energética para cubrir las necesidades de alojamiento ligadas al desarrollo industrial de las ciudades,
- el ratio entre superficie construida y superficie útil va descendiendo en relación inversa al aumento del valor económico del suelo. Se recurre a materiales aislantes de poco espesor para alcanzar los valores de máximos de transmisión de calor marcados por la legislación vigente, muchas veces con una puesta en obra

² Según el banco público de indicadores ambientales, en España se construyeron 13 millones de viviendas con anterioridad a la NBE-CT79.

inadecuada que repercute negativamente en el comportamiento energético del edificio,

- el modelo urbano se diversifica, colmatándose los centros y apareciendo desarrollos urbanos de baja densidad en las áreas periféricas y en las áreas de influencia de los centros urbanos colmatados y degradados. Se producen así nuevas tipologías edificatorias poco compactas, básicamente asociadas al uso residencial, que suponen un aumento del consumo de energía para su funcionamiento respecto al de tipologías de densidades medias o medias altas que constituyen el tejido tradicional de la ciudad,
- se reducen al mínimo los sistemas de regulación higrotérmica del edificio (canales de ventilación, sistemas móviles de aislamiento y sombreado) asociados a la intervención del usuario en la gestión del confort,
- se globalizan los sistemas constructivos, asociando su selección más a “status” social y/o urbano que a requerimientos energéticos o funcionales de la edificación.

A todo lo anterior hay que añadir que, en el abordaje de la rehabilitación energética del edificio, es necesario considerar no solo el objeto edificatorio y sus requerimientos, sino el ámbito espacial, social, normativo y funcional en el que necesariamente tiene que desarrollarse la operación.

Los resultados esperados son múltiples: poner en valor edificaciones o partes de la misma que han quedado obsoletas, ajustar las condiciones de confort a los patrones culturales de los actuales modelos urbanos, y reducir las emisiones de CO₂ derivadas del funcionamiento cotidiano de la edificación.

A estos criterios se suma, en el momento actual, la creación de un motor económico para el sector de la edificación, tal y como queda reflejado en las leyes de rehabilitación y regeneración urbana y los Planes Estatales de Vivienda vigentes, destinados a regular el fomento del alquiler de viviendas, la rehabilitación edificatoria y la regeneración y renovación urbanas en condiciones de calidad edificatoria.

La ciudad actual requiere una edificación accesible, segura y eficiente energéticamente. El edificio no puede entenderse como un objeto que flota en un “limbo” neutro con el que no establece ninguna vinculación, sino como una parte del hábitat construido interdependiente con el hábitat natural.

La creación de una ciudad sostenible pasa necesariamente por la consideración del edificio en su entorno y la intervención sobre la ciudad construida para ajustar sus procesos a niveles de eficiencia energética mayores: para alcanzar un balance energético “neutro” o incluso positivo es necesario ampliar, renovar, sustituir o ensamblar piezas de la misma ajustando las actuaciones a las diferentes escalas de intervención espacial y temporal.

El diagnóstico debe basarse en diferentes parámetros en función de la escala de intervención que pueda ser tratada

de una manera más eficaz energéticamente (barrio, manzana, edificio, espacios públicos...), si bien en todos los casos resulta necesaria una masa crítica suficiente que permita evaluar a un tiempo parámetros de habitabilidad y confort, actividad y relación y evaluación y mejora de su consumo energético asociado. La interpretación del sistema energético a evaluar y modificar requiere, además, de su interpretación como parte de un ecosistema energético dinámico mayor, la ciudad, considerando su integración en el territorio.

El edificio a rehabilitar forma parte de un sistema energético más complejo mientras que actúa, a su vez, como sistema energético abierto. Por otra parte, la interpretación del sistema edificio requiere de la identificación y el análisis de los subsistemas que lo conforman y de la interrelación entre estos: por una parte, la piel o “envolvente térmica del edificio”, que modula la relación entre el ambiente interior y su ámbito exterior, regulando así la respiración del edificio; por otra parte, los sistemas de bombeo de flujos energéticos y masivos entre el interior y el exterior que alimentan dicho sistema y permiten la eliminación de sobrantes del mismo.

Se abordan, en los siguientes apartados, las estrategias de rehabilitación energética más directamente ligadas a la arquitectura, entendiéndolo el edificio como cobijo y modulador térmico entre el ser humano y el exterior.

2. El diagnóstico energético

La identificación, análisis y propuesta de estrategias de mejora del edificio como sistema energético implica la actuación sobre un sistema que “existe” y que se comporta energéticamente de una determinada manera en función de sus flujos de entrada y de salida: agua, materiales y energía. Solo la comprensión de este funcionamiento, de la “dinámica energética del edificio”, permite una intervención posterior orientada a optimizar el sistema.

Los diferentes tejidos urbanos, tipos edificatorios y configuraciones constructivas generan diferentes respuestas frente al medio. Así, el diagnóstico del tejido-edificio-sistema energético a regenerar deberá incluir al menos un análisis de los siguientes puntos:

- condiciones ambientales exteriores y del medio físico en el que se inserta -incluyéndose en las mismas las condiciones microclimáticas generadas por el propio tejido urbano- e incidencia de las mismas en la habitabilidad y el confort a lo largo de los diferentes ciclos climáticos estacionales y diarios,
- identificación de la unidad energética y de la escala de actuación prevista y posible,
- adecuación de la unidad energética a las condiciones de confort energético (iluminación, climatización, ACS, renovación del aire,...) y percepción de dichas condiciones por los usuarios del sistema,
- demanda energética vinculada a los diferentes usos desarrollados y previstos (relación, producción y

actividad) y transporte necesario para el desarrollo de los mismos,

- respuesta del sistema energético frente a la demanda: subsistemas activos, elementos de modulación pasivos y dinámicos y sistemas de regulación.

El análisis en las diferentes escalas mostrará diferentes carencias y fortalezas frente a estos parámetros, requiriendo diferentes tipos de actuación. Este análisis, cuya pretensión es determinar la “bondad” o “maldad” energética del edificio, puede abordarse, en función de los requerimientos y de la información de la que se disponga, tanto cuantitativamente como cualitativamente.

El **análisis cualitativo** busca el entendimiento del funcionamiento de las piezas del edificio (subsistemas energéticos) y de las posibilidades de acoplamiento entre las mismas para generar un comportamiento global del sistema asociado al confort del usuario. En este modo de análisis, cobran especial importancia los mecanismos de regulación, ya que permiten el manejo de la dinámica higrotérmica del edificio de forma acoplada con las dinámicas higrotérmicas del ambiente exterior y con las necesidades de los usuarios.

El **análisis cuantitativo** arroja cifras tanto parciales como globales relacionadas con la demanda energética del edificio: identifica las características energéticas de los subsistemas para, mediante cálculos de diversa complejidad, establecer la demanda energética específica por usos, la demanda energética global y las emisiones de CO₂ asociadas a la producción y consumo de la energía utilizada en la gestión del confort de los espacios. Este segundo análisis está unido, de acuerdo con la normativa actual, a la evaluación del cumplimiento de valores mínimos de consumo y emisiones en los subsistemas más relevantes del edificio y al establecimiento de valores límite para los subsistemas energéticos.

Entre ambos modos de diagnóstico, el cualitativo y el cuantitativo, existen grandes diferencias. El acoplamiento entre ambos y la selección de los mismos por parte del técnico rehabilitador en función de los resultados esperados y de los mecanismos de que se dispone es un elemento clave del diagnóstico, primándose uno u otro desde una consideración real de su carácter de herramientas que “ayudan” al diseño pero no lo sustituyen.

Podría parecer que el análisis cuantitativo, mediante el uso de herramientas informáticas de simulación de la transferencia energética, resultará siempre más preciso en una rehabilitación, ya que disponemos de un menor grado de libertad en la actuación al enfrentarnos a un hecho construido. Es solo parcialmente así, ya que estas herramientas simulan la respuesta frente a las condiciones ambientales exteriores (radiación solar, temperatura, viento y humedad) determinadas por una serie climática (TMY o Año Meteorológico Tipo¹) reduciendo a un rango de

valores sencillo algunos de los sistemas de modulación y regulación del edificio más complejos y a la vez más eficaces, tales como la inercia térmica o las estrategias de ventilación. Esta simplificación, necesaria para una evaluación tan compleja como es la respuesta del edificio frente al ambiente exterior hora a hora, deja sin embargo a un lado la posibilidad de evaluar los sistemas de regulación del edificio frente a condiciones ambientales específicas, tan habituales dentro del uso de la arquitectura habitacional.

En rehabilitación, la comprensión de las posibilidades de control de la luz, el aire y el calor a través de la modulación en los elementos de regulación y paso de los mismos resulta clave a la hora de posibilitar una respuesta adecuada del edificio frente a condiciones climáticas tanto cíclicas como puntuales.

Las alteraciones no cíclicas de las variables climáticas, que, lamentablemente, van aumentando exponencialmente en asociación con el actual proceso de cambio climático (olas de frío y calor desvinculadas de los ciclos climáticos, tormentas de viento, tornados, granizo, variaciones en la composición atmosférica que repercuten en la incidencia de la radiación solar...), junto con el progresivo aumento de la temperatura y variaciones en otros parámetros que conlleva este proceso, requieren una mayor consideración en el diagnóstico previo a la rehabilitación energética que la actual, en la que la cuantificación de la demanda se establece en base a Años Meteorológicos Tipo generados con valores medios históricos.

De otra forma, se podría producir la paradoja de un edificio “rehabilitado energéticamente” que tiene un mayor consumo que antes de su rehabilitación.

Se incluyen en la Tabla 1 algunas de las medidas adaptativas a los fenómenos asociados al cambio climático que es necesario considerar en la rehabilitación energética de los sistemas activos y pasivos de la edificación.

De ahí la necesidad de incorporar en el diagnóstico no solamente los datos cuantitativos proporcionados por las herramientas de simulación energética, sino también los resultados del análisis de los mecanismos de funcionamiento bioclimáticos del edificio, especialmente de aquellos que permiten respuestas frente a situaciones puntuales sin consumo energético añadido.

El diagnóstico deberá, pues, considerar la situación de partida y las posibilidades de actuación para fomentar las siguientes estrategias:

- Captación y conservación de recursos energéticos del entorno inmediato cuando estos están disponibles (radiación solar, viento) en función del ciclo del clima y necesidades energéticas interiores.
- Almacenamiento y conservación de los recursos energéticos captados para su aprovechamiento a lo largo de todo el período de uso de la edificación.

¹ Un Año Meteorológico Tipo (TMY) es una serie de datos climáticos horarios para un determinado lugar que se generan en base a los valores

medios que pueden ser establecidos para una serie de datos anuales medidos durante un largo periodo de tiempo.

- Potenciación de la eficiencia del sistema energético mediante la incorporación de elementos de regulación que permitan modular el intercambio energético entre el edificio y el exterior de forma ajustada a las variaciones cíclicas y no cíclicas de las condiciones ambientales exteriores estacionales y diarias.

sino del análisis de sus posibilidades de respuesta frente a condiciones climáticas cambiantes, con el objeto de fomentar aquellas estrategias estáticas compatibles en los ciclos infracalentado y sobrecalentado o bien de carácter dinámico y, por lo tanto, regulable en la rehabilitación de los elementos de la envolvente.

El diagnóstico requiere no solo del análisis de la respuesta del edificio en los diferentes ciclos climáticos,

Tabla 1

Modificaciones en los factores climáticos derivadas del calentamiento global, repercusiones en la edificación y medidas adaptativas posibles.

| Factor climático | Modificación | Repercusión en edificación | Medidas adaptativas |
|------------------------|---|---|--|
| Temperatura | ↑ valores | Elementos de la envolvente | Elementos de protección solar Ajuste dimensionado acristalamiento Ajuste transmitancia térmica elementos |
| | ↑ duración estival | Sistemas de acondicionamiento higrotérmico | Ventilación Sistemas tratamiento de aire |
| Precipitaciones | ↑ intensidad lluvias | Elementos de la envolvente en contacto con exterior y con el terreno | Prevención agua y humedad Impermeabilización y drenaje |
| | ↑ ↑ fenómenos puntuales de tormentas de granizo | Elementos de la envolvente en contacto con exterior | Aumento resistencia a impacto |
| Viento | ↑ corto plazo masas nieve húmeda | Elementos de la envolvente en contacto con exterior | Aumento resistencia elementos cubierta |
| | ↑ fenómenos puntuales de tormentas viento intenso Tornados | Elementos de la envolvente en contacto con exterior Instalaciones en contacto con exterior | Aumento resistencia elementos y ajuste sistemas anclaje |
| Humedad | ↑ de la humedad | Elementos de la envolvente sensibles a la humedad | Protección estructural Ajuste de condensaciones |
| | ↓ temperatura invernal | Sistemas acondicionamiento térmico | Ventilación Modificación bases actuación sistemas |
| Radiación | ↑ estival | Elementos de la envolvente | Aumento resistencia |

2.1.1. El ciclo invernal

Durante el invierno las condiciones medias y generales de las temperaturas exteriores son inferiores a las de confort, por lo que se le denomina “periodo infracalentado” aun cuando se puedan producir situaciones puntuales en las que las temperaturas son adecuadas o incluso excesivas para el confort humano.

A lo largo de este periodo, en el que es necesario aportar calor en el interior de los espacios habitados para alcanzar condiciones de confort, el sol es la única fuente energética gratuita de aportación de calor desde el exterior, si bien solo está disponible a lo largo del ciclo diurno.

El diagnóstico previo a la rehabilitación energética requiere, pues, conocer las posibilidades de **ganancia térmica** derivadas de la aportación energética solar, tanto en sus valores teóricos como en sus valores reales en el edificio objeto de rehabilitación.

Los valores estimados en las series climáticas, de carácter teórico, sufren diversas modificaciones debido a los obstáculos ciertos y posibles al aprovechamiento de esta energía: a las obstrucciones de carácter discontinuo y muchas veces imprevisible generadas por los obstáculos

climáticos y por la turbiedad atmosférica producida por la contaminación en entornos urbanos hay que añadir, dentro del entorno construido, la existencia de obstáculos solares cuantificables y previsibles producidos por la geometría del entorno sobre el edificio o unidad energética objeto de actuación.

La incidencia del entorno sobre la duración del recorrido solar a lo largo de cada periodo del año puede ser calculada tanto por métodos gráficos (cartas solares) como por métodos numéricos basados en la geometría solar o mediante herramientas informáticas.

Estas últimas no solo estiman la incidencia de los obstáculos en la duración del recorrido solar sobre el edificio, sino también la influencia que esta situación tiene en la potencia de la radiación solar incidente y aprovechable en el mismo, si bien muchas veces resulta complejo establecer la geometría de los obstáculos que afectan al edificio en la rehabilitación energética de edificios en entornos urbanos, dada la diversidad de las mismas.

La evolución de la mayoría de los tejidos urbanos ha llevado a un fuerte grado de “encerramiento” del tejido tradicional de casco histórico, alterando su línea del

horizonte y disminuyendo así el periodo de accesibilidad solar en el interior de la ciudad (ver Fig. 2).

El aprovechamiento de la energía procedente del sol se evalúa, durante el invierno, solo en aquellas orientaciones que, en función del recorrido solar, reciben radiación solar directa invernal térmicamente aprovechable, habitualmente denominadas “orientaciones solares”.

A efectos de **ganancia térmica**, en nuestras latitudes es básicamente aprovechable la radiación incidente en orientación Sur y en elementos horizontales durante este periodo, si bien en el análisis es necesario evaluar la

accesibilidad solar de forma conjunta con la estimación del periodo infracaletado específica del lugar.

A lo largo de la geografía de la Península Ibérica, los requerimientos y amplitudes de las orientaciones de ganancia son necesariamente distintos dependiendo de los ciclos climáticos generales: el rango cubre desde localidades con predominio de la estación invernal, como es el caso de Burgos (Zona climática E1 de acuerdo con el CTE) hasta aquellas con predominio de la estación estival, como Almería (Zona climática A4 de acuerdo con el CTE).



Fuente: Propia

Fig. 2. Horizonte urbano y cerramiento en la ciudad de Barcelona.

Así, el primer paso a la hora de establecer la potencia energética procedente del sol que es realmente aprovechable en el edificio durante el invierno es la evaluación del recorrido teórico del sol en el lugar (hay que recordar que la geometría solar depende de la latitud del lugar) y el efecto que sobre ese recorrido teórico tienen los obstáculos geométricos del entorno.

A partir de la evaluación de la energía solar incidente en la cara exterior de los cerramientos del edificio, las propiedades de cada uno de los elementos de la envolvente térmica, junto con sus dimensiones, determinarán cuanta energía es susceptible de alcanzar el interior a través de los mismos, y con qué desfase temporal respecto al momento de su incidencia.

