

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN
INGENIERÍA ENERGÉTICA SOSTENIBLE**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

***ANÁLISIS DE LAS POSIBILIDADES DE
VALORIZACIÓN DE LA ESCORIA NEGRA
DE HORNO DE ARCO ELÉCTRICO EN LA
COMUNIDAD AUTÓNOMA DEL PAÍS
VASCO***

Estudiante	<i>Astorgano, Rodera, Patricia</i>
Director/Directora	<i>Rozas, Guinea, Saroa</i>
Curso académico	<i>2019/2020</i>

Bilbao, 31 de Agosto del 2020

ÍNDICE

LISTA DE ILUSTRACIONES	I
LISTA DE TABLAS	II
LISTA DE GRÁFICOS	II
LISTA DE ABREVIATURAS	IV
RESUMEN	V
1 INTRODUCCIÓN.....	1
2 CONTEXTO.....	3
2.1 EUROPA.....	3
2.2 ESPAÑA	5
2.3 PAIS VASCO	6
3 JUSTIFICACIÓN DE LA ELECCIÓN	9
4 OBJETIVO.....	9
5 GENERACIÓN DE ESCORÍAS DE ACERÍA	9
5.1 LA INDUSTRIA DEL ACERO.....	11
5.2 PROCESOS DE PRODUCCIÓN DEL ACERO	12
5.3 ACERÍA DE ARCO ELÉCTRICO.....	13
5.3.1 VOLUMEN Y DISTRIBUCIÓN DE HORNOS DE ARCO ELÉCTRICO	13
5.3.2 MATERIAS PRIMAS.....	15
5.3.3 COMPONENTES DE LOS HEA.....	19
5.3.4 PROCESO PRODUCTIVO DEL ACERO	21
5.3.5 RESIDUOS EN LA PRODUCCIÓN DEL ACERO	28
5.3.6 VOLUMEN DE ESCORÍA DE ACERÍA DEL HAE	30
5.4 PROPIEDADES DE LAS ESCORIAS DE ACERÍA.....	33
5.4.1 ESCORIAS NEGRAS DE ACERÍA	33
5.4.2 ESCORIAS BLANCAS.....	36
6 VALORACIÓN DE LA ESCORIA EN EL SECTOR DE LA CONSTRUCCION	39
6.1 TRATAMIENTO DE LA ESCORIA	41
6.1.1 ALMACENAMIENTO DE LA ESCORIA NEGRA.....	42
6.1.2 ENVEJECIMIENTO O ESTABILIZACIÓN DE COMPUESTOS EXPANSIVOS	42

6.1.3	MACHAQUEO O MOLINO PRIMARIO	44
6.1.4	DESFERRETIZACIÓN O SEPARACIÓN MAGNÉTICA	45
6.1.5	CRIBADO.....	45
6.1.6	ACOPIO DIFERENCIADO POR FRACCIONES DE MATERIAL GRANULAR SIDERÚRGICO	45
6.1.7	CARACTERIZACIÓN DEL ÁRIDO SIDERÚRGICO	46
6.2	UNIDADES DE OBRA DE IMPLANTACION	49
6.2.1	APLICACIONES LIGADAS.....	50
6.2.2	APLICACIONES NO LIGADAS BAJO COBERTURA NO TOTALMENTE IMPERMEABLE	60
6.2.3	APLICACIONES NO LIGADAS BAJO COBERTURA DE ALTA IMPERMEABILIZACIÓN	64
6.3	CONTRATACIÓN PÚBLICA VERDE EN LA CAPV.....	68
6.4	BUENAS PRÁCTICAS DE VALORIZACIÓN DE ESCORIA NEGRA EN LA AUTORIDAD PORTUARIA DE BILBAO	69
6.4.1	OBRAS DESARROLLADAS POR LA AUTORIDAD PORTUARIA	71
6.4.2	RESULTADOS	75
7	VALORIZACIÓN EN EL SECTOR DE LA ENERGÍA.....	77
7.1	EL ALMACENAMIENTO TÉRMICO.....	77
7.1.1	SISTEMAS DE LECHO FIJO.....	79
7.2	PROYECTO EUROPEO RESLAG.....	82
7.2.1	MATERIAL DE ALMACENAMIENTO DE CALOR PARA LA RECUPERACIÓN DE CALOR RESIDUAL EN LA INDUSTRIA.....	85
7.2.2	MATERIA PRIMA PARA SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA TÉRMICA EN APLICACIONES DE ENERGÍA SOLAR POR CONCENTRACIÓN.....	95
7.3	CASO PRÁCTICO. IMPLEMENTACIÓN DE SAT EN LOS HAE DE LA CAPV	104
7.3.1	OBJETIVO.....	104
7.3.2	BALANCE ENERGÉTICO DE UN HORNO DE ARCO ELÉCTRICO.....	106
7.3.3	ELECCIÓN DE LA TURBINA PARA LA GENERACIÓN ELÉCTRICA.....	107
7.3.4	METODOLOGÍA DE CÁLCULO	109
7.3.5	CONCLUSIONES.....	116
8	VALORACIÓN PERSONAL.....	119

9	BENEFICIOS DE LA VALORIZACIÓN DE LA ESCORIA	121
10	CONCLUSIONES	123
11	REFERENCIAS.....	125
	ANEXO 1. ESQUEMA DE LA METODOLOGÍA DE CÁLCULO.....	a
	ANEXO 2. BALANCE ENERGÉTICO DEL HORNO DE ARCO ELÉCTRICO.....	b
	ANEXO 3. CÁLCULOS ENERGÉTICOS DEL CASO PRÁCTICO	c