Las dimensiones de las ventanas y características energéticas de los acristalamientos determinarán la cantidad de energía que las atraviesa y llega al interior de los espacios de forma directa e inmediata (ganancia directa), mientras que las dimensiones y características inerciales de los opacos determinarán el funcionamiento de su masa térmica. En ambos casos, el punto de partida para la rehabilitación es la identificación de posibles ganancias térmicas a través de la envolvente y la identificación de las masas térmicas y la idoneidad de su funcionamiento como sistemas de **acumulación térmica**.

Las masas del edificio juegan diferentes papeles en la edificación existente durante el invierno: actúan como elemento de modulación térmica tanto en las orientaciones de ganancia solar (estrategias de captación solar indirecta y estrategias de acumulación térmica) como en las orientaciones sin ganancia solar (acumulación térmica y conservación de la energía).

El elemento clave que afecta al diagnóstico y diferencia estas estrategias es la gratuidad energética, medioambiental y económica de la aportación energética de la radiación solar en las orientaciones de ganancia, mientras que en aquellas orientaciones o periodos en los que no existe esta aportación la carga térmica de los elementos opacos puede requerir un consumo energético añadido sin producir condiciones de confort añadidas.

Dadas las diferentes configuraciones y grados de exposición solar invernal de la edificación, no todos los espacios necesitados de acondicionamiento térmico se encuentran situados en orientaciones de ganancia solar: sin la excitación energética solar el edificio acondicionado térmicamente actúa como foco caliente y cede calor al exterior.

La limitación de la transferencia térmica U de los elementos de cerramiento posibilita la **limitación de pérdidas** térmicas y da lugar a una mayor o menor

conservación del calor generado y necesario para el confort de los ocupantes.

Dado que la transmitancia térmica puede ser manejada a través de elementos de regulación, especialmente en huecos (sistemas de aislamiento móviles), el diagnóstico del edificio considerará no solo la transmitancia de los elementos estables o fijos, sino la existencia de dichos sistemas de regulación, estado e idoneidad de los mismos.

En este sentido hay que recordar que *los elementos degradados o afectados por la humedad* no mantienen sus valores de transmitancia térmica teóricos, por lo que resulta imprescindible la identificación y reparación de las patologías asociadas a la misma dentro del proceso de rehabilitación energética.



Fuente: Propia

Fig. 3. Mirador degradado

Por último, la cantidad y distribución de zonas térmicas (espacios con requerimientos energéticos homogéneos), junto con su acceso a energía gratuita acoplado a estos requerimientos, necesita de un análisis pormenorizado en el diagnóstico: la **distribución** del calor captado y almacenado en los espacios solares a todos los espacios habitables, junto con la adecuada renovación de aire de los espacios, son piezas claves en la rehabilitación energética.

Deben evaluarse tanto los mecanismos de intercambio térmico que colaboran a la homogeneización de temperaturas entre diferentes espacios con idénticos requerimientos higrotérmicos (radiación y convección),

como el riesgo de generar temperaturas demasiado elevadas para el confort en los espacios de captación solar durante determinados periodos del día. De nuevo, la adecuación de los canales de ventilación interiores y el correcto aprovechamiento de las masas térmicas juegan un papel clave en la rehabilitación energética.

En resumen, al realizar un diagnóstico del edificio como un sistema energético pasivo invernal hay que valorar cuales de sus elementos pueden actuar como colector y acumulador solar, y en qué grado lo hacen, y cuales acumulan calor por transmisión de calor desde el medio adyacente interior más caliente. En las edificaciones del casco histórico, cuya configuración constructiva se basa en muros de carga de carácter masivo, el papel de acumulador térmico de los mismos resulta especialmente relevante.

2.1.2. El ciclo estival

El verano, en oposición al invierno, es el período del año en el que las condiciones medias de las temperaturas exteriores son inferiores a las de confort, por lo que se le denomina “periodo sobrecalentado” aun cuando se puedan producir situaciones puntuales en las que las temperaturas son adecuadas o incluso insuficientes para el confort humano.

Estas situaciones puntuales se transforman en cíclicas en localidades con clima continental y gran exposición a la radiación solar y al viento, en las que durante la noche “refresca”, con temperaturas sensiblemente inferiores a las de confort, lo que permite su uso en estrategias de refrigeración pasivas.

Durante esta estación, la aportación energética solar no resulta deseable, por lo que se requiere el desarrollo de estrategias de **protección solar** en los elementos de la envolvente térmica del edificio: en esta estación, la ampliación del rango de orientaciones en las que se produce la captación solar y el aumento de la duración horaria de la misma suponen una dificultad añadida.



Fuente: Propia

Fig. 4. Elementos de sombreado tradicionales

La ampliación espacial y temporal de los recorridos solares, debida a la variación en la inclinación de la eclíptica, requiere un nuevo análisis energético de los mismos, complementario al de invierno, en el que se analice la incidencia de los obstáculos geométricos del entorno (medio físico y edificaciones) y de la propia edificación (aleros, sombreados, espesor de muros de fachada,...) en la aportación energética solar.

Al mismo tiempo, el análisis debe considerar los elementos de protección solar regulables de los que dispone la edificación –persianas, toldos, vegetación- y su adecuación al ángulo de radiación solar incidente.

El diagnóstico de la idoneidad de los elementos de sombreado regulables también requiere considerar, en el caso de huecos, la compatibilidad del sistema con otras funciones de los huecos relevantes para el confort y susceptibles de generar un fuerte consumo energético, como la iluminación, la ventilación y la renovación del aire.

Las temperaturas ambientales exteriores, superiores a las de confort durante el ciclo diurno, son responsables de los flujos de calor exterior-interior que potencian el sobrecalentamiento aun cuando se activen todas las estrategias disponibles de protección de la radiación solar directa, ya que se mantiene el intercambio de calor por radiación, convección e infiltración.

La transmisión de calor al interior de los espacios será mayor cuanto mayor sea su transmitancia térmica, por lo que es necesario identificar las posibilidades de ajuste de

este parámetro de forma compatible con el uso de la masa térmica previsto durante el ciclo invernal.

A la acumulación térmica no deseada en elementos masivos hay que añadir la penetración de calor en el interior de los espacios debido a infiltraciones: rendijas entre los elementos de la envolvente, huecos de paso... El nivel de infiltraciones es mayor cuanto menor es el grado de mantenimiento de los edificios, especialmente el de sus carpinterías.

La incidencia de este efecto es especialmente notable en entornos urbanos consolidados de alta densidad, donde las masas térmicas de los elementos de la epidermis urbana, junto con la escasez de terreno natural y la menor renovación de aire debido al encerramiento generan condiciones microclimáticas específicas con temperaturas superiores a las de su entorno y humedades inferiores.

Un adecuado balance energético estival requiere la evacuación del calor transmitido al interior de los espacios a lo largo del ciclo diario, al que hay que añadir las aportaciones térmicas o ganancias internas derivadas de su uso (actividad metabólica, iluminación y equipos necesarios para el desarrollo de la actividad prevista), que adquieran un peso variable en el balance energético de verano en función del tipo de uso del edificio.

A modo de ejemplo de la diferente carga térmica que pueden implicar las ganancias internas durante el periodo estival en función de la actividad desarrollada, en el sector residencial éstas se establecen, como valor medio, en el entorno de 5 W/m^2 , mientras que en salas de conferencias o de espectáculos, estas ganancias pueden alcanzar valores de 100 W/m^2 .

El calor que se genera en el interior de la edificación por cualquiera de los mecanismos anteriores requiere ser evacuado cuando las condiciones ambientales exteriores lo permitan. Las estrategias de **evacuación** del calor almacenado, o **refrigeración**, implican invertir la dirección del flujo, buscando aquellos focos fríos o sumideros de calor que faciliten el desarrollo de flujos energéticos desde el edificio hacia el exterior.

El análisis de los sumideros de calor naturales disponibles –bóveda celeste o firmamento, ambiente nocturno exterior y terreno-, que tienen una mayor o menor efectividad en función de las condiciones climáticas exteriores, es clave para el diagnóstico, en el que deben considerarse las diferentes escalas de las que forma parte el sistema energético del edificio. En ambientes en los que existe un salto térmico grande entre el día y la noche, la combinación del enfriamiento radiativo a la bóveda celeste y la ventilación nocturna permiten el “vaciado” del calor almacenado en los edificios a lo largo del ciclo diario.

El aprovechamiento de la **disipación de calor por alta masa térmica** supone un punto intermedio entre los sistemas de protección y de evacuación, ya que implica el retraso de la llegada de calor al interior de la edificación a través de los elementos de cerramiento opacos hasta el momento en el que los sumideros ambientales naturales sean operativos.

Las arquitecturas tradicionales de climas cálidos y secos, en las que se produce un gran salto térmico entre el día y la noche, son una clara demostración de este mecanismo, en el que se modula la masa térmica para retrasar la llegada del calor al interior de los espacios y se aprovechan las bajas temperaturas de la noche y del amanecer para enfriar el edificio.

Esta estrategia requiere, pues, del conocimiento de dos factores: el desfase horario en la llegada del calor al interior -condicionado por la composición y espesor de los cerramientos-, y las posibilidades de enfriamiento pasivas a partir de ese momento derivadas de la existencia y aprovechamiento de los sumideros de calor naturales.

Por otro lado, el diagnóstico requiere valorar las posibilidades de tratamiento del aire exterior para reducir su temperatura (refrigeración evaporativa, refrigeración a través del terreno) y para su posterior introducción en los espacios a acondicionar garantizando la calidad del aire.

En este sentido, hay que recordar que las posibilidades de refrigeración evaporativa disminuyen a medida que aumenta la humedad ambiental, por lo que su uso está limitado en climas cálidos y húmedos.

Por último, en el análisis del funcionamiento del edificio, es necesario evaluar la incidencia de su distribución interior y de los elementos de entrada y salida de aire en la definición de canales interiores de **ventilación** en condiciones de confort, manteniendo la velocidad del aire dentro de límites admisibles...

En resumen, al realizar un diagnóstico del edificio como un sistema energético pasivo estival hay que valorar no solo cuales de sus elementos pueden actuar como sistemas de protección solar, y en qué grado lo hacen, sino cuales pueden incorporarse en las estrategias de evacuación del calor almacenado y cuáles son los sumideros de calor naturales susceptibles de ser utilizados. La evaluación de la masa térmica en muros de carga de carácter masivo durante este periodo implica el análisis conjunto de los parámetros anteriores.

3. Las escalas y el entorno. Tipo urbano, edificatorio y constructivo

Si bien es la singularidad de cada edificio o espacio -características energéticas ligadas a la geometría y a los sistemas constructivos- la que determina su respuesta a las condiciones ambientales exteriores, la evaluación del comportamiento global del edificio requiere analizar, de forma previa, si puede ser leído como un sistema energético independiente o bien forma parte de otro más complejo y de mayores dimensiones.

El comportamiento energético de un edificio en contacto directo con otros, bien sea a través de sus elementos de cerramiento o a través de canales de ventilación y renovación del aire compartidos (patios), está fuertemente marcado tanto por estos sistemas de contacto como por las condiciones microclimáticas específicas generadas por el conjunto.

Los diferentes modos de conexión e interacción entre las piezas del edificio y su entorno nos permiten realizar una primera aproximación al diagnóstico mediante el análisis del tejido construido en el que se inserta el edificio y la identificación del “tipo energético” al que pertenece.

¿Qué es un tipo energético?

Ajustándose a la definición de la RAE, tipología es “el estudio y clasificación de tipos que se practica en diversas ciencias”

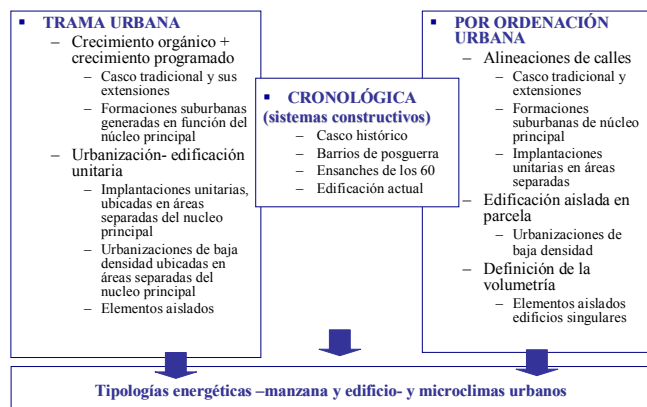
En la edificación, con carácter general, los tipos edificatorios se refieren a todas aquellas arquitecturas que han sido tipificadas a lo largo de la historia bajo unos parámetros comunes, sucesivamente repetidos en su contexto geográfico y cultural.

Según Esteban [1]:

“los edificios que se construyen en la ciudad tienen unas características que resultan de su destino, de los procedimientos constructivos del momento y también de factores culturales de la población. La síntesis de estas características da lugar a edificios que sin variar los elementos fundamentales de su composición y forma, se repiten numerosas veces en la ciudad: son lo que se reconocen como “tipos edificatorios”.

La consolidación de estos tipos edificatorios, junto con las distintas estrategias de aprovechamiento del territorio desarrolladas a lo largo de la historia definen la forma volumétrica final de lo urbano conformada a lo largo de siglos, generándose áreas homogéneas y/o heterogéneas, así como marcadas zonas de frontera derivadas de la evolución en las tecnologías, los cambios en las estructuras de poder, y la modificación en el papel de lo urbano en el territorio.

La lectura energética busca, en las diferentes escalas de actuación (ciudad, barrio, manzana, edificio, espacio a acondicionar), patrones homogéneos de comportamiento energético que permitan definir “tipologías energéticas” urbanas, edificatorias y constructivas: los factores extrínsecos (clima, medio físico y entorno) e intrínsecos (forma, volumen, posición y composición) interactúan creando sistemas tipológicos básicos y generando condiciones microclimáticas e higrotérmicas específicas tanto en espacios interiores como en espacios exteriores que resulta clave conocer a lo largo de las distintas fases del proceso de rehabilitación energética.



Fuente: Propia

Fig. 5. Esquema de interrelación de factores urbanos en la definición de tipos energéticos.

3.1. Morfologías urbanas en la rehabilitación energética

Atendiendo a la volumetría urbana, la primera y más general de las escalas del análisis se refiere a la compacidad de la trama urbana, y a su correspondencia con el modelo de ciudad difusa o de ciudad compacta.

El modelo de *ciudad difusa*, caracterizada por la ocupación extensiva del territorio tiene, desde la óptica de la eficiencia en el uso de la energía y los recursos, una serie de puntos débiles:

- La densidad de ocupación es baja, con predominio de edificios exentos de baja compacidad asociados a la baja densidad. La exposición de los volúmenes a fenómenos climáticos y el área de intercambio térmico del edificio con el exterior son altos, por lo que su respuesta frente a las variaciones de temperatura exteriores depende del efecto de barrera térmica de los cerramientos.
- La ocupación extensiva del territorio requiere grandes infraestructuras de transporte de flujos de energía, materiales y personas, potencia la zonificación por usos y genera la desaparición del espacio público multifuncional y la limitación de la calidad de vida de la ciudadanía.

En este modelo de ciudad, la rehabilitación energética está asociada tanto a la actuación en la envolvente térmica de los edificios como a la creación de espacios comunitarios y de usos múltiples que permitan la reducción de los consumos energéticos asociados a los flujos horizontales de energía, materiales y personas.



Fuente: Frank Lloyd Wright Foundation

Fig. 6. La ciudad difusa ideal. Maqueta de Broadacre City.

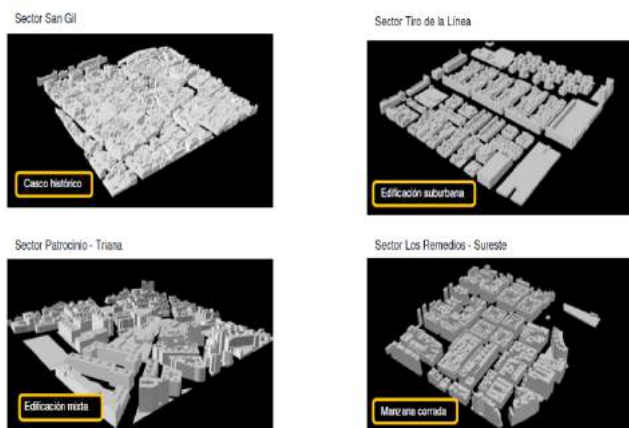
La *ciudad compacta*, por el contrario, se caracteriza por la utilización intensiva del territorio y los recursos, lo que conlleva una serie de ventajas desde el punto de vista de la eficiencia energética:

- La densidad de edificación es media o alta, aumentando la compacidad de la edificación y, en consecuencia, reduciéndose su intercambio térmico con el exterior. Los edificios forman parte de un sistema más grande, la manzana.
- La ocupación intensiva del territorio reduce las infraestructuras de transporte de flujos de energía, materiales y personas.

En este modelo de ciudad, la rehabilitación energética de la edificación está asociada a la actuación en la envolvente térmica de los edificios, así como a la recuperación y mejora de sus sistemas de intercambio energético con el exterior, sean estos propios o compartidos con otros espacios. En espacios exteriores, el objetivo es múltiple: ampliar el periodo de funcionamiento en condiciones de confort, mantener y fomentar la diversidad de usos y fomentar la escala humana en las actuaciones propuestas. Todos estos objetivos requieren de niveles adecuados de la calidad del aire exterior, por lo que todas las estrategias de rehabilitación y regeneración urbana tienen que considerar su control y mejora.

La ciudad actual puede considerarse como una mezcla heterogénea de ambos modelos, debido a los diferentes procesos de crecimiento orgánico y planificado que se han desarrollado en ellas a través del tiempo: casco histórico, crecimientos planificados, crecimientos espontáneos...

Es, por lo tanto, en una segunda escala de análisis en la que las diferentes morfologías urbanas determinan las condiciones microclimáticas de su entorno, así como las de las zonas de frontera entre ellas.



Fuente: PGOU Sevilla

Fig. 7. Diferentes morfologías urbanas de la ciudad de Sevilla en función de su compacidad.

La aproximación cualitativa a la rehabilitación y la regeneración urbanas en el tejido urbano consolidado, requiere, para el diagnóstico de su problemática energética y el análisis de sus flujos de energía y masa, distinguir los tipos de formaciones urbanas que son resultado de diferentes procesos y que, por establecer distintas relaciones bioclimáticas con su entorno, han de ser consideradas separadamente en la definición de estrategias de eficiencia energética en el tejido edificatorio.

Estos tipos básicos pueden ser caracterizados, además de por su configuración formal, por sus condiciones microclimáticas en temperaturas y humedades y por su accesibilidad a los fenómenos climáticos fundamentales; la radiación y el viento.

3.1.1. Casco tradicional y áreas suburbanas

Los trazados urbanos del casco tradicional y las extensiones del mismo, creados por la superposición de los sucesivos trazados históricos y la intersección entre ellos varían en función de distintos parámetros: clima, condiciones geográficas y topográficas, episodios históricos...

Sin embargo, el modelo constituido por manzanas cerradas con patios interiores, con trazado viario jerarquizado y geometría variable, puede considerarse representativo del centro de una gran cantidad de ciudades de clima mediterráneo de tipo continental, marítimo y montañoso.

El edificio, entre medianeras, está vinculado a la estructura de manzana a través de sus elementos de

cerramiento y, en ocasiones, a través de componentes de paso de ventilación e iluminación compartidos.

Se trata, en general, de un sistema microclimático compacto, del que quedan excluidos los fenómenos generales de viento. Se trata, en general, de un sistema microclimático compacto, del que quedan excluidos los fenómenos

generales de viento con características muy marcadas (ver Tabla) en temperaturas, radiación, viento y humedad.

La baja permeabilidad de la epidermis urbana y el mínimo porcentaje de espacios verdes generan un nivel de escorrentía natural y una influencia higrométrica mínimos.

Respecto a la radiación solar, las dimensiones y orientación de las vías sobre las que se apoya la edificación, junto con las características termofísicas de la

epidermis urbana determinan el nivel de accesibilidad solar y las posibilidades de aprovechamiento de la misma.

Este tipo de morfología urbana se produce también en áreas suburbanas compactadas linealmente en torno al viario, aunque de manera general las direcciones de viento en esta morfología están menos condicionadas por las obstrucciones eólicas urbanas.

Tabla 2

Microclima de casco tradicional. Variaciones en las variables climáticas respecto a las de entornos naturales

| VARIABLE CLIMÁTICA | PARÁMETRO | MODIFICACIÓN |
|----------------------|--------------------------------|------------------------|
| RADIACIÓN | Solar global | Disminución del 15-20% |
| | Ultravioleta en invierno | Disminución del 30% |
| | Duración de la luz solar | Disminución del 5-15% |
| TEMPERATURA | Promedio de la mínima invernal | Aumento de 1-2°C |
| | Días de grado de calentamiento | Disminución del 10% |
| VELOCIDAD DEL VIENTO | Media anual | Disminución del 20-30% |
| | Número de días de calma | Aumento del 5-20% |
| NIEBLA | Invierno | Aumento del 100% |
| | Verano | Aumento del 30% |
| PRECIPITACIÓN | Total | Aumento del 5-10% |
| | Días con más de 5 mm | Aumento del 10% |

La rehabilitación energética requiere, tal y como se ha mencionado en el apartado dedicado al diagnóstico energético, un análisis específico de accesibilidad solar en los diferentes ciclos estacionales.

La alta compacidad y el grado de encerramiento de este tejido urbano implican menores saltos térmicos día-noche que los de su entorno y dificultades de aprovechamiento de los sumideros naturales de calor durante el verano mediante enfriamiento radiativo, por lo que una de las actuaciones más efectivas será el ajuste de las condiciones microclimáticas mediante la refrigeración evaporativa y/o el uso del terreno en estrategias de pretratamiento del aire.

3.1.2. Operaciones unitarias. Urbanizaciones densidad baja y media en horizontal y en altura

Este tipo de morfología urbana se caracteriza, desde la óptica energética y microclimática, por una mayor accesibilidad solar, debido al aumento en la relación ancho de vía-altura de la edificación.

La existencia de vegetación y de suelo no urbanizado o altamente permeable en su entorno aumentan el nivel de escorrentía natural, produciéndose una influencia higrométrica no despreciable en el microclima: el efecto evaporativo y termorregulador de la vegetación, el terreno natural y las láminas de agua hacen que las temperaturas

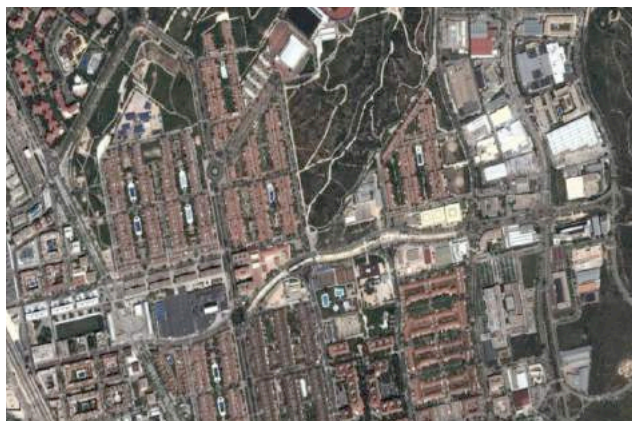
sean menores que en el centro de la ciudad y las humedades relativas mayores.

Corresponden a esta tipología densidades de edificación medias y bajas con diferentes configuraciones volumétricas. Dependiendo de su grado de exposición a la radiación solar y a fenómenos de viento, la edificación requiere diferentes procesos de rehabilitación energética.

Se trata de la morfología urbana de menor compacidad, por lo que las características energéticas de la envolvente del edificio son cruciales a la hora de realizar un diagnóstico energético y proponer medidas de mejora.

En urbanizaciones de baja densidad de carácter horizontal, la escasa altura de la edificación y la existencia de arbolado en viario limitan la exposición eólica de los edificios, así como la incomodidad térmica generada por turbulencias eólicas en espacios exteriores.

La configuración volumétrica del edificio varía desde la edificación exenta hasta el edificio entre medianeras o la vivienda plurifamiliar de densidad baja. Excepto en casos como el de algunas configuraciones de viviendas unifamiliares en hilera, los componentes de paso de ventilación e iluminación son independientes para cada edificio.



Fuente: Google Maps

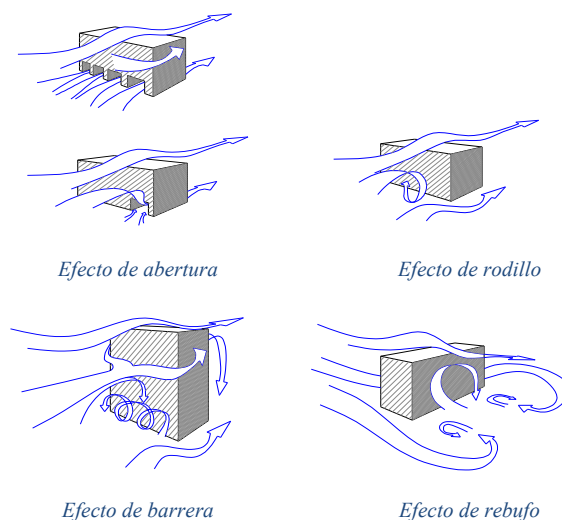
Fig. 8. Foto aérea del municipio de Tres Cantos (Madrid).

En el tejido urbano conformado por edificaciones en altura coexisten las bajas densidades y las densidades medias, si bien son más habituales estas últimas.

En su caracterización microclimática y energética es necesario valorar, además de las modificaciones en temperaturas y humedades, una serie de parámetros que condicionarán diferentes actuaciones de rehabilitación en un mismo edificio:

- accesibilidad solar de la unidad energética,
- grado de exposición a los fenómenos de viento debidos a su configuración volumétrica y a su situación topográfica,
- configuración formal y volumétrica y características de sus áreas de frontera con otras morfologías urbanas,
- características termofísicas de la epidermis urbana y porcentaje de elementos de regulación higrotérmica en espacios abiertos y viarios.

En este tejido urbano, el diagnóstico debe considerar tanto la transferencia térmica de los elementos de cerramiento como el aumento del intercambio convectivo derivado de la presión eólica en las caras de barlovento de la edificación y, en ocasiones, también en la cara de sotavento debido al efecto de rebufo.



Fuente: Granados, H. "Principios de eficiencia energética en la arquitectura y el urbanismo" [2]

Fig. 9. Efectos del viento en la edificación en altura

La velocidad del viento y características del mismo en temperaturas y humedad deben ser consideradas en el análisis de los elementos de permeabilidad al mismo de la edificación y su posible colaboración en estrategias de ventilación y renovación del aire en condiciones de confort.

En esta tipología, los huecos juegan un papel clave en la rehabilitación energética: estanqueidad, control de flujos de aire (la presión eólica aumenta con la altura), transmitancia térmica del sistema ventana y sistemas de regulación de la misma...

3.2. Tipologías volumétricas de la edificación y rehabilitación energética

La ordenación volumétrica de la edificación permite definir dos tipos básicos para su lectura energética; volúmenes adosados con comportamientos energéticos homogéneos o heterogéneos y volúmenes aislados.

El tipo volumétrico adosado es característico de diferentes morfologías urbanas: casco, casco periurbano y/o alguna urbanización de baja densidad conformada por viviendas unifamiliares.

En el caso de que la unidad energética sea solo una parte de la edificación, como es el caso de los edificios de vivienda plurifamiliar, también podrá entenderse la misma como correspondiente al tipo de volumetría adosada: algunos de sus elementos de cerramiento están en contacto con el exterior mientras que otros actúan como medianerías adiabáticas (sin transferencia energética) en contacto con otros espacios con idénticas temperaturas de consigna, o bien como cerramientos en contacto con espacios no acondicionados.

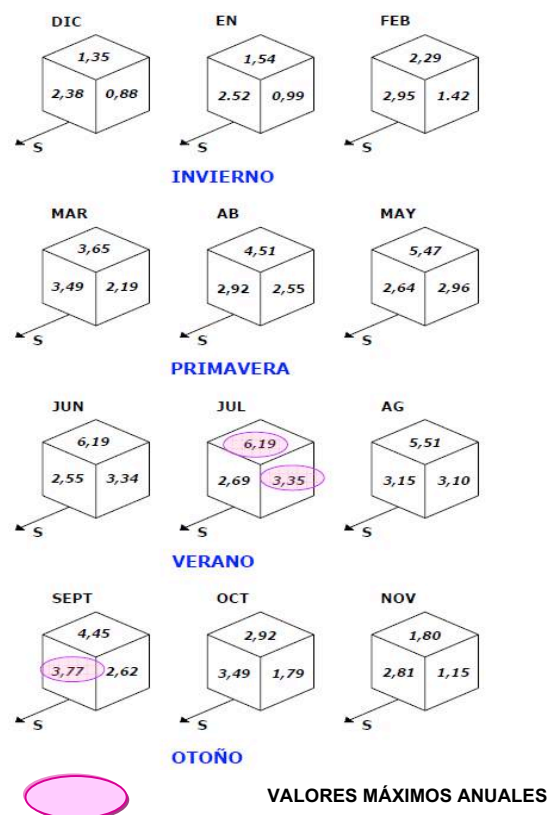
En esta tipología, de cara al aprovechamiento o protección de las condiciones ambientales exteriores, son

relevantes para el análisis tanto el porcentaje de la envolvente térmica con accesibilidad solar y aportación térmica solar gratuita -y su participación en el balance energético- en las diferentes orientaciones como la organización interior de los volúmenes y su conexión con los espacios exteriores para la renovación de aire y la ventilación.

En este sentido hay que recordar la diferente potencia de la radiación solar en las distintas orientaciones de ganancia térmica y en el plano horizontal o planos inclinados de cubierta durante el invierno (periodo infracalentado) y el verano (periodo sobrecalentado) en latitudes medias:

- El cerramiento que más energía solar recibe durante el invierno es la fachada Sur
- El cerramiento que más energía solar recibe durante el verano es la cubierta
- Las fachadas Este y Oeste reciben más del doble de energía solar durante el verano que durante el invierno
- Las fachadas Sureste y Suroeste reciben una cantidad de energía solar similar durante el verano y el invierno
- La fachada Norte recibe una cantidad mínima de energía solar directa durante el verano.

Se recogen en la figura siguiente valores de radiación media diaria para diferentes orientaciones a lo largo del año en Pamplona.



Fuente: Propia

Fig. 10. Valores medios mensuales de radiación media diaria por orientación (kWh/m².día) en Pamplona.

Respecto a la organización de los volúmenes, la homogeneidad térmica, la calidad del aire interior y su adecuación a condiciones de confort dependen de las estrategias de movimiento del aire en el interior de los espacios en función de gradientes de presión, temperatura y humedad. En esta configuración volumétrica, el patio juega un papel clave en dichas estrategias, por lo que su funcionamiento como máquina térmica requiere un análisis específico.

La segunda configuración volumétrica a considerar es la correspondiente a la edificación exenta, con todas sus fachadas en contacto con el exterior.

En esta configuración, tal y como se ha descrito en las escalas anteriores de actuación, las características de la envolvente térmica tienen un mayor peso en la demanda térmica del edificio, tanto en estrategias de aprovechamiento de la aportación energética solar como en estrategias conservativas. Al tratarse de edificios multiorientados, la aportación energética solar está garantizada siempre que los volúmenes del entorno no constituyan obstáculos a la radiación.

Corresponden a esta volumetría las morfologías urbanas de densidades baja y media: ciudad jardín con unifamiliares exentas, bloques y torres. En esta tipología se producen usos más variados que en la volumetría adosada, coexistiendo edificios destinados a vivienda, terciario o dotacional.

En el caso de que se trate de edificios con diferentes usuarios, la tipología energética corresponderá a la volumetría adosada, en la que la envolvente térmica incluye cerramientos adiabáticos y/o en contacto con espacios no acondicionados.

En ambas tipologías volumétricas es necesario analizar de forma especial la contribución a la demanda energética de la cubierta durante los diferentes ciclos climáticos considerando la unidad energética a la que "envuelve".

El patio juega, dentro de las tipologías volumétricas descritas, diferentes papeles en función de sus dimensiones y de la relación con los espacios de habitación; desde el patio de manzana, de grandes dimensiones, que operativamente actúa como fachada del edificio, pasando por patios cerrados con diferentes niveles de accesibilidad solar, hasta los patinillos de ventilación donde el patio juega un mero papel de chimenea, en muchos casos de tiro insuficiente para garantizar la necesaria renovación del aire en los espacios de habitación.

Dentro de la arquitectura tradicional, la organización espacial, basada en la jerarquización de los espacios priorizando los usos de estancia diurna a fachada, traslada los espacios de servicio al área de patio (locales húmedos y habitaciones de servicio), generándose en múltiples ocasiones espacios de uso diurno sin iluminación natural en las plantas inferiores de la edificación.

Esta configuración se hereda, en muchas ocasiones, en la edificación de épocas posteriores en espacios urbanos consolidados, generando condiciones de habitabilidad insuficientes y aumento en el consumo energético para climatización e iluminación debido al aumento del número de plantas a las que sirve el patio.

El patio es una pieza clave en las estrategias pasivas de movimiento de aire en el interior de los espacios, por lo que deben ser analizadas sus características volumétricas y su funcionamiento como “máquina térmica” que garantiza la renovación de aire interior para cada edificio y ciclo climático.