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Clasificación de la escoria según su procedencia [11].....	10
Ilustración 2. Procesos de producción del acero [PEMIGSA]	12
Ilustración 3. Mapa de localización de las acerías de horno de arco eléctrico en España [10]	14
Ilustración 4. Chatarra para la producción de acero [UNESID].....	16
Ilustración 5. Polvo de carbón [CARBOTECNIA].....	18
Ilustración 6. Producto de cal [CALTEK].....	18
Ilustración 7. Sección de un horno de arco eléctrico [WORDPRESS]	20
Ilustración 8. Proceso de desescoriado del horno de arco eléctrico [STEELMIT].....	23
Ilustración 9. Proceso de desfosforación del acero [STEEMIT]	23
Ilustración 10. Influencia de las condiciones de la escoria sobre el grado de desfosforación del baño de acero [25]	24
Ilustración 11. Proceso de metalurgia primaria [STEELMIT]	24
Ilustración 12. Proceso de afino en el horno cuchara [STEELMIT]	25
Ilustración 13. Influencia de las condiciones de la escoria sobre el grado de desulfuración del baño de acero [25]	27
Ilustración 14. Aglomeración de polvos de acería de aceros inoxidables. [CSIC].....	28
Ilustración 15. Cascarilla de laminación proveniente del proceso de laminación. [GERDAU DIACO S.A].....	28
Ilustración 16. Arenas de fundición. [xx]	29
Ilustración 17. Refractarios para horno de arco eléctrico [DEGUIZA S.L.U.].....	29
Ilustración 18. Escorias negras de acería [GIKESA]	30
Ilustración 19. Escorias negras tras su extracción del horno y enfriamiento [CEDEX].....	34
Ilustración 20. Procesos de envejecimiento y maduración de escoria negra [18]	43
Ilustración 21. Planta móvil de machaqueo de escoria negra [KLEEMANN].....	44
Ilustración 22. Sistema de cribas de material granular procedente del tratamiento de escoria negra [18].....	45
Ilustración 23. Acopio de fracciones diferenciadas de árido siderúrgico sobre capa impermeable [18]	46
Ilustración 24. Cajón de hormigón para diques portuarios [18]	52
Ilustración 25. Hormigón de limpieza bajo zapata [18].....	53
Ilustración 26. Hormigón de relleno no estructural en trasdós de muro de fábrica [18]	54
Ilustración 27. Capa inferior de pavimento hormigón bicapa [18].....	55
Ilustración 28. Hormigón magro vibrado en base de pavimento de hormigón [18].....	56
Ilustración 29. Gravacemento con árido siderúrgico (escoria cemento) en base y subbase de carretera [18]	57
Ilustración 30. Hormigón bituminoso con árido siderúrgico en pavimento flexible [18]	58
Ilustración 31. Mezcla bituminosa para capa de rodadura base y/o intermedia [18]	59

Ilustración 32. Árido siderúrgico en espaldón de terraplén [CT1].....	61
Ilustración 33. Capas de cubrición de vertederos [18]	62
Ilustración 34. Sub-balasto de vías férreas [18].....	63
Ilustración 35. Apantallamiento sónico en forma de dique [18].....	64
Ilustración 36. Base y subbase de vías ciclistas o peatonales [18]	65
Ilustración 37. Relleno de tipo terraplén [18].....	67
Ilustración 38. Relleno de cajones de hormigón [18]	68
Ilustración 39. Obra de prolongación del dique de Punta Sollana en el Puerto de Bilbao [APB]	72
Ilustración 40. Espaldón del dique de Punta Sollana en el Puerto de Bilbao [APB]	72
Ilustración 41. Acopio de bloques de reposición en la explanada de Punta Sollana [APB]	73
Ilustración 42. Compactado de la pavimentación en la explanada de muelle Punta Sollana en el Puerto de Bilbao [APB].....	74
Ilustración 43. Explanada mejorada del espigón central en el Puerto de Bilbao [APB]	75
Ilustración 44. Esquema de la termoclina y del funcionamiento en la operación de carga (izquierda) y de descarga (derecha) [42]	80
Ilustración 45. Planta piloto de ESC Ait Baha en Marruecos [43].....	81
Ilustración 46. Concepto principal del proyecto RESLAG [6].....	83
Ilustración 47. Detalles del Proyecto RESLAG [45]	84
Ilustración 48. Mapa de distribución europea de industrias productivas de acero [47]	86
Ilustración 49. Configuración de la instalación piloto experimental construida en ArcelorMittal [6].....	89
Ilustración 50. Fase de montaje de la SAT piloto experimental en ArcelorMittal, Sestao [52]	89
Ilustración 51. Tanque de lecho fijo compacto instalado en ArcelorMittal [52].....	90
Ilustración 52. Tanque de lecho fijo de ArcelorMittal cargado de escoria negra [52]	91
Ilustración 53. Fases y tiempos de operación de horno de arco eléctrico [Elaboración propia]	92
Ilustración 54. Esquema de una Planta Solar por Concentración Directa [ARCHIMEDES SOLAR ENERGY]	96
Ilustración 55. Planta piloto de energía solar por concentración Julich Solar Tower [INSTITUTE OF SOLAR RESEARCH]	97
Ilustración 56. Configuración de la instalación piloto experimental Julich Solar Power [6] ...	99
Ilustración 57. Unidad experimental de almacenamiento térmico Julich Solar Tower [SOLAR PACES]	100
Ilustración 58. Variantes de tanques de almacenamiento térmico analizados para aplicaciones ESC [60]	101
Ilustración 59. Diseño del tanque de almacenamiento térmico instalado en el Julich Solar Tower [63].....	102