Para entender el mecanismo del patio como máquina térmica, hay que recordar que el movimiento entre masas de aire se produce por la diferencia de presión entre las mismas, bien debido a efectos térmicos o a la influencia del viento:

- diferencia de temperaturas.- diferenciales de densidad que tienden a equilibrarse mediante el transporte de masas de aire desde zonas con sobrepresión hasta zonas depresionarias. Corresponden a este tipo de ventilación el efecto chimenea, la ventilación adiabática, la ventilación simple y, en menor medida, la ventilación cruzada y las infiltraciones.
- diferencia de presión generada por el viento.- derivada de la acción del viento sobre la envolvente del edificio que genera variaciones de presión en su entorno adyacente, induciendo diferencias de presión (positivas o negativas) que activan la circulación del aire entre aberturas. La distribución de estas presiones positivas o negativas depende de la forma del edificio, de su entorno y de la dirección e intensidad del viento.

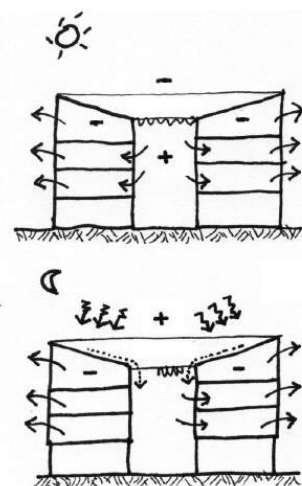
En función de la geometría de los patios y de las características térmicas y de presión de las masas de aire que lo atraviesan, pueden distinguirse dos tipos de patio: el patio captador de aire frío y el patio extractor de aire caliente [3].

• Patio “captador” de aire frío

El patio actúa como reservorio del aire frío nocturno, que desciende a su parte baja y permanece confinado hasta que se produce su distribución en el edificio o el aumento de su temperatura y, en consecuencia, su ascensión.

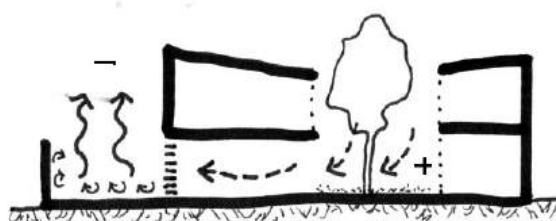
El calentamiento diurno queda limitado por una configuración volumétrica en la que la altura del patio predomina en relación a su superficie en planta (patios predominantemente sombreados durante el ciclo diurno).

La utilización de este tipo de patios en estrategias de refrigeración requiere grandes diferencias de temperatura entre el día y la noche, correspondiendo por tanto a localizaciones con un fuerte enfriamiento radiativo a la bóveda celeste (climas con veranos cálidos y secos).



Fuente: Velasco, L. Tesis doctoral “El movimiento del aire como condicionante del diseño arquitectónico” Universidad Politécnica de Cataluña (2006)

Fig. 11. Patio captador de aire frío.



Fuente: Velasco, L. Tesis doctoral “El movimiento del aire como condicionante del diseño arquitectónico” Universidad Politécnica de Cataluña (2006)

Fig. 12. Patio extractor de aire caliente.

• Patio “extractor” de aire caliente

Su funcionamiento es opuesto al del patio captador de aire frío, ya que se basa en el sobrecalentamiento del aire por acumulación en la masa térmica de los elementos que conforman el volumen del patio (paredes y suelo).

Consecuentemente, para garantizar el soleamiento, en su configuración volumétrica predomina su superficie en planta en relación a la altura del patio (patios predominantemente soleados durante el ciclo diurno).

La corriente ascendente de aire caliente succiona el aire de las estancias abiertas al patio. Para permitir la extracción, es necesario garantizar el aporte de aire en la parte inferior del patio mediante una conexión con el exterior, bien a través de espacios privativos o a través de espacios comunes, fácilmente regulable.

La combinación de estos dos tipos de patio es característica de la arquitectura tradicional en climas

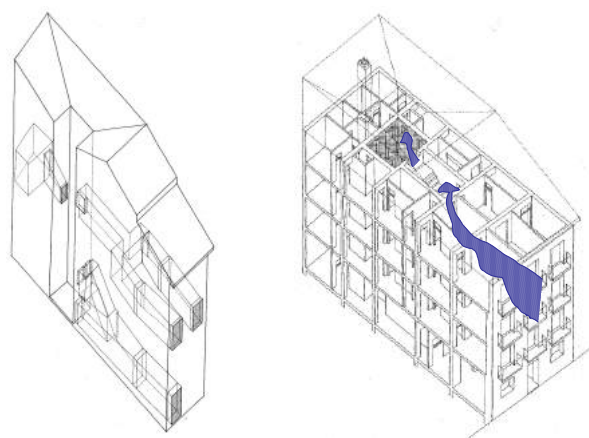
cálido-áridos. Pueden encontrarse bellísimos ejemplos de este tipo de patios en la arquitectura árabe de los países mediterráneos.



Fuente: Patronato de la Alhambra)

Fig. 13. Palacio Árabe de la Alhambra.

En la arquitectura “tradicional” de casco urbano, el patio permite la iluminación y la ventilación de espacios habitables en edificios entre medianeras en solares de grandes fondos. Su funcionamiento como máquina térmica se basa en su actuación como patio “captor” o “extractor” que articula las estrategias de ventilación cruzada de espacios privativos y espacios comunes.



Fuente: Antonio Ceresuela Puche “Rehabilitación ambiental con métodos tradicionales”. COAM 1985[4]

Fig. 14. Esquema de estructura de ventilación de edificio tradicional de viviendas urbanas.

En la tipología de vivienda urbana de casco entre medianeras el *sistema portal-escalera-patio* permite la utilización del patio como patio extractor. Durante el *periodo infracalentado*, los humos procedentes de la cocina y el aire confinado en habitaciones vivideras (con

$t_i > t_{\text{patio}}$) facilitan el tiro natural del patio y por lo tanto la ventilación.

Durante el *periodo sobrecalentado* el aire del patio está más caliente ($t_i < t_{\text{patio}}$) potenciándose la evacuación del calor mediante la incorporación de aire a menor temperatura a través del corredor del portal.

A este sistema hay que añadir el *sistema patio-canales interiores de ventilación-fachada*. En este corredor la ventilación se produce por la diferencia de temperatura entre la fachada principal y la fachada de patio (extractor o captor) a la que puede sumarse la *depresión creada por el tiro vertical del patio*, favorecida por las masas de aire caliente producidas en locales húmedos cuando en estos se recurre a estrategias de ventilación directa.

Este efecto es especialmente importante en el binomio “alcoba-gabinete”, estructura habitual en la edificación residencial entre medianeras del Siglo XIX y principios del Siglo XX, en el que la estancia en segundas luces tiene su ventilación condicionada a la existencia de ventilaciones cruzadas.

La incorporación del patio en estrategias de ventilación a través de estos canales necesita de elementos de control del movimiento de aire en la envolvente de la edificación.

Además de los huecos de paso y las ventanas, la arquitectura tradicional dispone de dos elementos de paso característicos:

- montantes superiores practicables sobre las puertas de paso interiores que facilitan a un tiempo la evacuación del calor almacenado en el interior de los espacios, la eliminación de bolsas de aire caliente generadas por la estratificación vertical de temperaturas, y el “vaciado” de los elementos de cerramiento superiores de los espacios, todo ello sin generar velocidades de aire excesivas para el ocupante;
- montantes superiores practicables sobre la puerta de portal que permiten el desarrollo de las estrategias anteriores en espacios comunes y el aporte de aire a menor temperatura que facilite el tiro del patio.

El uso de los mecanismos y canales de ventilación descritos tiene un lugar clave en las estrategias de rehabilitación energética siempre que se garanticen tanto su funcionamiento como la calidad del aire implicado en los procesos.

En patios, es necesario evaluar la presencia de materiales potencialmente peligrosos para la salud del ser humano, tales como tuberías vistas de fibrocemento asociadas al uso de locales húmedos o a la red de evacuación de pluviales. Las primeras actuaciones a desarrollar en la rehabilitación energética deberán garantizar la calidad de aire en este espacio: reparación de elementos degradados, sustitución de aquellos que sean potencialmente peligrosos y ajuste de los sistemas de salida de humos a la normativa vinculante.

La calidad del aire de aportación a través de canales interiores o exteriores también deberá ser evaluada: en ocasiones, la cantidad de sustancias tóxicas derivadas de la contaminación ambiental urbana hace inadecuado el uso de aire sin tratar en estrategias de ventilación pasiva. El uso de sencillos sistemas de regulación y control pasivo, como los montantes practicables descritos y las carpinterías de huecos, permite la utilización de estas estrategias solo cuando resulten operativas en términos energéticos y de calidad del aire.

Será también necesario, desde una óptica puramente energética, la eliminación de aquellos elementos innecesarios que pudieran limitar el flujo ascendente de aire y la mejora de la iluminación natural mediante el ajuste de las propiedades ópticas de los acabados o la incorporación de sistemas específicos de redireccionamiento de la luz a las plantas inferiores.



Fuente: Granados, H. "Rehabilitación energética" [5]

Fig. 15. Huecos de paso en canales de ventilación en la edificación tradicional

El uso de acabados superficiales de mayor reflectividad en opacos puede combinarse con sistemas tales como los tubos de luz o reflectores de luz que capten la luz solar en la parte superior de los patios de luz y la dirijan hacia el interior.

Se incluye en la Fig. 16 un ejemplo este tipo de sistemas: uso de reflectores de luz comercializados combinado con ajuste de las propiedades ópticas de los acabados de patio.

Por último, en las tareas de rehabilitación de patios, si las estrategia anteriores resultaran insuficientes para garantizar su participación en estrategias de ventilación, puede incrementarse su funcionamiento de máquina térmica por diferentes mecanismos: potenciación de su funcionamiento como patio captor o extractor ajustando los volúmenes en cubiertas para facilitar el flujo del aire o mediante la transformación del patio en un espacio semiconfinado o confinado (atrio).

Cualquiera de las dos transformaciones anteriores requiere, para su correcto funcionamiento, la

incorporación de sistemas de regulación que ajusten el flujo de aire a las necesidades de los ocupantes.



Fuente: Página del fabricante.

Fig. 16. Rehabilitación energética de patio de 4,5x2 m con 7 plantas. Incorporación de reflectores de luz y modificación de acabados superficiales para mejorar la iluminación natural

Por último, la mejora de las condiciones microclimáticas a través del uso de patios puede obtenerse mediante la incorporación en los mismos de elementos susceptibles de enfriar el aire mediante refrigeración evaporativa (vegetación y láminas de agua) mejorando a un tiempo la calidad del mismo.

3.3. Tipologías constructivas en elementos de cerramiento

En la concepción del edificio como cobijo, los materiales, tecnologías y fuentes energéticas disponibles han condicionado los sistemas constructivos a través de la historia. Criterios como la proximidad a las fuentes se han aplicado tanto en la selección de materiales como en la elección de fuentes energéticas, determinando el nivel tecnológico de las soluciones constructivas adoptadas.

Con anterioridad a la Revolución Industrial, los elementos de cerramiento de la edificación, dentro de un sistema de economía de medios, eran a la vez elementos de soporte estructural y elementos de protección frente a los diferentes agentes atmosféricos. La construcción se desarrollaba, en nuestras latitudes, con materiales de la propia región: tierra, piedra, y ladrillo en sistemas masivos de muros de carga de una sola hoja, con elementos estructurales horizontales en general livianos, y predominio de la madera tanto en forjados horizontales como en sistemas de cubierta inclinada.

La aparición del carbón y los grandes cambios producidos en los procesos de transformación de los materiales y en el transporte, que van sucediéndose a partir de la Revolución industrial, tienen un claro reflejo en la arquitectura, en la que poco a poco los elementos compuestos por un solo material con múltiples funciones van siendo sustituidos por sistemas constructivos más complejos en los que cada material cumple una función específica.

En función de la región geográfica y el clima, los materiales, tecnologías y facilidad de acceso al transporte, pueden encontrarse algunas diferencias significativas en materiales y configuraciones. Sin embargo, la evolución en el tiempo de los sistemas constructivos es común a todas las arquitecturas de nuestras latitudes.

Los sistemas de cerramiento masivos de una sola hoja se van revistiendo, con objeto de garantizar la funcionalidad del elemento frente a las agresiones ambientales exteriores, con otros materiales tanto al exterior como al interior, en función de la calidad, características y “nobleza” de los materiales.

La taxonomía de los sistemas evoluciona en función de las nuevas necesidades (mayor rapidez en la construcción, abaratamiento de los costes) y de la aparición de nuevos materiales desarrollados mediante procesos industriales:

1. La incorporación masiva del hormigón y el acero en los sistemas estructurales conlleva la aparición de elementos de cerramiento de carácter menos masivo o de menor espesor que los anteriores.
2. La necesidad de “ventilar” los elementos de cerramiento para evitar condensaciones genera la evolución a sistemas de dos hojas con cámara intermedia.
3. La reducción de los espesores y las características masivas de los materiales utilizados en los elementos de cerramiento implica un progresivo incremento de la transmitancia energética de los elementos de cerramiento.

A raíz del encarecimiento de la energía y de la aparición de materiales industriales específicamente aislantes, de conductividad térmica muy baja, se produce una evolución hacia la incorporación de estos materiales en el elemento de cerramiento.

Cada uno de los elementos en contacto con el exterior - fachadas y cubierta- sufre su propia evolución, incluyéndose poco a poco entre sus funciones la de limitar condensaciones superficiales e intersticiales y la de limitar la transferencia térmica entre los espacios acondicionados y el exterior.

Pueden, en base a la evolución histórica y normativa, distinguirse varios “tipos constructivos” en fachadas:

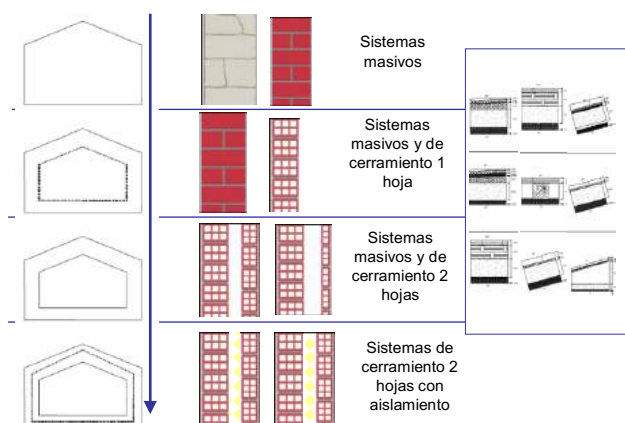
- Cerramiento de carácter masivo de una sola hoja, con materiales de diferentes espesores y conductividades térmicas, que podría asociarse a sistemas de construcción tradicionales.
- Cerramiento de una o dos hojas de masa variable sin aislamiento.
- Cerramiento de dos hojas de carácter no masivo con aislamiento insuficiente o degradado.
- Cerramiento de una o dos hojas de carácter no masivo con aislamiento suficiente y acorde con la normativa vigente.

En cubiertas, sin embargo, resulta más difícil el establecimiento de tipos constructivos, ya que se producen grandes variaciones en su composición.

Los diferentes materiales y usos de la misma han generado configuraciones diversas a lo largo de nuestras latitudes que son altamente dependientes de la pluviometría y de la disponibilidad de materiales estructurales en la región, por lo que hay que recurrir directamente en el análisis a su caracterización energética en función de sus materiales, número de hojas, caracterización dimensional y grado de ventilación de las cámaras de aire y posición de elementos masivos si los tuviera.

En forjados, aun compartiendo diversidad constructiva con las cubiertas, podrían establecerse 3 grandes grupos:

- Forjados ligeros, básicamente compuestos por materiales naturales de baja conductividad térmica y baja masa térmica, que podrían asociarse a sistemas de construcción tradicionales con cerramientos pesados.
- Forjados masivos, básicamente compuestos por materiales pesados de alta conductividad térmica generados mediante procesos industriales (hormigón, metal, ladrillo),
- Forjados mixtos, en los que la reducción de la transmitancia térmica mediante la incorporación de materiales de baja conductividad térmica se asocia al cumplimiento de la normativa térmica.



Fuente: Propia

Fig. 17. Evolución de los tipos constructivos a través de la historia desde la óptica energética.

Como es sabido, algunos de estos cambios no son debidos exclusivamente a la evolución de la tecnología de la construcción, sino también a la aparición de normativas destinadas a regular el consumo asociado a las crecientes necesidades de confort, especialmente en el ámbito de la vivienda, que en parte fueron propiciadas por el boom de la energía barata.

La primera normativa térmica que afecta al parque edificatorio español es la NBE-CT79. Se trata de una norma de carácter marcadamente conservativo, centrada en la reducción del consumo energético de calefacción mediante la reducción de la transferencia térmica de los diferentes elementos de cerramiento, la reducción del intercambio de aire no deseado con el exterior, y la limitación de las condensaciones.

Entre el año 1979 y el año 2006 no se produce ninguna evolución en la normativa en este sentido, por lo que todo el parque edificatorio construido durante este periodo tiene características energéticas muy semejantes.

El Código Técnico de la Edificación, a través de su Instrucción HE-1, actualmente en vigor, mantiene los criterios de limitación de la transferencia térmica a través de la envolvente térmica del edificio estableciendo valores para la misma aún más restrictivos. En esta nueva norma, los criterios de conservación de la energía se aplican no solo a las condiciones de invierno (periodo infracalentado) sino que la protección frente a condiciones ambientales exteriores se extiende también al verano (periodo sobrecalentado).

La aplicación de esta normativa ha ido definiendo, de acuerdo con las Directivas Europeas vinculadas al ahorro de Energía en Edificios y a la potenciación de Edificios de Consumo de Energía Casi Nulos (nZEB) una serie de criterios generales comunes de aplicación a todos los documentos básicos en edificios existentes, con el objetivo de adecuar el parque edificatorio existente a los calendarios propuestos por la UE (ver Fig. 18).

Las limitaciones a las actuaciones en rehabilitación energética establecen una serie de criterios de uso para la aplicación de la normativa vigente:

- Criterio de no empeoramiento.-las condiciones preexistentes de ahorro de energía que sean menos exigentes que las establecidas en los DB's no se podrán reducir, y las preexistentes que sean más exigentes únicamente podrán reducirse hasta el nivel establecido en el DB-HE.
- Criterio de flexibilidad.-en los casos en que no es posible alcanzar las exigencias del DB-HE, se permite limitar la intervención al mayor nivel de adecuación compatible con las condiciones de la intervención (no alteración de edificios históricos, no efectividad en la aplicación de la Normativa, inviabilidad técnica o económica, implicación a partes de la envolvente del edificio fuera de la actuación).
- Criterio de reparación de daños (aplicable a todos los DB's).- cualquier parte del edificio que presente daños en su configuración y suponga una merma de las prestaciones térmicas iniciales, debe ser reparado.



Fuente: CSCAE de BPIE 2015

Fig. 18. Fechas clave para la implantación de los nZEB.

4. Balance energético y actuaciones en la envolvente térmica

Los elementos de cerramiento de la edificación, que actúan como interfase entre los espacios interiores y el ambiente exterior, el terreno o espacios sin acondicionar están, evidentemente, sometidos a las oscilaciones de la temperatura que se producen en el medio externo y que dependen de los ciclos climáticos diarios y estacionales.

A partir de las propiedades de los materiales y de las características dimensionales de los elementos de cerramiento constituidos con los mismos (superficie y espesor), se establecen diferentes combinaciones de mecanismos de transferencia energética entre el exterior y el interior.

La energía transferida a través de los elementos de cerramiento (envolvente térmica) depende de los siguientes factores:

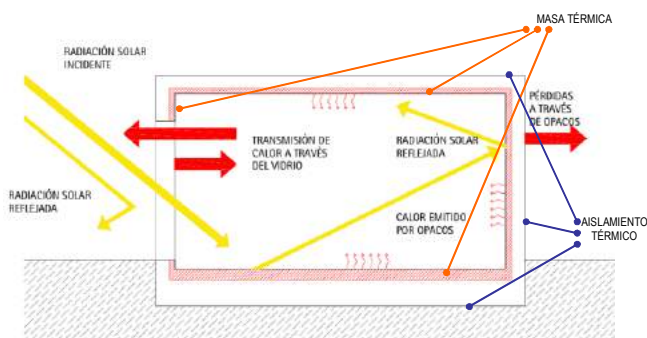
- capacidad para rechazar parte de la energía térmica y lumínica de las superficies y de los materiales que los componen;
- capacidad para absorber la energía de los elementos de cerramiento, dependiente de las propiedades termofísicas del material y del espesor del mismo;
- tipo de energía que el material puede transmitir al medio, térmica o lumínica;
- tiempo que esta energía tarda en transmitirse al interior de los espacios, que depende de las propiedades termofísicas y del espesor de los elementos de cerramiento.

Estos 4 factores determinan las grandes diferencias de transmisión energética que se producen entre sistemas de cerramiento opacos y semitransparentes, así como las posibilidades de intervención en su composición para mejorarlos energéticamente.

En opacos, su efecto como modulador térmico está asociado tanto a su resistencia a la transmisión del calor (resistencia térmica) como al carácter diferido del aprovechamiento energético a través de los mismos.

En acristalamientos, caracterizados por su opacidad parcial a la radiación infrarroja -efecto invernadero- el carácter diferido de la transmisión energética desaparece, siendo objeto de valoración su resistencia a la transmisión del calor y la luz (resistencia térmica y lumínica)

Los sistemas de cerramiento que envuelven los espacios a acondicionar están configurados por una combinación de elementos de ambos tipos, opacos y semitransparentes, por lo que no pueden considerarse los mismos de forma individual aun cuando por su propia composición, tengan diferentes formas de colaborar en el balance energético de la edificación (ver figura).



Fuente: Granados, H. "Rehabilitación energética" [5]

Fig. 19. Balance energético de un espacio expuesto a la radiación solar.

Los acristalamientos situados en orientaciones de ganancia solar son sistemas de ganancia térmica inmediata, siendo más o menos operativa esta ganancia para colaborar al confort y a la estabilidad térmica en función de la absorción de los elementos opacos del espacio que es necesario acondicionar y de sus características inerciales. La transferencia energética derivada de la aportación solar que puede obtenerse a través de los huecos dependerá de las dimensiones de estos y las características energéticas de sus elementos de acristalamiento y, en menor medida, de las carpinterías.

Los acristalamientos situados en orientaciones sin ganancia son elementos de alta transferencia térmica, ya que los valores de transmitancia térmica de los sistemas de acristalamiento son sensiblemente mayores que los correspondientes a cualquier configuración habitual de sistemas de cerramiento opacos. Hay además que considerar la transferencia térmica por infiltración que se produce en huecos en función del grado de estanqueidad de los mismos, especialmente relevante en tareas de rehabilitación energética.

Las características como barrera y acumulador térmico de los elementos opacos que envuelven el espacio a acondicionar -combinación de resistencia térmica y masa térmica- asociadas a su configuración constructiva determinarán las posibilidades de intervención que, junto con un uso adecuado de los canales de renovación del aire y ventilación, permitan reducir el consumo energético necesario para alcanzar el confort térmico.

En función de la configuración de los sistemas de cerramiento opacos pueden establecer dos grandes categorías que condicionan las posibilidades de mejora combinadas de acristalamientos y opacos:

- edificaciones de carácter masivo,
- edificaciones de carácter no masivo cuyos elementos de cerramiento no forman parte de la estructura.

Las grandes diferencias entre estas dos categorías se centran en su capacidad de carga térmica (C_t) o, expresado de otra manera, en las grandes diferencias en la

cantidad de energía que hay que aportar al elemento para elevar o reducir en un grado su temperatura.

Esta capacidad térmica (C_t) se puede expresar, para un elemento de paramento homogéneo, como:

$$C_t = m_s \times c_i = (e \times \rho) \times c_i \quad [E.1]$$

donde:

- C_t es el calor almacenado por grado de diferencia de temperatura y m^2 ($KJ/m^2 \text{ } ^\circ C$ o $Kcal/m^2 \text{ } ^\circ C$);
- m_s es la masa superficial (Kg/m^2);
- c_i es el calor específico del elemento considerado ($KJ/Kg \text{ } ^\circ C$ o $Kcal/Kg \text{ } ^\circ C$);
- ρ es la densidad del material (Kg/m^3);
- e es el espesor (m);

Así, la cantidad de energía E (KJ o $Kcal$) que puede acumular un cerramiento depende de su capacidad térmica (C_t), del incremento de temperatura (ΔT) y de su superficie (S), de acuerdo con la siguiente expresión:

$$E = C_t \times \Delta T \times S \quad [E.2]$$

Se analizan separadamente las estrategias de actuación en estas dos categorías.

a. Edificaciones de carácter masivo

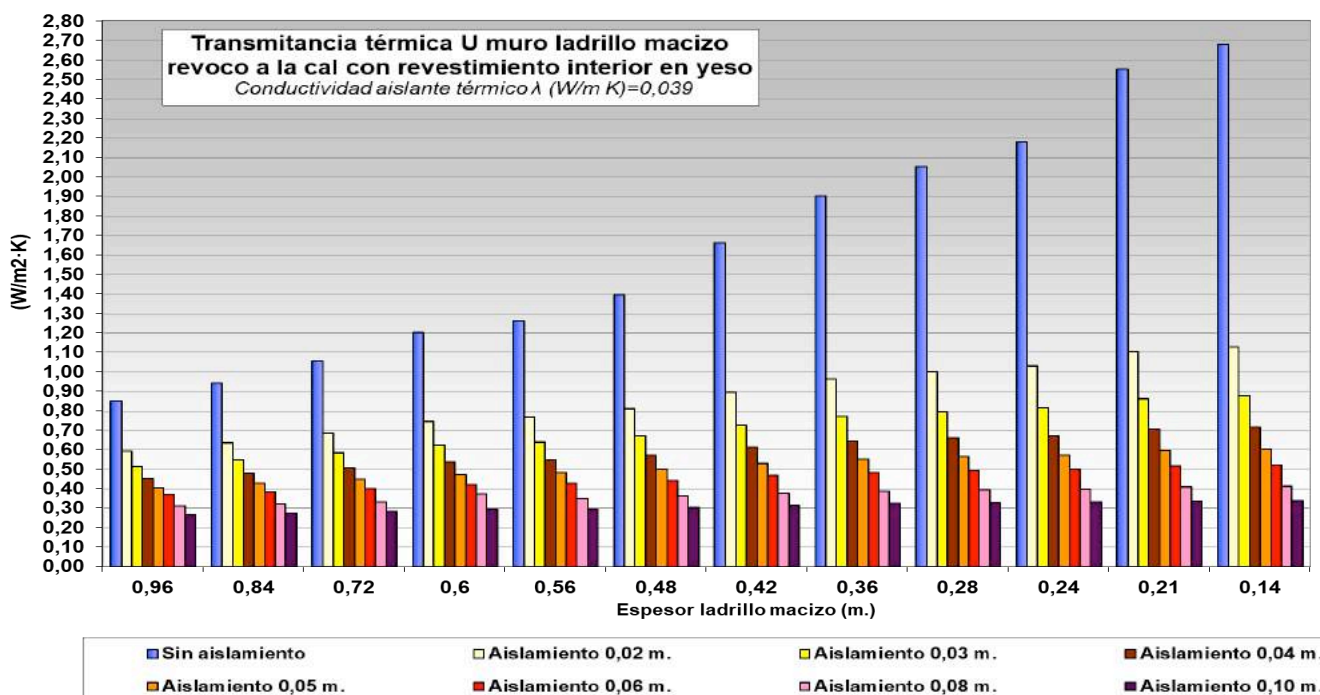
Las edificaciones de carácter masivo corresponden fundamentalmente a la edificación anterior a la existencia de normativas térmicas, debido tanto a la evolución de tecnologías y materiales como a condicionantes de mercado relativos al aumento de la superficie útil y a las limitaciones impuestas por la norma en las características energéticas de los sistemas de cerramiento.

Dentro de estas edificaciones, el grupo más representativo es el correspondiente a la denominada "edificación tradicional", propia tanto del ámbito rural como de los cascos históricos de la mayoría de las ciudades de latitudes medias y altas.

4.1.1. Elementos opacos

Estas construcciones, de muros de una sola hoja y gran espesor compuestos por materiales de alta densidad, tienen dos características fundamentales:

- gran capacidad para almacenar calor y gran inercia térmica, que permite una adaptación lenta a los cambios de temperatura, mediante la amortiguación y desfase de la onda térmica,
- transmitancia térmica alta, ligada a sus grandes conductividades.



Fuente: Propia

Fig. 20. Transmitancia térmica de sistemas de cerramiento de ladrillo macizo y efecto de diferentes espesores de aislamiento.

Para el aprovechamiento de la primera de sus características, la masa térmica, resulta especialmente relevante la valoración de oscilaciones térmicas diarias (ΔT), ya que su comprensión permite:

- establecer si la energía puede ser acumulada en los cerramientos o cedida desde los mismos de acuerdo con los periodos de desfase de los elementos de cerramiento,
- ajustar las estrategias de rehabilitación conservativa a criterios de confort térmico en los diferentes ciclos estacionales.

Respecto a su segunda característica, su alta transmitancia térmica, vinculada a las altas conductividades térmicas de los materiales más habituales, ésta supera ampliamente, en la mayoría de los casos, las transmitancias térmicas máximas requeridas por el actual CTE para las diferentes zonas climáticas.

Las posibilidades de rehabilitación energética en este sentido están ligadas a la reducción de la transmitancia térmica mediante un aumento sustantivo del espesor de los cerramientos, lo que resulta inviable en la mayoría de los casos, o a la incorporación de materiales aislantes de baja conductividad térmica que rebajen el valor total de U.

En la Fig. 20 se recogen los valores de transmitancia térmica para elementos de fábrica de ladrillo macizo de diferentes espesores y la reducción de las mismas en función del espesor del aislamiento. Se puede observar la

dificultad que conlleva el cumplimiento de los valores de transmitancia térmica marcados por el CTE.

La elección de la posición del aislamiento en elementos de cerramiento de una sola hoja de alta masa térmica dependerá de la combinación de una serie de criterios que deben analizarse con carácter singular para cada una de las unidades energéticas objeto de rehabilitación:

- Aproximación de las condiciones ambientales exteriores a las condiciones de confort.
- Oscilaciones medias diarias en temperaturas y ciclos estacionales.
- Origen de la energía necesaria para aportar a las masas térmicas (radiación solar, ganancias internas, energías renovables, combustibles fósiles...).
- Coincidencia entre el tiempo de descarga de calor desde las masas térmicas y el periodo de utilización de los espacios.
- Compatibilidad con la naturaleza -radiativa o convectiva- de los sistemas de climatización activos.
- Viabilidad técnica y funcional del uso de sistemas de aislamiento térmico por el exterior (SATE) y por el interior (SATI).

Los patrones de uso del edificio, junto con la duración del ciclo de temperaturas exteriores resultan determinantes a la hora de valorar los criterios de uso de materiales aislantes y la posición más adecuada en relación con la masa térmica. Las oscilaciones medias diarias (ciclo día-noche) pueden permitir, en función de su

amplitud, garantizar la carga o descarga del sistema según necesidades de los usuarios, durante el periodo base de 24 horas.

En el caso de que este acoplamiento no se produzca por exceso o inadecuación de la cantidad de masa térmica en los diferentes ciclos estacionales, la rehabilitación permite un ajuste de la cantidad de energía transferida a/desde la misma. El ajuste se basará, en este caso, en la obtención de porcentajes equilibrados mediante la selección de aislamientos a cara interna o a cara externa que permitan al mismo tiempo dar cobertura a los requerimientos normativos.

El ajuste y la selección de la posición del aislamiento solo serán efectivos si la cesión de calor a los espacios interiores invernales se compatibiliza con el uso de sumideros ambientales exteriores para garantizar la cesión del calor al ambiente exterior durante el verano.

También es necesario considerar la compatibilidad entre los sistemas activos y pasivos de acondicionamiento térmico. El calentamiento de masas térmicas mediante sistemas de respuesta inmediata de tipo convectivo retrasará el periodo de confort para el usuario, mientras que el calentamiento de espacios sin masa térmica con sistemas inerciales puede generar sobrecalentamientos severos.

La diversidad de tipos de sistemas activos que pueden encontrarse en edificaciones que fueron concebidas sin incorporar estos sistemas añade, en ocasiones, un factor de complejidad que dificulta el desarrollo de operaciones globales en la rehabilitación. Pueden encontrarse en un mismo edificio grandes diferencias en los sistemas, ajuste a zonas térmicas y sistemas de control de los mismos según se trate de un ámbito de actuación individual o colectivo, fuentes de abastecimiento energético,...

El último criterio, relacionado con requerimientos técnicos funcionales y normativos, implica la evaluación de una serie de condicionantes, además de los energéticos, en la selección de la posición de los sistemas de aislamiento.

Se describen a continuación las características más significativas de los sistemas de aislamiento térmico a cara externa y a cara interna.