Ilustración 60. Escoria negra dentro del tanque de almacenamiento térmico de la planta piloto Julich Solar Tower [63]	103
Ilustración 61. Características ORC vs turbina de gas [67]	108
Ilustración 62. Esquema de recuperación de calor mediante SAT y turbina ORC [Elaboración Propia].....	109
Ilustración 63. Turbina ORC para recuperación de calor en el HAE de ORI Martin, Brescia, Italia [TURBODEN].....	112
Ilustración 64. Los 4 pilares básicos para una transición hacia un desarrollo sostenible. [Elaboración Propia].....	123

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Producción de acero en 2018 de los 16 primeros países en toneladas. [24]	11
Tabla 2. Producción española de acero en 2018 [10].....	15
Tabla 3. Producción anual de escorias de acería [Elaboración Propia]	31
Tabla 4. Clasificación de las escorias de acería en función del tipo de escoria (2018) [Elaboración Propia].....	32
Tabla 5. Propiedades físicas de los áridos procedentes de escorias negras [30]	35
Tabla 6. Composición química de las escorias negras de acería [27] [31] [32]	35
Tabla 7. Composición química de la escoria de acería española [30]	36
Tabla 8. Propiedades físicas de las escorias blancas [33]	37
Tabla 9. Composición química de las escorias blancas de acería [11].....	38
Tabla 10. Ejemplos de valorización de árido siderúrgico en el sector de la construcción de la CAPV [20]	39
Tabla 11. Tipos de aplicación de los áridos siderúrgicos, condiciones de usos y elementos de impermeabilización [15]	47
Tabla 12. Valores límite de contenido total de metales en árido siderúrgico para aplicaciones no ligadas [15].....	48
Tabla 13. Valores límite de lixiviación de árido siderúrgico en aplicaciones no ligadas para Tipos 2 y 3 [35].....	49
Tabla 14. Frecuencia de muestreo y control de la producción de árido siderúrgico [15].....	49
Tabla 15. Obras con árido siderúrgico llevadas a cabo en el Puerto de Bilbao [APB].....	71
Tabla 16. Coste y eficiencia de diferentes tecnologías de almacenamiento energético [39].	78
Tabla 17. Resumen de las principales características del SAT [42]	91
Tabla 18. Principales parámetros operativos de la unidad de almacenamiento [42].....	93
Tabla 19. Balances de energía y eficiencia [42]	94
Tabla 20. Características de la planta de demostración Julich Solar Power en Alemania [62]	98
Tabla 21. Especificaciones de planta de ESC de aire a gran escala [60]	101
Tabla 22. Características de la escoria de acería [64].....	102
Tabla 23. Especificaciones del tanque de almacenamiento térmico de la instalación piloto [63]	103
Tabla 24. Nivel de tensión para grandes consumidores [BOE].....	113
Tabla 25. Peajes de alta tensión de 6 periodos tarifarios. [BOE]	113
Tabla 26. Cálculos para la determinación del volumen del SAT necesarios [Elaboración Propia]	115
Tabla 27. Cálculos para la determinación de la cantidad de escoria necesaria para los SAT [Elaboración Propia].....	116

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Evolución de la generación de escorias de acería en la CAPV años 2010-2018. [Elaboración Propia].....	32
Gráfico 2. Distribución de la generación de Escorias de Acería por territorio histórico [Elaboración Propia].....	33
Gráfico 3. Tratamientos previos de la escoria para su utilización como árido siderúrgico [APB]	41
Gráfico 4. Potencial de calor residual por sector industrial para la UE en 2015 [46].....	85
Gráfico 5. Esquema de la metodología de cálculo [Elaboración propia].....	105
Gráfico 6. Balance energético de un horno de arco eléctrico [Elaboración propia]	106

LISTA DE ABREVIATURAS

CAPV	Comunidad Autónoma del País Vasco
EA	Ecologistas en Acción
ESC	Energía Solar por Concentración
HAE	Horno de Arco Eléctrico
MAT	Material de Almacé
ORC	Organic Rankine Cycle
RCR	Recuperación de calor residual
SAT	Sistema de Almacenamiento Térmico

RESUMEN

Historicamente el País Vasco ha sido un territorio una gran actividad industrial, sobre todo en el ámbito de la fabricación de acero. Por ello, a día de hoy es la comunidad autónoma que más residuos de la industria metalúrgica genera de toda España, donde la mayor parte de ellos son constituidos por la escoria negra de acería, alrededor de 370.000 toneladas de escoria anualmente.

A pesar de que un gran volumen de esa escoria es valorizada por sectores como el de la construcción o la propia industria metalúrgica, una gran parte de la escoria negra de acería se desecha en vertederos vascos, cifra que ha aumentado en los últimos años, con el consiguiente impacto ambiental que ello supone.

Teniendo en cuenta la necesidad de identificar nuevas posibilidades de valorización de la escoria de acería, y el gran margen de mejora en materia de recuperación de calor residual de la industria vasca, detallado por el Ente Vasco de la Energía en sus informes anuales, el uso de la misma como material de almacenamiento térmico, se presenta como una potencial posibilidad de valorización en un sector estratégico como es el sector de la energía.

Por lo que, con el fin de fomentar las prácticas de valorización energética, en el presente documento, además de analizar las propiedades físico-térmicas de la escoria, se realizado un análisis de los beneficios económicos, energéticos y ambientales que traería consigo la valorización de la escoria, como materia prima para sistemas de almacenamiento térmico, si estos fueran instalados en todos los hornos de arco eléctrico de la Comunidad Autónoma del País Vasco.

Así mismo, esta posibilidad de valorización energética, junto con diversas posibilidades impulsadas por la administración pública vasca en el sector de la construcción, constituirían un gran paso para la Comunidad Autónoma del País Vasco hacia una economía más circular donde la escoria pasaría de ser considerada como un residuo depositado en vertedero, a considerarse como un subproducto de bajo coste y altas prestaciones.