Sistemas de aislamiento térmico por el exterior (SATE)

- Su uso mantiene la estabilidad térmica de los espacios, y elimina puentes térmicos.
- Es compatible con la ocupación del edificio pero requiere actuaciones globales.
- Dependiendo del sistema utilizado (rígido, semirrígido, revocos de baja conductividad...) puede asociarse a la reparación de la cobertura exterior o de la estructura o bien requiere una reparación previa de la misma para garantizar su estabilidad.
- También dependiendo del sistema, la resistencia al impacto puede resultar insuficiente y necesitarse soluciones específicas para zonas de gran exposición.

- Según el espesor, altera las dimensiones de la envolvente exterior, por lo que se requiere un proyecto específico que permita compatibilizarlo el resto de elementos de la envolvente y con las instalaciones existentes.
- Su uso está muy limitado en la intervención en patrimonio histórico-artístico debido a la no planeidad de las fachadas y singularidad de molduras y cornisas, si bien en este sentido se ha producido una gran evolución en el mercado (elementos singulares) y en el ámbito normativo.



Fuente: Propia

Fig. 21. Aislamiento a cara externa (SATE).



Fuente: Propia

Fig. 22. Sistemas de aislamiento térmico por el exterior (SATE) para molduras en edificios de casco.

Sistemas de aislamiento térmico por el interior (SATI)

- Su uso no mantiene la estabilidad térmica de los espacios, genera masa y capacidad caloríficas bajas y solo permite aislar puentes térmicos “integrados” en fachada: pilares, capialzados y huecos.
- No permite resolver puentes térmicos lineales o de contorno (intersección de las fachadas con forjados y particiones interiores) y su uso conlleva el riesgo de formación de condensaciones superficiales.
- No requiere actuaciones globales, por lo que resulta aplicable a rehabilitaciones parciales y otros trabajos en el interior del edificio (suelos, particiones, ventanas, etc.).
- Puede independizarse de la reparación de la cobertura exterior o estructura por lo que es compatible con mala planimetría exterior y desplomes.

- Reduce la superficie útil, por lo que es necesario recurrir a aquellos materiales aislantes con menor conductividad térmica para reducir su espesor.
- Su uso no está limitado en la intervención en patrimonio histórico-artístico, siendo en ocasiones la única opción posible.

En el caso de que el elemento de cerramiento opaco se corresponda con la cubierta (espacios habitables bajo cubierta) los criterios de actuación en la rehabilitación deben considerar una serie de condicionantes específicos del sistema:

- La cubierta es un sistema de fuerte intercambio térmico con el exterior a lo largo de todos los ciclos climáticos, tanto por radiación como por convección, por lo que su efecto como barrera térmica debe reforzarse de forma específica.
- Las características inerciales no suelen ser representativas, con masas térmicas sensiblemente menores que en elementos de cerramiento verticales.
- Debido a su posición, el aprovechamiento de la masa térmica resulta complejo, por lo que su utilización debe asociarse a estrategias convectivas acordes con los diferentes ciclos climáticos estacionales y diarios.



Fuente: Fabricante

Fig. 23. Aislamiento a cara interna (SATI).

4.1.2. El hueco acristalado

El hueco acristalado es el elemento del edificio más directamente relacionado con la captación solar, la ventilación y la iluminación. Los sistemas energéticos configurados por la ventana son, dentro de la arquitectura tradicional, de carácter no homogéneo: diferentes dimensiones en fachadas a vía pública y fachadas a patios interiores, jerarquización de tamaños en ventanas

balconeras en fachadas principales en función de la altura libre entre forjados y de criterios modales...

Esta diversidad añade un factor de complejidad en los procesos de rehabilitación energética, siendo necesario singularizar las soluciones en función de la división horizontal: la reducción de las superficies de acristalamiento puede llegar hasta el 50% en plantas superiores frente a la planta principal del edificio.

El hueco más característico de fachada en edificación tradicional es la ventana balconera. En su estado original, si no ha sido sometido a operaciones previas de reparación o sustitución, el acristalamiento está realizado con vidrio simple, habitualmente de 4 mm de espesor, con un porcentaje de vidrio con respecto al hueco en el entorno del 75%. El acristalamiento puede estar subdividido por pequeños perfiles de madera o zinc, incrementándose así el intercambio térmico por infiltraciones.

Los acristalamientos situados en orientaciones solares producen, debido a sus características energéticas, ganancias térmicas altas: los vidrios monolíticos tienen un factor solar medio de 0,85, frente a los valores en el entorno de 0,7 y aún menores propios de los sistemas de acristalamiento con cámara de aire intermedia (UVA).



Fuente: Propia

Fig. 24. Jerarquización de dimensiones en huecos y elementos de regulación térmica en la arquitectura tradicional.

La transmitancia térmica de los acristalamientos monolíticos, es sin embargo, excesivamente alta (entre 5,4 y 5,7 W/m²K), por lo que su papel de intercambiador térmico debe ser controlado para reducir los flujos térmicos no deseados. Tradicionalmente, el sistema incorporaba un sistema de reducción de transmitancia térmica regulable, las contraventanas interiores de madera.

Tabla 3

Cálculo de transmitancia térmica de ventanas balconeras con y sin elementos de regulación y control en San Sebastián.

| TRANSMITANCIA TERMICA DE VENTANA BALCONERA EN SAN SEBASTIAN EN ORIENTACIÓN ESTE | |
|--|-------------|
| Porcentaje de huecos en fachada | 16% |
| CASO 1. EL SISTEMA VENTANA NO INCORPORA SISTEMAS DE REGULACIÓN | |
| FM fracción del hueco ocupada por el marco (SM/SH) | 0,45 |
| U_{hv} transmitancia térmica de la parte semitransparente ($W/m^2 K$) | 5,70 |
| U_{hm} transmitancia térmica del marco de la ventana de madera ($W/m^2 K$) | 2,00 |
| U_h Transmitancia térmica total = $(1-FM)U_{hv} + FMU_{hm} = W/m^2 K$ | 4,03 |
| CASO 2. EL SISTEMA VENTANA INCORPORA FRAILEROS Y CONTRAVENTANAS INTERIORES MADERA | |
| RESISTENCIA TERMICA | m^2K/W |
| R_{se} | 0,04 |
| Frailero | 0,16 |
| Cámara de aire ligeramente ventilada | 0,07 |
| Ventana balconera (valores estimados medios) | 0,18 |
| Cámara de aire sin ventilar | 0,15 |
| Contraventana (2,5 cm) | 0,19 |
| R_{si} | 0,13 |
| <i>Resistencia Térmica Total</i> | 0,93 |
| U_h Transmitancia térmica total = $W/m^2 K$ | 1,07 |



Las carpinterías suelen ser de madera y generar infiltraciones en función de su grado de deterioro. A su favor, al ser la madera un material de conductividad térmica muy baja, su resistencia térmica es adecuada para nuestros climas y latitudes, situándose dentro de los límites establecidos por la legislación vigente.

Se trata, además, de carpinterías con sistemas de apertura poco regulables (batientes), lo que dificulta el control del caudal de aire en estrategias de ventilación.

El sistema ventana suele incorporar subsistemas propios de sombreado (persianas, fraileros...) que se combinan con el espesor del muro para limitar la radiación solar directa cuando la altura solar va aumentando.

La rehabilitación de huecos requiere, pues, la potenciación, recuperación y ajuste de sus sistemas propios de control energético y la mejora de aquellos que resultan insuficientes para las necesidades y requerimientos normativos actuales (ver Tabla):

- Aumento de la resistencia térmica de los acristalamientos mediante sistemas fijos (sustitución o mejora de acristalamientos) o móviles (aislamientos regulables interiores y exteriores).
- Reparación o sustitución de las carpinterías, seleccionando sistemas de apertura que permitan controlar los flujos de aire para favorecer las estrategias de renovación de aire y de ventilación.
- Análisis de la repercusión del ancho de muro en la accesibilidad solar: las ventanas suelen situarse a haces internos, con algunas excepciones, como es el caso de la arquitectura tradicional gallega.

- Recuperación de los sistemas de sombreado propios y/o incorporación de sistemas ajustados a las necesidades de ganancia solar estacionales.

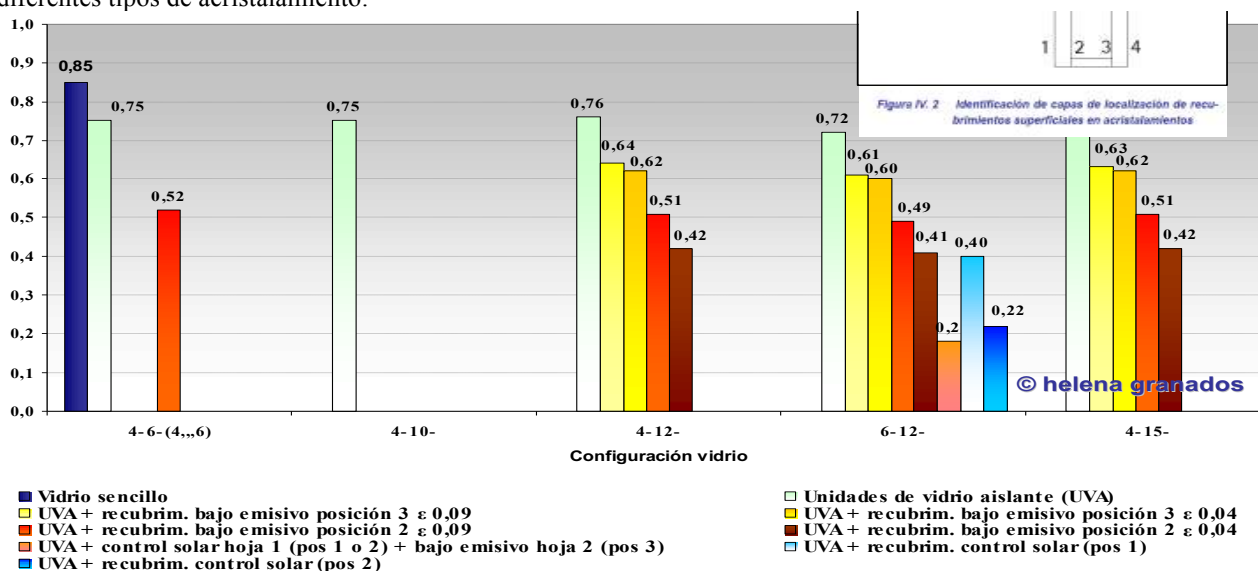
Si además de los criterios energéticos se toman en consideración criterios medioambientales, la secuencia lógica de actuación en los elementos del sistema será la siguiente:

1. Mejorar prestaciones de vidrio (tratamientos especiales) como primer tratamiento, sin aumentar el espesor de la cámara.
2. Mejorar prestaciones de vidrio (tratamientos especiales) aumentando espesor de la cámara.
3. Acondicionar carpintería.
4. Sustituir carpintería considerando:
 - a. tamaño del hueco para elegir material (% marco)
 - b. compatibilidad con aislamiento previsto
 - c. sistemas de control de flujos de aire
5. Incorporar elementos de control solar adecuados en función de las distintas orientaciones de ganancia solar.
6. Incorporar en sistemas de doble ventana elementos de manejo que permitan el mantenimiento.
7. Actuar sobre huecos de forma previa a sobre partes opacas.

Al ser el acristalamiento el sistema de ganancia solar directa de los espacios, la sustitución de acristalamientos para rehabilitación en orientaciones de ganancia solar invernal debe primar la reducción de la transmitancia térmica con la menor repercusión posible sobre el factor

de ganancia solar. Los tratamientos bajo emisivos y reflectivos implican una disminución de este factor que deben ser analizados en su selección.

Se incluyen en la siguiente figura los factores solares de diferentes tipos de acristalamiento:



Fuente: Propia a partir de datos del Manual del vidrio [6]

Fig. 25. Factor solar de diferentes configuraciones de acristalamiento.

En resumen, la rehabilitación de los edificios tradicionales de carácter masivo, aprovechando sus características inerciales y los dispositivos energéticos potenciales incorporados en su sistema constructivo, conlleva las siguientes ventajas:

- Incluye elementos de valor arquitectónico ya integrados en el edificio, salvaguardando la imagen urbana, mediante la correcta utilización de sistemas constructivos ya incorporados.
- Su durabilidad corresponde a la del edificio, puesto que se realiza utilizando los elementos constructivos tradicionales.
- Su funcionamiento es sencillo y de bajo coste de mantenimiento, implicando al mismo tiempo al usuario en el proceso de ahorro energético.
- Es económica, ya que la recuperación de los elementos tradicionales no supone un coste adicional dentro de un proceso de rehabilitación conservativa.

4.2. Edificaciones de carácter no masivo

Las edificaciones de carácter no masivo, en las que el cerramiento no posee carácter estructural corresponden a un amplio periodo de tiempo, desde mediados del siglo XX hasta la actualidad.

Dadas las limitaciones impuestas por la norma en las características energéticas de los sistemas de cerramiento,

serán objeto de rehabilitación energética todas aquellas edificaciones en las que las transmitancias térmicas de sus elementos de cerramiento superen los valores establecidos por la normativa actual.

Este tipo de edificaciones podrían denominarse “convencionales” y entre las mismas pueden encontrarse tanto cerramientos opacos de una sola hoja como de dos hojas.

4.2.1. Elementos de cerramiento opacos

A diferencia de las edificaciones de carácter masivo, los elementos de cerramiento vertical poseen una masa térmica variable, pero en general baja, debido a su menor densidad y menores espesores.

La adaptación a los cambios de temperatura es, pues, más rápida que en las construcciones pesadas, con una amortiguación y un desfase de la onda térmica menores, por lo que no suele producirse el ajuste entre la cesión o absorción de calor de los elementos de cerramiento a criterios de confort térmico.

La transmitancia térmica, aunque excesiva de acuerdo con los valores máximos de transmitancia térmicas máximas admitidos por el actual CTE para las diferentes zonas climáticas, es variable: este grupo de edificios engloba diferentes configuraciones constructivas de baja masa térmica, desde sistemas de fachada de una hoja a sistemas de dos hojas con aislamiento en cámara intermedia.

Al igual que en construcciones pesadas, la reducción de la transmitancia térmica mediante un aumento sustantivo del espesor de los cerramientos suele estar ligada a la incorporación de materiales aislantes de baja conductividad térmica que rebajen el valor de la transmitancia U del cerramiento.

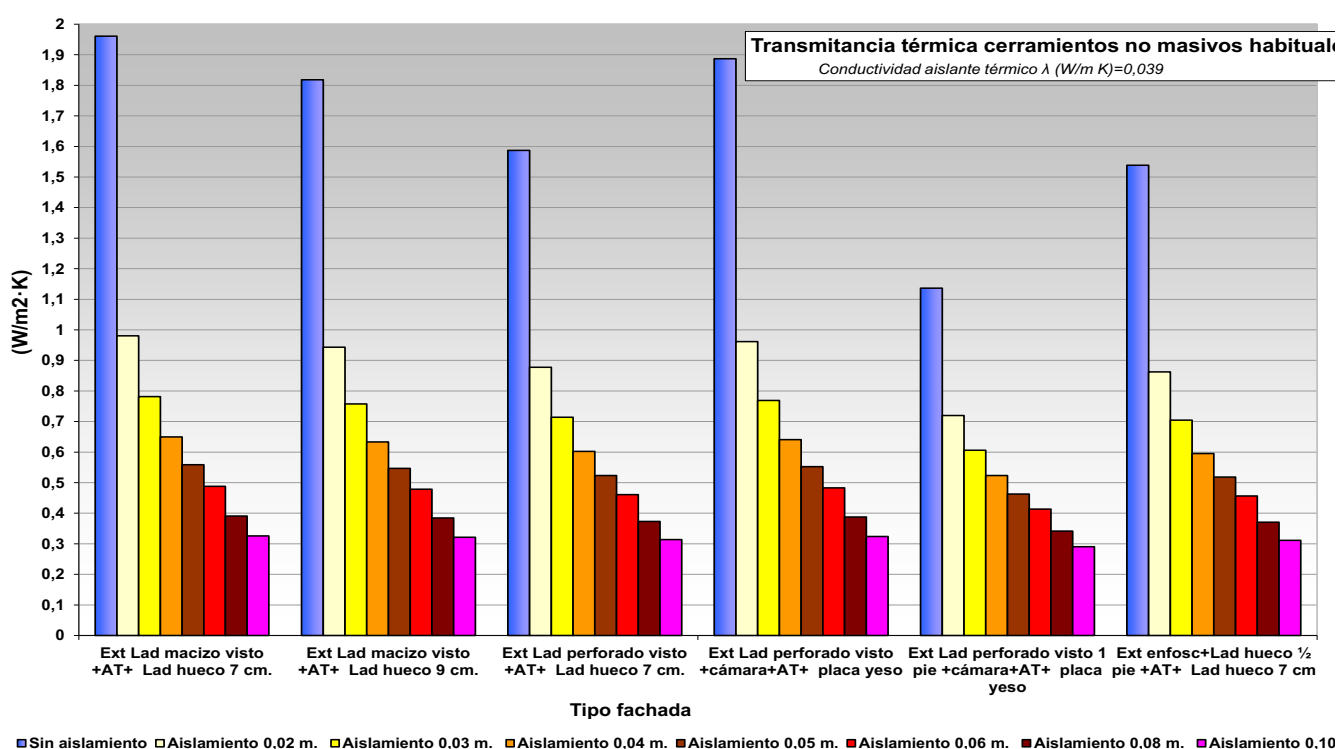
En la Fig. 26 se recogen las transmitancias térmicas de cerramientos de fábrica de ladrillo no masivas en diferentes configuraciones constructivas, así como la reducción de las mismas en función del espesor del aislamiento.