Historically, the Basque Country has been a territory of great industrial activity, especially in the field of steel manufacturing. For this reason, today it is the autonomous community that generates the most waste from the metallurgical industry in all of Spain, where most of it is made up of black steel slag, around 370,000 tons of slag annually.

Despite the fact that a large volume of this slag is valued by sectors such as construction or the metallurgical industry itself, a large part of black steel slag is disposed of in Basque landfills, a figure that has increased in recent years, with the consequent environmental impact that this entails.

Taking into account the need to identify new possibilities for the recovery of steel slag, and the great room for improvement in terms of waste heat recovery from the Basque industry, detailed by the Basque Energy Agency in its annual reports, the use of it as a thermal storage material, it is presented as a potential possibility of recovery in a strategic sector such as the energy sector.

Therefore, in order to promote energy recovery practices, in this document, in addition to analyzing the physical-thermal properties of slag, an analysis of the economic, energy and environmental benefits that the recovery of slag, as a raw material for thermal storage systems, if these were installed in all electric arc furnaces in the Autonomous Community of the Basque Country.

Likewise, this possibility of energy recovery, together with various possibilities promoted by the Basque public administration in the construction sector, would constitute a great step for the Autonomous Community of the Basque Country towards a more circular economy where slag would go from being considered as a waste deposited in a landfill, to be considered as a low cost and high performance by-product.

Historikoki, Euskal Herria industria jarduera handiko lurraldea izan da, batez ere altzairugintzaren alorrean. Hori dela eta, gaur egun Espainiako metalgintzako industriatik hondakin gehien sortzen duen autonomia erkidegoa da, gehienak altzairu beltzezko zepaz osatuta daude, urtero 370.000 tona zepa inguru.

Nahiz eta zepa horren kopuru handia eraikuntza edo metalurgia industria bezalako sektoreek baloratzen duten, altzairuzko zepa beltzaren zati handi bat euskal zabortegietara botatzen da, azken urteetan gora egin duen kopurua horrek dakarren ingurumen-inpaktua.

Altzairuzko zepak berreskuratzeko aukera berriak identifikatzeko beharra eta euskal industriaren hondakinen beroa berreskuratzeko hobetzeko aukera bikaina kontuan hartuta, Energiaren Euskal Erakundeak bere urteko txostenetan zehazten duen erabilera kontuan hartuta biltegiatze termikoko material gisa, energia sektorea bezalako sektore estrategiko batean berreskuratzeko aukera gisa aurkezten da.

Hori dela eta, energia berreskuratzeko praktikak sustatzeko, dokumentu honetan, zepen propietate fisiko-termikoak aztertzeaz gain, berreskuratzeak dakartzan onura ekonomikoak, energetikoak eta ingurumenekoak aztertzen ditu. zepak, biltegiatze termikoko sistematarako lehengai gisa, horiek Euskal Autonomia Erkidegoko arku elektrikoko labe guztietan instalatuko balira.

Era berean, energia berreskuratzeko aukera hori, euskal administrazio publikoak eraikuntzaren sektorean sustatutako hainbat aukerarekin batera, urrats handia izango litzateke Euskal Autonomia Erkidegoarentzat ekonomia zirkularrago baterantz. zabortegian gordetako hondakina, kostu baxuko eta errendimendu handiko azpiproduktu gisa kontsideratzeko.

1 INTRODUCCIÓN

En los últimos cien años el consumo mundial per cápita de materiales se ha duplicado y el de energía primaria se ha triplicado. Además, la población se ha multiplicado casi por cinco entre 1900 y 2019. Estos dos factores han aumentado significativamente tanto la presión sobre los recursos naturales, como la magnitud de los impactos sobre el medio ambiente, definiendo una clara tendencia a futuro: las necesidades de recursos naturales se triplicarán en 2050 y la demanda de alimentos aumentará en un 70 %. [1] Por ello, se requiere un cambio de paradigma en la forma de producir y consumir: pasar de una economía lineal a una economía circular.

La economía circular aporta dos tipos de beneficios: ambientales y económicos. Los beneficios ambientales directos están asociados a un menor consumo de recursos, a una menor producción de residuos y a una mejor gestión de éstos. Pero también existen muchos otros beneficios asociados en diferentes ámbitos como el cambio climático. En esta línea, la Comisión Europea ha manifestado que, de cumplirse su «Paquete de Economía Circular», se generaría una reducción anual de entre el 2 y el 4% de las emisiones de gases de efecto invernadero de la Unión Europea.

En la actualidad la economía circular en Euskadi supone el 1,12% del Producto Interior Bruto, con unos ingresos brutos anuales de 764 millones de euros. En términos de empleo, existen 18.463 empleos relacionados con economía circular, es decir, el 2,08% del total de empleo en la CAPV. Este valor es superior al de España y de Alemania, con un 2,00% y un 1,71% respectivamente de empleos relacionados con la economía circular. [2]

Euskadi genera anualmente 5,8 millones de toneladas de residuos, de los cuales un 53% son reciclados, sin embargo, todavía existe margen para la mejora. Por otro lado, la dependencia de la industria vasca de las materias primas importadas es del 77%, mientras que aún se desechan materiales en vertederos vascos valorados en casi 45 millones de euros anuales. [3]

De acuerdo al “Diagnóstico de Economía Circular en la Industria del País Vasco” si se acometieran soluciones innovadoras más circulares, se estima hasta un ahorro potencial medio del 6% en el consumo de materias primas y gestión de residuos, lo que supondría ahorros de 2.000 millones de euros en la industria vasca. [3] Los sectores del metal (siderurgia, fundición, productos metálicos) y movilidad (automoción, aeronáutico) acumularían la mitad del ahorro potencial de la industria vasca.

Por lo tanto, para alcanzar un modelo de economía circular, se determina como prioritaria la reutilización de los residuos generados por las actividades industriales, permitiendo la

valorización de los mismos como materias primas para otras actividades. Más concretamente, una de las actividades industriales que más residuos genera, es la industria metalúrgica que suministra los metales, principalmente aceros, a diversos sectores como el de la construcción o la automoción. Esta industria, produce una gran variedad de residuos industriales, entre los que destacan por su mayor proporción las escorias. [4]

Las propias industrias de producción del acero, empujadas por la conciencia de sostenibilidad y la normativa sobre economía circular que la ha rodeado, han desarrollado técnicas de estudio de sus residuos para poder reutilizarlos en diferentes campos, esta reutilización de los residuos se denomina valorización. Ya que el desarrollo de estas técnicas se encuentra en una fase principalmente inicial, se puede considerar que existen lagunas en el conocimiento de la valorización de los residuos o reutilización de los mismos.

Por ello, el objetivo principal objetivo del presente estudio, es analizar las posibilidades de valorización de la escoria negra de acería, procedente de la modalidad de producción del acero más extendida en Euskadi, el horno de arco eléctrico, en distintos sectores estratégicos, como son, el sector de la construcción y el sector de la energía, siempre desde un enfoque local. El uso de la escoria negra como materia prima para aplicaciones en dichos sectores estratégicos, afecta principalmente a tres grandes sectores de nuestra sociedad; los aspectos ambientales, sociales y económicos.

En cuanto a los aspectos ambientales, la valorización de las escorias conlleva una disminución en el consumo de los recursos naturales no renovables, así como la energía necesaria para la extracción de tales recursos, mientras que elimina el impacto ambiental que producen los vertidos de residuos, disminuyendo los efectos negativos de la producción industrial sobre la fauna y flora, y aliviando problemas medioambientales generados en parte por la actividad humana como puede ser el calentamiento global.

Atendiendo a los aspectos económicos, actualmente, la escoria negra se encuentra en una transición de definición, pasando de ser un residuo a un subproducto de la producción del acero. Aunque existen numerosos organismos de reputación como EUROSLAG, European Slag Association, que solicitan considerar la escoria como un subproducto de la producción del acero, en la actualidad, las normativas de distintas regiones europeas difieren en considerar la escoria como un residuo o como un subproducto de la industria metalúrgica. [5]

Lo cierto es, que la consideración de la escoria como subproducto, conllevaría grandes ventajas económicas por el ahorro para las empresas de los cánones de vertido y por los ingresos de la comercialización de las mismas, ya que su presencia en la producción del acero es irrevocable dada la naturaleza del proceso industrial como en siguientes apartados del análisis podremos observar.

Además, la valorización de la escoria, no solo traería beneficios a las industrias generadoras de la escoria o a la sociedad en materia medioambiental, sino que, también traería consigo beneficios económicos a los usuarios finales de la misma, debido a su bajo coste y a las potenciales propiedades mecánicas de esta como árido para aplicaciones constructivas, así como, térmicas para aplicaciones energéticas, abriendo una clara línea de negocio sostenible.

Por último se deben tener en cuenta los aspectos sociales que conlleva la valorización de las escorias, entre los que se encuentran que se deben garantizar las mismas capacidades a la escoria en sus campos de aplicación que como si con los medios tradicionales se tratase y se deben asegurar que su utilización no afectará a la salud humana ni a factores medioambientales.

2 CONTEXTO

2.1 EUROPA

En Europa, desde años que se toma conciencia sobre una el concepto de “economía circular”, el cual, comienza su andadura oficial a finales de 2015 con la publicación por parte de la Comisión Europea de la Comunicación “Cerrar el círculo: un Plan de Acción de la UE para la economía circular”.

Esta Comunicación, que viene acompañada por la propuesta de modificación de varias Directivas de residuos, constituye hoy en día la hoja de ruta de las prioridades y líneas de acción de la UE para convertir la problemática de los residuos en una oportunidad de transición hacia otro modelo de producción más sostenible, donde los residuos son valorizados y no depositados en vertederos.

Más concretamente, se determinó como prioritario fomentar la valorización de las escorias de acería, que ya se venían valorizando en determinados sectores como el metalúrgico o la construcción, pero solo una parte del total y sin un marco normativo común.

El hecho de determinar como prioritaria la valorización de las escorias, vino motivado por la gran producción de acero de los países miembros, lo cual trae consigo una gran cantidad de residuos que se depositan anualmente en los vertederos Europeos sin una valorización efectiva. Según datos del 2012, la industria siderúrgica europea generó alrededor de 21,4 millones de toneladas de escoria como resultado de la fabricación del acero. [6]

Por lo tanto, impulsado por los principios de Economía Circular en el ámbito de la valorización de la escorias de acería, Europa ha desarrollado diversos proyectos para impulsar la definición de normas de utilización e investigaciones en torno a nuevas líneas de valorización.

Uno de ellos, es la creación de una asociación europea de productores y gestores de escorias metalúrgicas, llamada EUROSLAG, que pretende fomentar el mercado de la escoria como un subproducto valorizable y definir estándares europeos que regulen las condiciones de uso de la escoria. A día de hoy las normas más importantes para el uso en el sector de la construcción y como fertilizante. [5]

Además, mencionar la puesta en marcha del proyecto RESLAG, un proyecto Horizonte 2020 de para el desarrollo de 4 aplicaciones alternativas de valorización de la escoria de acería, que se probarán en 4 pilotos de demostración a gran escala. El proyecto, desarrollado entre 2014 y 2019, cuenta con 19 socios de 8 países, de los cuales 4 se ubican en la CAPV. Las cuatro aplicaciones contempladas son: [6]

- Extracción de metales de alto valor agregado.
- Sistemas de almacenamiento de energía térmica para aplicaciones de recuperación de calor.
- Sistemas de almacenamiento de energía térmica para aplicaciones de energía solar concentrada.
- Materia prima para la fabricación de refractarios aislantes moldeables.