La reducción de la transmitancia térmica en fachadas mediante la incorporación de aislamiento requiere, en el caso de configuraciones de doble hoja con aislamiento en cámara intermedia, conocer el espesor de la cámara y el estado del material aislante.

La elección de la posición del aislamiento dependerá de la combinación de una serie de criterios que deben analizarse con carácter singular para cada una de las unidades energéticas objeto de rehabilitación.

Como en el caso de construcciones masivas, es necesario valorar la aproximación de las condiciones ambientales exteriores a las condiciones de confort e identificar las oscilaciones medias diarias en temperaturas en los diferentes ciclos estacionales.

Una vez conocidos los datos ambientales exteriores, es necesario evaluar la posible colaboración al balance energético del área a acondicionar de la aportación solar y las ganancias internas en los espacios, así como identificar el tipo de energía y sistemas previstos y posibles para cubrir esas necesidades.



Fuente: Propia

Fig. 26. Transmitancia térmica de sistemas de cerramiento de ladrillo habituales en sistemas convencionales y modificación de la misma para diferentes espesores de aislamiento.

Dado que la masa térmica que “envuelve” a los espacios a acondicionar se reparte de forma heterogénea entre los diferentes elementos de cerramiento, es necesario analizar las características, capacidad térmica y colaboración al balance energético de los espacios interiores para cada uno de ellos de forma previa a la toma de decisiones acerca de las características y posición del aislamiento.

El objetivo de este análisis es evaluar si la masa térmica total permite garantizar la carga o descarga del sistema según necesidades de los usuarios, durante el periodo base de 24 horas, a lo largo de los diferentes

ciclos estacionales o, en el caso de que este acoplamiento no se produzca, establecer posiciones de aislamiento ajustadas a los requerimientos normativos que no generen situaciones de incomodidad térmica local por asimetría de la temperatura radiante, por una gran estratificación vertical de la temperatura del aire interior o por una temperatura incómoda del suelo.

Como en el caso de las edificaciones tradicionales, hay que considerar la compatibilidad entre los modos básicos de transferencia térmica de los sistemas activos, sean estos radiativos o convectivos, y la colaboración de los elementos de cerramiento al confort mediante la

modulación de su masa térmica. El tipo y patrones horarios de uso también influyen en la selección de los sistemas y su grado de acoplamiento: la estabilidad térmica tiene una gran importancia en espacios de uso continuado.

En esta tipología energética también existe gran diversidad de tipos de sistemas activos que pueden añadir un factor de complejidad que dificulte el desarrollo de operaciones globales en la rehabilitación, si bien por su cronología muchas de ellas disponen de sistemas centralizados, con predominio de los sistemas radiativos en edificación residencial.

Por último, además de los condicionantes técnicos, funcionales y normativos para el uso de los SATE y los SATI descritos en construcciones pesadas, hay que evaluar las posibilidades de intervención en cámara intermedia cuando se trata de sistemas de cerramiento de doble hoja.

La intervención en cámara de aire intermedia resulta compleja, ya que requiere del conocimiento previo del estado de la misma –estado de la cámara e instalaciones que puedan verse afectadas por el nuevo aislamiento- y del control específico de la puesta en obra mediante medios especiales, tales como la termografía. Esta comprobación no puede ser realizada visualmente cuando la puesta en obra se realiza mediante proyección a través de orificios desde la hoja interna del cerramiento.

Este sistema de puesta en obra, basado en el relleno de la cámara mediante proyecciones realizadas a distancias tabuladas en función del tipo de aislamiento proyectado, hace difícil garantizar la homogeneidad del sistema de aislamiento y puede ejercer presión en la cámara, por lo que su puesta en obra deberá ser especialmente cuidadosa.



Fuente: Fabricante

Fig. 27. Aislamiento en cámara intermedia. Puesta en obra.

En cubiertas (espacios habitables bajo cubierta) los criterios de actuación en la rehabilitación son semejantes a los expresados para construcciones pesadas.

4.2.2. El hueco acristalado

Los sistemas energéticos configurados por la ventana tienen, dentro de la arquitectura convencional, elementos diferenciales frente a los descritos para la arquitectura tradicional:

- Sus dimensiones suelen ser de carácter más homogéneo en fachadas, manteniéndose a lo largo de todas las plantas.
- Las características dimensionales de los huecos no son sensiblemente diferentes entre fachadas a vía pública y fachadas a patios interiores, siempre y cuando se trate de patios vivideros en los que el hueco también sirve a las funciones de iluminación y ventilación.
- El porcentaje de acristalamiento en huecos varía en función de los materiales de carpintería y de la dimensión total de los huecos.
- Las características energéticas de los acristalamientos varían en función de la época de construcción y de las operaciones de sustitución de carpinterías realizadas. El acristalamiento puede estar realizado con vidrio simple, o con unidades de vidrio aislante (UVA).

El porcentaje de huecos en fachada varía en función del uso de la edificación, así como los materiales utilizados para las carpinterías. En la edificación residencial, son habituales las carpinterías de madera, de aluminio y de PVC, mientras que en edificación de uso terciario son habituales las de aluminio y hierro.

Las transmitancias térmicas de las carpinterías son variables, desde valores bajos para carpinterías de madera y PVC hasta valores muy altos para carpinterías de hierro y de aluminio, alcanzando éstas últimas valores de U semejantes a los de los vidrios monolíticos.

A título orientativo, se incorporan en la Tabla 4 los valores de transmitancia térmica para carpinterías marcados por la norma UNE 10077-1.

En la tabla se incluyen también criterios generales sobre absorptividades y espesores; en carpinterías metálicas, se establecen claras diferencias en espesores según el material y la existencia o no de elementos de rotura de puente térmico.

Los acristalamientos pueden tener transmitancias térmicas variables, desde valores de U muy altos (5,7 W/m²·K en vidrios monolíticos) hasta valores inferiores a la mitad según la cronología del edificio y el grado de rehabilitación.

Tabla 4

Propiedades térmicas de diferentes materiales y tipos de carpinterías según UNE-EN ISO 10077-1

| TIPO | DESCRIPCIÓN | Absortividad | U (W/m ² ·K) | | E perfil (cm) |
|----------|--|---|-------------------------|-----|---------------|
| | | | Vert | Hor | |
| Metálico | Metálico sin RPT | Diferentes acabados y colores determinan su valor variable | 5,7 | 7,2 | Acero 4-6 |
| | Metálico con RPT (4 mm ≤ d < 12) | | 4,0 | 4,5 | Aluminio 4-8 |
| | Metálico con RPT (d ≥ 12) | | 3,2 | 3,5 | Al RPT 6-9 |
| Madera | Madera densidad media alta (ρ=700 Kg/m ³ y 60 mm espesor) | Valores medios a medios altos según color y tipo de madera. Hab. baja reemisión de la energía absorbida al interior del espacio | 2,2 | 2,4 | 7-12 |
| | Madera densidad media baja (ρ=500 Kg/m ³ y 60 mm espesor) | | 2,0 | 2,1 | |
| PVC | Perfiles huecos de PVC (2 cámaras) | Diferentes acabados y colores determinan su valor variable | 2,2 | 2,4 | 9-15 |
| | Perfiles huecos de PVC (3 cámaras) | | 1,8 | 1,9 | |

Es necesario recordar que la actual normativa térmica considera los porcentajes de huecos en fachada y la orientación en la que se encuentran a la hora de establecer la transmitancia máxima admisible, por lo que el diagnóstico previo a la rehabilitación deberá considerar ambos parámetros.

Si bien la situación de partida puede ser variable tanto en carpinterías (madera, hierro, aluminio con y sin rotura de puente térmico...) como en acristalamientos (desde vidrios monolíticos hasta sistemas de acristalamiento de alta resistencia térmica), los criterios de aplicación en la rehabilitación son semejantes a los correspondientes a la edificación tradicional:

- análisis de la transmitancia del vidrio y mejora, si fuese necesario, de su resistencia térmica o de su factor solar según orientaciones y amplitud de los ciclos estacionales,
- determinación de la transmitancia del marco (norma UNE-EN ISO 10077-1) y del nivel de infiltraciones de la carpintería, procediendo a la reparación o a la sustitución en función de su estado y los requerimientos asociados a la sustitución de acristalamientos por UVA de diferentes espesores, en cualquier caso sensiblemente superiores a los originales,
- evaluación de la existencia y, en su caso, idoneidad de los sistemas de regulación de la transmisión energética que permitan responder a los cambios cíclicos y no cíclicos en temperaturas, humedades e iluminación (sombreamiento, aislamiento móvil, sistemas de control de flujo de aire,...),
- incorporación de sistemas de control de flujo de aire en carpinterías que permitan la ventilación de los espacios, los cerramientos y los ocupantes en condiciones de confort para estos últimos,

- incorporación, si no los hubiera, de elementos regulables de control solar (sombreamientos modulables) y de aislamiento térmico (elementos no incluidos en el acristalamiento, vidrios inteligentes o “adaptativos”...)

Un caso especial es la generación de espacios con cerramientos energéticamente muy heterogéneos mediante

el cierre de terrazas con elementos acristalados, y destinados a diferentes usos -ampliación del espacio habitable, aislamiento acústico, aislamiento térmico... - en los que es necesario determinar su balance energético como zona térmica específica de forma previa a la intervención en los elementos de la envolvente térmica.

5. Casos prácticos

Rehabilitación y regeneración urbana en el distrito de Lehen. Salzburgo (Austria)

Proyecto Green Solar Cities, parcialmente financiado por la Comisión Europea a través del Programa CONCERTO.

Población incluida: 3 210 personas

Ahorros energéticos previstos: 379 MWh/a (375 MWh/a energía eléctrica y 4,06 MWh/a energía térmica)

Producción energética mediante energías renovables: 13 MWh/a (12 MWh/a energía eléctrica y 1,025 MWh/a energía térmica)

Duración: 6 años

Se elige esta actuación como caso práctico debido a que en la misma coexisten factores considerados de interés para la renovación y regeneración urbanas y la rehabilitación de edificios en diferentes ámbitos:

- se plantea una intervención global en un barrio degradado y con un nivel dotacional y de servicios sociales bajo,
- se pretende alcanzar un nivel alto de sostenibilidad energética, social, y económica,
- el proceso se desarrolla con una fuerte implicación de los agentes sociales afectados: las asociaciones ciudadanas intervienen en la definición de necesidades y servicios, y los habitantes del barrio pueden intervenir a través de diferentes cauces,
- se recurre a una financiación pública combinada por parte de las administraciones locales y regionales y la Comisión Europea, garantizando una correcta gestión de los recursos económicos mediante una auditoría continuada,
- se combinan estrategias de rehabilitación energética de la envolvente con la incorporación de energías renovables en el entorno local,
- la antigüedad de los edificios hace que hayan sido sometidos a operaciones de rehabilitación energética puntuales (carpinterías, acristalamientos, dobles ventanas...) y/o parciales (cubierta), por lo que **el diagnóstico cobra especial importancia en el proceso.**

La actuación se desarrolla en el distrito de Lehen, un barrio de Salzburgo caracterizado por una alta densidad de población. Los edificios que componen el área son fundamentalmente edificios de vivienda plurifamiliar construidos entre los años 1950 y 1970, si bien la mayoría de ellos corresponden al primer periodo, recién finalizada la Segunda Guerra Mundial.

La estructura del distrito, obsoleta, se ha transformado en las últimas décadas: el estadio de fútbol se demuele, la gran manzana conteniendo el parque de negocios se abandona y los pequeños comercios se desplazan a centros comerciales o cierran.

El proyecto pretende la renovación del barrio mediante la creación de nuevos servicios, la rehabilitación de edificios funcionalmente obsoletos y la construcción de nuevos edificios residenciales y de servicios que respondan a la demanda de grupos específicos.

Además, se plantea un metro ligero como nuevo sistema de transporte público para el barrio.

El programa CONCERTO de la UE da soporte a esta iniciativa de transformación del distrito en un área sostenible de la ciudad.

En medio del área se libera una manzana de 43.000 m² de uso de servicios e industrial –algunos de los edificios se destinaban a diferentes usos del proveedor de energía del área- para construir un nuevo centro para el barrio: viviendas de alquiler para jóvenes y mayores, una guardería, una biblioteca, zonas verdes y una zona comercial.

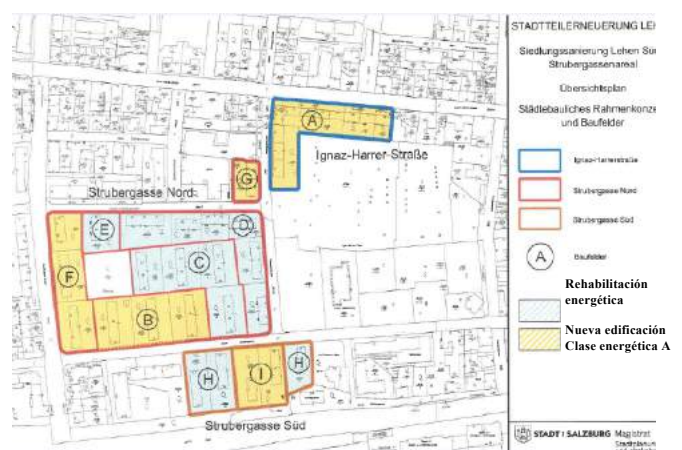
Dentro de esta área también se plantea la renovación de un edificio emblemático del paisaje de Salzburgo manteniendo su uso original de oficinas (el edificio PRISMA).

En el distrito, muchos de los edificios construidos en la década de los 50, pertenecientes a la administración de Salzburgo, requieren una renovación de sus sistemas energéticos, tanto de su envolvente térmica como de los sistemas de abastecimiento energético para ACS y calefacción. La operación recupera algunos de estos edificios para su adaptación a los estándares energéticos actuales, mientras que otros se demuelen para reestructurar el área y crear nuevas zonas exteriores de estancia y relación.

En el trazado urbano existente coexisten bloques exentos (volumetría aislada con viviendas pasantes) y configuraciones en manzana cerrada (edificios de viviendas entre medianeras) con diferente grado de conservación.

La operación, que contempla tanto la calidad de la edificación como su comportamiento energético, se concreta -tras un diagnóstico exhaustivo de la calidad estructural, existencia de infraviviendas, estado de las instalaciones y estado de la envolvente térmica- en la demolición de 12 bloques para construir en su lugar nuevas viviendas y la rehabilitación energética de 285 pisos.

El primero de los edificios que se rehabilita está situado en la esquina de Rudolf Biebel Straße y Kuenburggasse. Se trata de una manzana de edificios perteneciente a la entidad de vivienda social GSWB con 43 viviendas de alquiler.



Fuente: Proyecto Green Solar Cities

Fig. 28. Área de rehabilitación.

La configuración en manzana cerrada genera viviendas pasantes Norte-Sur y viviendas pasantes Este-Oeste. Las grandes dimensiones del patio interior de manzana hacen que éste actúe como una fachada más de la edificación.

El patio, con acceso peatonal a través de los bloques que encierran la manzana, es un área ajardinada de estancia y de juego.

En la operación se plantea la rehabilitación de la envolvente térmica y de sus sistemas de abastecimiento energético para calefacción y ACS, respetándose las distribuciones interiores de las viviendas.

Constructivamente, los edificios responden a la tipología de muro de carga de una sola hoja. El muro de carga es de ladrillo de 2 pies, revocado a cara externa y enfoscado a cara interna en fachadas. La transmitancia térmica U tiene un valor de $1,275 \text{ W/m}^2\text{K}$ en fachadas principales.

Las ventanas son las originales de la construcción, con más de 60 años, o bien han ido siendo sustituidas en actuaciones puntuales; en el primer caso las carpinterías son de madera y están muy degradadas, con descuadres y pudrición, generándose un fuerte intercambio de aire por infiltraciones a través de las mismas. La configuración del acristalamiento es variable, desde los originales de vidrio monolítico de 4 mm, subdividido por pequeños perfiles de madera (lo que supone aún un mayor intercambio térmico por infiltraciones) hasta UVA en configuraciones variables de cámara de aire desde 6 mm hasta 15 mm. La transmitancia U de las ventanas originales es $\approx 2,53 \text{ W/m}^2\text{K}$.