Por otro lado, en los últimos años, ciertos países de la Unión Europea han fomentado la valorización de las escorias de acería mediante normativa que regula su uso y su gestión.

Un claro ejemplo, es Alemania, que ha publicado en el año 2017 la “Ordenanza sobre la introducción de un reglamento sustitutivo de los materiales de construcción, para su refundición con la Ordenanza Federal de Protección del Suelo y Sitios Contaminados y que modifica la Ordenanza sobre vertidos y Ordenanza sobre residuos comerciales”. El objeto de esta ordenanza es la regulación a escala federal del uso como materiales de construcción de productos procedentes de procesos de producción industrial o de plantas de tratamiento de residuos, garantizando la protección del suelo y de las aguas subterráneas, donde destaca el uso de escoria siderúrgica como material de construcción. [7]

Otro ejemplo, es Reino Unido, donde en 2016, se publicó el “Protocolo de Calidad de agregado de escorias de acería” que recoge, entre otros, las condiciones para que el material no sea considerado residuo, los usos a los que puede ser destinado, todos ellos en el ámbito de la construcción (agregados para subbases, cubiertas, rellenos, camas de tuberías, agregados para asfaltos y hormigones, etc.) y los estándares de calidad a satisfacer en función del uso al que van a ser destinados. [8]

2.2 ESPAÑA

España, sigue los pasos de la Unión Europea en material de economía circular, donde una menor generación de residuos y la correcta gestión y valorización de los mismos, son los pilares principales. Fruto de ello, el Gobierno de España a publicado en los últimos años el plan “España Circular 2030: Estrategia Española de Economía Circular”, el “Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos 2016-2020” y “Programa Estatal de Gestión de Residuos”.

En todos ellos, las escorias son consideradas como un residuo voluminoso poco valorizado, siendo el sector de la construcción y la propia industria metalúrgica los únicos valorizadores. Con el fin de impulsar el uso de la escoria de acería en España y reducir su deposición en vertedero, se han definido y publicado diversas normativas que abordan de manera específica la valorización de las escorias.

Como uno de los mayores logros en materia de valorización de las escorias se tiene el “Proyecto de Real Decreto por el que se aprueba el Código Estructural” pretende derogar el “Real Decreto 1247/2008, de 18 de julio, por el que se aprueba la instrucción de hormigón estructural (EHE-08), para aprobar un nuevo Código que actualice las condiciones asociadas no solo a las estructuras de hormigón y de acero, sino también a las estructuras mixtas (formada por hormigón y acero). [9]

En su artículo 30 referido a Áridos, el nuevo Código Estructural incluye un apartado 30.9 sobre Áridos siderúrgicos que establece la posibilidad de utilizar las escorias de acería como áridos siderúrgicos, además de cumplir con lo establecido para los áridos naturales, se comprobará previamente que son estables, es decir, que no contienen silicatos inestables ni compuestos ferrosos inestables.

Por otra parte, mencionar la creación de la asociación UNESID, es decir, la asociación española de empresas productoras de acero y de productos de primera transformación del acero, la cual recoge entre sus líneas de trabajo, la de maximización de la valorización de las escorias de acería.

Para ello durante 2015 UNESID contrató a una consultora de reconocido prestigio en la materia como apoyo técnico para revisar todas las normas de escorias actualmente en revisión con objeto de que los diferentes tipos de áridos siderúrgicos tengan una mejor cabida, así como redactar alguna documentación de apoyo que facilite la utilización de los mismos tanto para la licitación pública, como para su utilización por parte de las direcciones facultativas. En línea con esta actividad, se está trabajando en la preparación de un programa específico de actuación para la promoción de la utilización de las escorias. [10]

Así mismo, desde el Gobierno de España y con la colaboración del CEDEX, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, se ha fomentado desde el año 2010, la realización de ensayos que determinen las principales características mecánicas, físicas y térmicas de la escoria negra de acería. Entre dichos ensayos, se puede encontrar el UNE-EN 1744-1:2010: Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos o el NLT-361/91: Determinación del grado de envejecimiento en escorias de acería. [11]

Por último mencionar, la actualización del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3), según la “Orden FOM/2523/2014, de 12 de diciembre, por la que se actualizan determinados artículos del pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes, relativos a materiales básicos, a firmes y pavimentos, y a señalización, balizamiento y sistemas de contención de vehículos” donde se recoge las escorias de acería como materia prima para bases y subbases. [12]

Teniendo en cuenta todo lo anterior, en España, se están llevando a cabo buenas prácticas de valorización de la escoria, en el sector de la construcción principalmente, quedado todavía un largo camino que recorrer hacia la valorización efectiva del volumen total anual de subproducto producido.

Por último mencionar, que no se ha detectado ninguna práctica real de valorización de escoria en el ámbito de la energía a nivel estatal.

2.3 PAIS VASCO

Históricamente las escorias de acería han tenido una gran contribución a la generación de residuos en la Comunidad Autónoma del País Vasco debido a la gran concentración de acerías, tanto si se compara con el Estado (aproximadamente el 48 % de escorias de acería generadas en el Estado tienen su origen en la CAPV) como con Europa. [13]

Así, las escorias de acería han sido durante el ejercicio de 2016 el segundo residuo más importante en términos de generación de residuos en la CAPV con una contribución del 16% respecto al total de residuos inventariados. [13]

Desde finales del siglo XX se han ido estableciendo por parte del Órgano Ambiental distintas disposiciones normativas y metodológicas para la regulación de la valorización y posterior utilización de estas escorias, recogidas finalmente en el Decreto 34/2003, de 18 de febrero, de valorización y utilización de escorias [14]

Durante el período comprendido entre 2006 y 2015, se fueron implantando en la Comunidad Autónoma del País Vasco diversas plantas de producción de árido siderúrgico, a partir de la

valorización de escoria negra de fusión de HEA, para su uso en aplicaciones que garantizaran demandas de mercado más sostenidas, principalmente en la producción de hormigón. [13]

Sin embargo, la situación de crisis, y en especial en el sector de la construcción y obra pública, no confirmaron las previsiones para colocar en el mercado todo el árido siderúrgico valorizado, básicamente en forma ligada como hormigón.

De hecho, del seguimiento del “Programa de preparación para la reutilización, reciclaje y valorización” incluido en el “Plan de prevención y gestión de residuos de la CAPV 2020” [4], entre 2010 y 2016 se ha observado una reducción de la valorización material de la escoria de acería desde el 83 % al 63 %, incrementándose el depósito en vertedero.

Como consecuencia de la evolución tecnológica para la obtención de un árido siderúrgico de mayor calidad y de la identificación de nuevas oportunidades comerciales recogidas por la Unión Europea en sus retos de economía circular y gestión de residuos, se crean expectativas reales de incrementar el porcentaje total de la valorización de escoria negra, que han sido impulsadas por la administración pública vasca.

Así, dentro de las políticas públicas de economía circular y reutilización de corrientes residuales de la Comunidad Autónoma del País Vasco, se han desarrollado varios proyectos prácticos, de la mano de IHOBE o CEDEX, con el objeto de ampliar el conocimiento de esta familia de residuos/subproductos industriales, tanto en lo relativo a su naturaleza (composición química, propiedades físicas, etc.), así como a la aproximación metodológica para su evaluación ambiental.

Además de los proyectos prácticos, la administración pública vasca ha redactado un gran número de planes, guías y normativa referentes a la valorización de la escoria de acería, siendo el más relevante, el nuevo “Decreto 64/2019, de 9 de abril, del régimen jurídico aplicable a las actividades de valorización de escorias negras procedentes de la fabricación de acero en hornos de arco eléctrico” [15] el cual deroga al Decreto 34/2003. [14]

A continuación se enumeran dichos planes y guías que pretenden definir el marco técnico, jurídico y normativo para una eficiente valorización de las escorias negras.

- Norma de dimensionamiento de firmes del País Vasco. Anejo 3: Áridos siderúrgicos de horno eléctrico para mezclas bituminosas. (2012) [16]
- Pliego General de Prescripciones Técnicas para Obras de Carreteras y Puentes PG-3.
- Programa Marco Ambiental 2020. (2014) [17]

- Guía de aplicación del decreto de actividades de valorización de escorias negras de fabricación de acero en hornos de arco eléctrico y su utilización como árido siderúrgico. (2019) [18]
- Programa de Compra y Contratación Pública Verde del País Vasco 2020. (2019) [19]
- Economía circular en el sector de la construcción. Buenas prácticas en el uso de materiales reciclados en obra civil en el País Vasco. (2019) [20]
- Estrategia de Economía Circular de Euskadi 2030. (2019) [21]
- Diagnóstico de Economía Circular en la Industria del País Vasco. (2018) [3]
- Economía Circular y Gestión de Residuos en Euskadi. (2019) [22]

En el último de estos planes. “Economía Circular y Gestión de Residuos en Euskadi” son analizadas las corrientes con mayor deposición en vertedero (que impiden la circularidad de la economía), donde se constata el peso que, al respecto, presenta en Euskadi el sector siderometalúrgico, en contrapunto a las corrientes prioritarias identificadas en el ámbito europeo.

En concreto, señala a las escorias de acería como la principal corriente destinada a vertedero, presentan una composición homogénea que, a priori, puede facilitar su reciclabilidad, especialmente con el nuevo marco legal que se espera aprobar a corto plazo.

Por ello, determina varias opciones técnicas, llevadas a cabo por otros países, que fomentarían la valorización de la escoria de acería, entre las que se encuentran:

- Investigar nuevas líneas de aplicación de las escorias, más allá del sector de la construcción (obra civil o fabricación de cemento/hormigón). (Unión Europea, RESLAG)
- Fomentar la apuesta de la obra pública por la utilización de áridos siderúrgicos (Japón).
- Promover mejoras en el proceso de fabricación del acero para fomentar la prevención y la correcta maduración de la escoria para generar un futuro árido siderúrgico de mejor calidad.

Por último mencionar, que se ha detectado una práctica real de valorización de escoria en el ámbito de la energía a nivel autonómico y se han identificado ciertas empresas que están tomando parte en el desarrollo del concepto de uso de la escoria en aplicaciones energéticas y varias pruebas acerca de las propiedades de la escoria en laboratorios de ensayos, como son Tecnalia o CICEnergyGune, las cuales serán analizadas en posteriores apartados.

3 JUSTIFICACIÓN DE LA ELECCIÓN

El País Vasco es la Comunidad Autónoma que más residuos de la industria metalúrgica genera de toda España, donde la mayor parte de ellos es constituida por la escoria negra de acería, alrededor de 370.000 toneladas de escoria anualmente. [29]

A pesar de que un gran volumen de esa escoria es valorizada por sectores como el de la construcción o la propia industria metalúrgica, alrededor del 37% [4] de la escoria negra se desecha en vertederos vascos, cifra que ha aumentado en los últimos años, si bien porque el marco normativo no es lo suficientemente específico, porque existe incertidumbre sobre sus posibles aplicaciones o por desinformación de los potenciales usuarios.