En las termografías de caracterización térmica del estado original, que han resultado una herramienta clave en la toma de decisiones, se observa la heterogeneidad del mantenimiento y de las soluciones adoptadas y las correspondientes variaciones en la transferencia energética a través de huecos.

El tipo de apertura de las ventanas es batiente, sin sistemas de control de flujo que permitan desarrollar estrategias de ventilación en condiciones de confort adecuadas para un clima con veranos benignos (las temperaturas medias de máximas de los meses de Julio y Agosto están en el entorno de los 23°C) pero muy húmedos (las humedades estivales llegan a alcanzar el 90%). En general carecen de sistema de sombreado y solo en algunos casos disponen de contraventanas interiores de madera.

La cubierta, de gran inclinación, se estructura en dos niveles, estando el inferior ocupado por viviendas en mansarda y actuando la parte superior como espacio de modulación térmica. Los forjados horizontales en contacto con la cubierta de las viviendas en mansarda han sido parcialmente renovados recientemente incluyendo un aislamiento horizontal de lana de roca -su transmitancia térmica es de $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ - por lo que no se incluyen en el proceso de rehabilitación. La cubierta, de estructura de madera, también ha sido parcialmente renovada (su transmitancia térmica tras la rehabilitación es de $0,19 \text{ W/m}^2\text{K}$), su nivel de ventilación es medio, y el sistema de cobertura dispone de nuevos acabados en cobre.

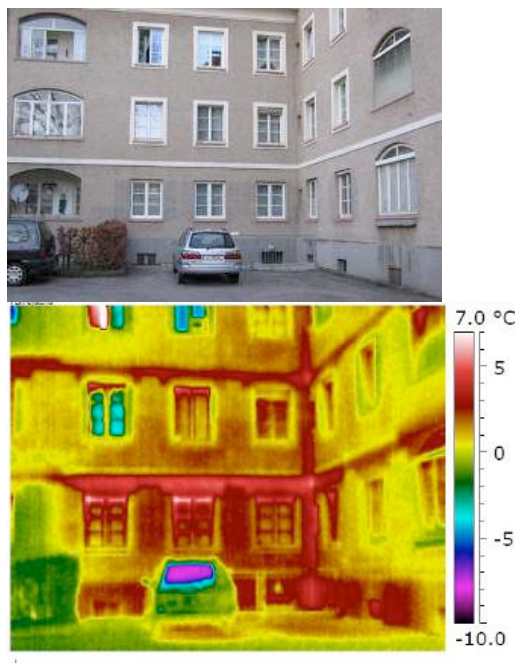
Las termografías (Fig. 30) muestran la heterogeneidad térmica en cubierta (a) y las grandes diferencias de comportamiento térmico entre la cubierta rehabilitada y las fachadas sin rehabilitar (b).

Los forjados horizontales en contacto con el sótano, con un valor U de $0,942 \text{ W/m}^2\text{K}$, se incluyen en el proceso de rehabilitación.

Mejoras propuestas

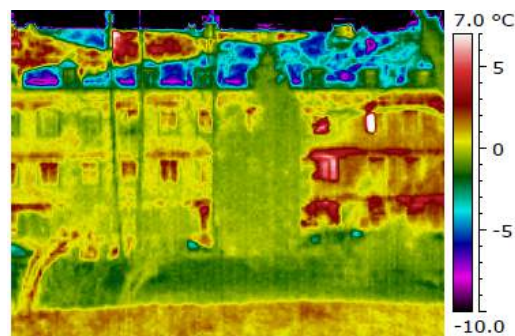
En las fachadas, la rehabilitación afecta al revoco, muy degradado, por lo que se combinan criterios energéticos y funcionales y se recurre al aislamiento a cara externa con 15cm de aislamiento semirrígido y revoco de mortero mineral.

La planeidad de las fachadas facilita el proceso, si bien el gran espesor de los aislamientos requiere actuaciones específicas en encuentro con huecos, balcones, terrazas cubiertas y zonas de arquería de paso a áreas peatonales.

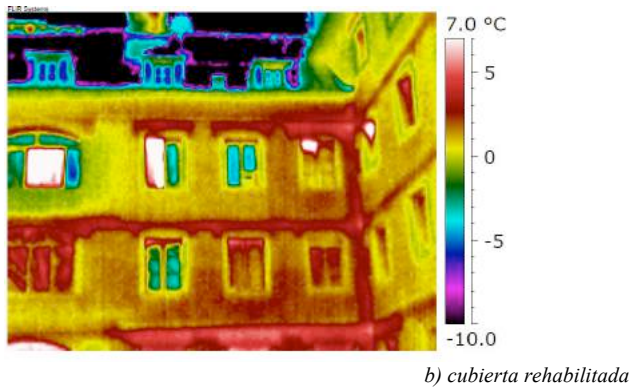


Fuente: Proyecto Green Solar Cities

Fig. 29. Caracterización térmica de fachadas previa a la rehabilitación.



a) heterogeneidad térmica en cubiertas



Fuente: Proyecto Green Solar Cities

Fig. 30. Termografías de la cubierta.



Fuente: Proyecto Green Solar Cities

Fig. 19. Caracterización térmica tras la rehabilitación.

Para evaluar la continuidad y la calidad de la puesta en obra del SATE realizado, se recurre al uso de termografías a lo largo del proceso de rehabilitación. En la Fig. 32 se observa la existencia de un puente térmico en el encuentro de fachadas con cubierta.

En ventanas, las carpinterías se sustituyen por otras de materiales plásticos y baja conductividad térmica con sistemas de apertura oscilobatientes que incluyen sistemas de acristalamiento con valores de $U < 2 \text{ W/m}^2\text{K}$. Como sistemas de regulación móviles se incorporan persianas de baja conductividad térmica.

En forjados horizontales en contacto con la cubierta procedentes de operaciones anteriores de rehabilitación, se añade aislamiento (lana de roca) hasta alcanzar valores de transmitancia térmica de $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$.

En forjados horizontales en contacto con sótano, se incorpora aislamiento semirrígido en cara inferior. El espesor del material aislante se limita, en este caso, a 9 cm. para mantener la altura libre dentro de criterios normativos. La transmitancia térmica se reduce hasta $0,26 \text{ W/m}^2\text{K}$.

En cubierta se incorpora aislamiento hasta alcanzar la homogeneidad térmica en valores de $0,19 \text{ W/m}^2\text{K}$, ajustándose materiales de aislamiento y sistemas a las configuraciones preexistentes.

La intervención en la envolvente térmica y la reducción de la demanda térmica asociada se recogen en la siguiente Tabla.

Tabla 5
Mejoras en los elementos de la envolvente térmica y ahorros energéticos asociados

| U (Wh/m ² K) | Antes de la rehabilitación* | Después de la rehabilitación | Valores máximos establecidos por la normativa energética |
|-------------------------|-----------------------------|------------------------------|--|
| Fachadas | 1,28 | 0,23 | 0,35 |
| Cubierta | 0,32 | 0,19 | 0,2 |



Fuente: Proyecto Green Solar Cities

Fig.31. Rehabilitación de fachadas y huecos.



| | | | |
|---|-------------------------------|------------------------------|-----|
| Forjados en contacto con espacio no acondicionado bajo cubierta | 0,26 | 0,15 | 0,4 |
| Forjado sobre sótano | 0,94 | 0,26 | 0,4 |
| Ventanas | 2,53 | 1,39 | 1,7 |
| Demanda energética | 133 kWh/m²a | 43 kWh/m²a | |

| | |
|--------------------------|------------|
| Ahorro energético | 67% |
|--------------------------|------------|

Nota: * Valores medios

Las intervenciones en la envolvente térmica se completan con sistemas de control higrotérmico en cada vivienda y con la sustitución de los sistemas de acondicionamiento térmico y ACS, la mayoría de carácter individual, por una conexión al nuevo sistema de distrito, gestionado en el área por una microrred y abastecido al 50% por energías renovables, mediante la combinación de colectores solares con bombas de calor aire-agua.

El campo de colectores, de 2000 m², se localiza en las cubiertas de los nuevos edificios construidos en la manzana central del área de actuación y se completa con un tanque de almacenamiento de 200000 litros, que actúa como elemento emblemático de la operación, visualizándose en su parte exterior la actividad de la planta solar.



Fuente: Proyecto Green Solar Cities

Fig. 33. Tanque de almacenamiento e instalación de campo solar en cubiertas.

6. Conclusiones

La rehabilitación del parque edificatorio no es un problema sencillo que pueda ser abordado de forma lineal sustentando las actuaciones posibles en el “cierre” del edificio a las condiciones ambientales exteriores. La singularidad del diagnóstico y las actuaciones en cada sistema energético se alejan, pues, del paradigma de actuación estabilizadora en el que se exageran los mecanismos conservativos del edificio y se ignoran las condiciones ambientales exteriores.

El edificio, especialmente en un entorno construido de habitación y relación como es el ámbito urbano, solo puede ser leído como parte de un sistema complejo con condiciones microclimáticas específicas en las que

cualquier actuación sobre uno de los elementos del sistema afecta al resto del sistema y a sus engranajes de funcionamiento energético.

Para abordar el problema de una forma acorde a la actual situación de crisis energética, ambiental y económica, la rehabilitación del edificio tiene necesariamente que aprovechar aquellas condiciones del medio ambiente exterior que colaboran al balance energético de los diferentes ciclos estacionales y diarios sin consumo energético ni emisiones contaminantes añadidas.

El edificio no es solo una “cáscara” que protege a los seres humanos de las condiciones ambientales hostiles: es también una máquina energética que respira y que se comunica con el exterior a través de sus diferentes órganos.

El espacio acondicionado requiere condiciones de confort térmico, lumínico y de calidad del aire interior que dependen del medio al que pertenece, lo que amplía la escala de la rehabilitación energética más allá del ámbito edificatorio hasta la manzana, el barrio, o la ciudad. La rehabilitación energética de un edificio que se relaciona con el exterior implica, inevitablemente, la actuación sobre ese “exterior” diverso para garantizar que ese flujo se genere en las condiciones adecuadas. La rehabilitación energética de los edificios está, pues, ineludiblemente ligada a la rehabilitación urbana si se pretende un cambio del modelo actual hacia patrones menos consumidores de energía y menos contaminantes.

Glosario

Calor específico: cantidad de calor que hay que suministrar a la unidad de masa de una sustancia o sistema termodinámico para elevar su temperatura en una unidad (kelvin o grado Celsius).

Compacidad: relación entre el volumen del espacio a acondicionar y la superficie que lo envuelve, configurada por los elementos de cerramiento.

Conductividad térmica: propiedad física de los materiales que mide la capacidad de conducción de calor. En el Sistema Internacional de Unidades la conductividad térmica se mide en W/m·K o en J/s m°C.

Confort térmico: sensación neutra de la persona respecto a un ambiente térmico determinado. Según la norma ISO 7730 el confort térmico “es una condición mental en la que se expresa la satisfacción con el ambiente térmico”. El confort térmico depende de varios parámetros globales externos, como la temperatura del aire, la velocidad del mismo y la humedad relativa, y otros específicos internos como la actividad física desarrollada, la cantidad de ropa o el metabolismo de cada individuo. Para llegar a la sensación de confort, el balance global de pérdidas y ganancias de calor debe ser nulo, conservando de esta forma nuestra temperatura normal, es decir cuando se alcanza el equilibrio térmico.

Densidad: cantidad de masa contenida en un determinado volumen. En el Sistema Internacional de Unidades la densidad se mide en kg/m³.

Envolvente del edificio: Según la normativa vigente, existen dos tipos de envolvente: la envolvente edificatoria, que es la que se compone de todos los cerramientos del edificio y la envolvente térmica, que se compone de los cerramientos del edificio que separan los recintos habitables del ambiente exterior y las particiones interiores que separan los recintos habitables de los no habitables que a su vez estén en contacto con el ambiente exterior.

Ganancias internas: aportaciones térmicas derivadas del uso del edificio y producidas tanto por la ocupación humana (calor generado por la actividad metabólica) como por la iluminación y a los equipos necesarios para el desarrollo de la actividad o uso del edificio.

Inclinación de la eclíptica: la eclíptica, formada por la intersección del plano de la órbita terrestre con la esfera celeste, es la línea curva por donde «transcurre» el Sol alrededor de la Tierra, en su «movimiento aparente» visto desde la Tierra a lo largo de un año. Se denomina plano de la Eclíptica al plano medio de la órbita de la Tierra alrededor del Sol y se encuentra inclinado unos 23° 27' con respecto al plano del Ecuador terrestre.

Permeabilidad al aire: es la propiedad de una ventana o puerta de dejar pasar el aire cuando se encuentra sometida a

una presión diferencial. La permeabilidad al aire se caracteriza por la capacidad de paso del aire, expresada en m³/h, en función de la diferencia de presiones.

Refrigeración evaporativa: proceso en el que se utiliza el calor para producir la evaporación de agua, reduciéndose así la temperatura.

Regiones cálidas: regiones en las que la estación predominante es el verano.

Regiones frías: regiones en las que la estación predominante es el invierno.

Salto térmico: diferencia de temperatura entre los diferentes ciclos climáticos: diferencia de temperatura entre el día y la noche en el ciclo diario o entre el invierno y el verano en el ciclo anual. Debido a esta diferencia debe ser especificado a que ciclo se refiere el salto térmico.

Subsistemas energéticos: elementos del sistema de acondicionamiento térmico que cumplen diferentes funciones en el mismo.

Listado de acrónimos y abreviaciones

ACS: Agua Caliente Sanitaria

CTE: Código Técnico de la Edificación

HVAC: Heating, ventilation, air conditioning (Calefacción, ventilación, aire acondicionado).

IAQ: Indoor Air Quality (Calidad del aire interior).

IDAE: Instituto para la Diversificación y el Ahorro de Energía

INE: Instituto Nacional de Estadística

nZEB: Edificios de Consumo de Energía Casi Nulo

RD: Real decreto

UE: Unión Europea

UVA: Unidad de vidrio aislante. Configurada por elementos de vidrio separados por una o más cámaras de aire que se han desecado para limitar el intercambio convectivo.

Referencias

[1] Esteban Nogera, J “Elementos de ordenación urbana”. Univ. Politèc. de Catalunya, 2001.

[2] Granados, H. “Principios de eficiencia energética en la arquitectura y el urbanismo”. Consejo Superior de los Colegios de Arquitectos de España (CSAE) 2006.

[3] Velasco, L “El movimiento del aire condicionante del diseño arquitectónico”. Ministerio de Fomento 2011.

[4] Ceresuela Puche, A “Rehabilitación ambiental con métodos tradicionales”. COAM 1985.

[5] Granados, H. “Rehabilitación energética”. Editorial Tornapunta 2010.

[6] Saint-Gobain “Manual del vidrio 2011”.



Agradecimientos

DEPARTAMENTO DE MEDIO AMBIENTE, PLANIFICACION TERRITORIAL Y VIVIENDA DEL GOBIERNO VASCO
DEPARTAMENTO DE ARQUITECTURA DE LA UPV/EHU
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA DE LA UPV/EHU
GOBIERNO VASCO
FUNDACION CRISTINA ENEA
CLUSTER DEL EQUIPAMIENTO DE MADERA Y DISEÑO DEL PAIS VASCO
INSTITUTO DE FORMACIÓN PROFESIONAL EASO DE SAN SEBASTIÁN
INSTITUTO DE FORMACIÓN PROFESIONAL IZARRAITZ LANBIDE HEZIKETA DE AZKOITIA
COLEGIO OFICIAL DE ARQUITECTOS VASCO NAVARRO

Este segundo Tomo de la publicación Arquitectura Ecoeficiente forma parte de "Arksostind! Proyecto para el fomento de una arquitectura sostenible, eficiente e industrializada". El objetivo es seguir difundiendo conocimiento científico, técnico y práctico en el campo de la eficiencia energética y la sostenibilidad en la edificación y el urbanismo. El primer tomo de Arquitectura Ecoeficiente puede descargarse gratuitamente en: <https://web-argitalpena.adm.ehu.es>

El proyecto Arksostind! financiado por el Programa Eraikal 2016, Departamento de Medio Ambiente, Planificación Territorial y Vivienda del Gobierno Vasco, ha sido desarrollado entre la E.T.S. de Arquitectura de la UPV/EHU, Habic - el Cluster del Equipamiento, Madera y Diseño del País Vasco, el instituto de Formación Profesional Easo de San Sebastián, el instituto de Formación Profesional Izarraitz Lanbide Heziketa de Azkoitia y el Colegio Oficial de Arquitectos Vasco Navarro.