Por lo tanto, la justificación de la realización del presente análisis es fomentar la valorización de la escoria negra de acería, la cual constituye la mayor corriente depositada en vertederos vascos, de acuerdo a políticas de economía circular y gestión de residuos de la CAPV.

Además, la propia CAPV podría ser una gran beneficiaria de estas prácticas, no solo, en materia ambiental debido a menor deposición en vertedero y la consecuente reducción de impacto ambiental en los vertederos vasco, sino que, teniendo en cuenta el gran margen de mejora en materia de recuperación de calor residual de la industria vasca, el uso de la misma como material de almacenamiento térmico, se presenta como una potencial posibilidad de valorización, en un sector estratégico como es el sector de la energía, que puede traer consigo grandes beneficios para la industria vasca.

4 OBJETIVO

El principal objetivo del presente estudio es analizar las posibilidades de valorización de la escoria negra de acería en sectores estratégicos de la Comunidad Autónoma del País Vasco, como son el sector de la construcción y el de la energía. Así mismo, mediante la identificación de las potenciales posibilidades de valorización de la escoria y sus beneficios asociados, se pretende impulsar, tanto las políticas de economía circular de la CAPV, como, la motivación de los sectores implicados en el uso activo de escoria valorizada.

5 GENERACIÓN DE ESCORÍAS DE ACERÍA

Escoria es el nombre que se le da a un subproducto obtenido en la producción metalúrgica, su procedencia varía dependiendo del proceso del que resulta extraída, así puede haber escorias de la producción metalúrgica del hierro, acero, níquel, manganeso, cromo, cobre, etc. Una posible clasificación simplificada de las mismas de acuerdo a su procedencia y proceso de enfriamiento es la que se muestra en la ilustración 1.

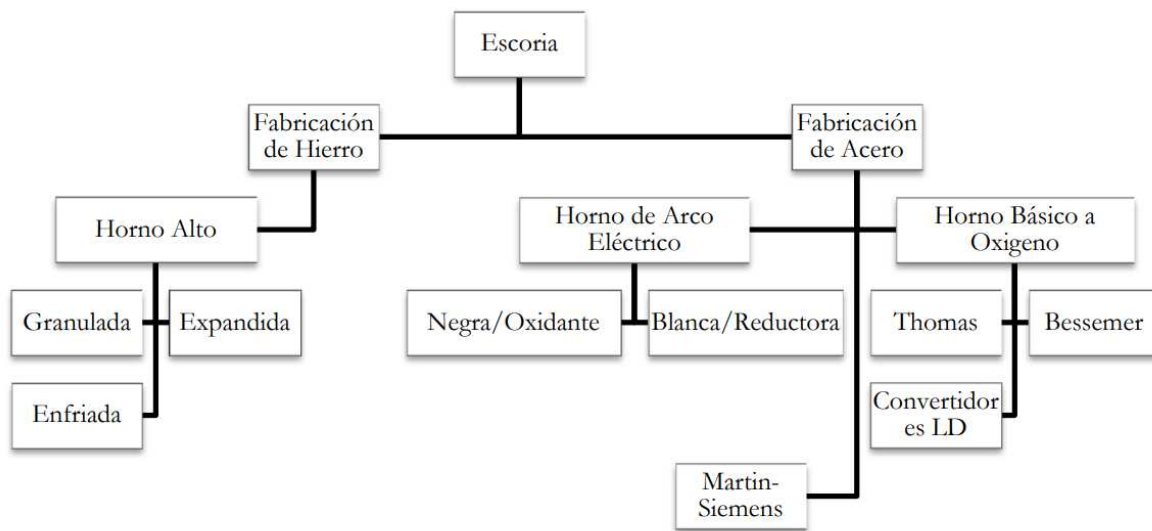


Ilustración 1. Clasificación de la escoria según su procedencia [11]

La escoria se consigue mediante la adición de óxidos alcalinos y alcalinotérreos, silicatos, aluminatos, escorificantes, fluidificantes y fundentes en el proceso metalúrgico. Sus funciones son proteger al metal frente a la oxidación a alta temperatura, aislar térmicamente por lo cual mejora la eficiencia energética, actuar de fase receptora para la captación de inclusiones perjudiciales en la fase metálica y por último proteger el refractario contra ataques químicos. Su composición y características dependen del proceso de fabricación donde se hayan producido.

Debido a la alta producción de acero en España, y más concretamente en la CAPV, el mayor volumen de escorias se da en las procedentes de la fabricación del acero, las llamadas escorias de acería, siendo además, las más utilizadas a día de hoy como árido siderúrgico en el sector de la construcción y en las que se basa el presente análisis.

Las escorias de acería, como define el Departamento de Medio Ambiente, Planificación Territorial y Vivienda del País Vasco, son materiales de origen industrial procedentes de la fabricación de acero en hornos de arco eléctrico (HEA), que se forman durante el proceso de fusión, afino o elaboración del acero y que se separan de él debido a su menor peso específico. [23]

A continuación, se profundizará en el proceso industrial de fabricación del acero donde se producen las escorias de acería, ya que, se considera muy relevante para poder comprender la composición y las propiedades de las mismas.

5.1 LA INDUSTRIA DEL ACERO

Debido a la multitud de utilidades que se le pueden dar al acero, a sus propiedades mecánicas y a su presencia casi incontable en la sociedad de hoy en día, la industria del acero es uno de los principales motores económicos de diversos de los países desarrollados. El acero destaca por encontrarse en los sistemas de transporte, en las infraestructuras, en el suministro de agua y energía (incluidas las energías renovables), en la maquinaria industrial, las viviendas, los electrodomésticos, o los envases; se ha convertido en un material indispensable en nuestro día a día.

La industria siderúrgica española es uno de los grandes productores de acero de Europa y del mundo produciendo aproximadamente 14,5 millones de toneladas anualmente. La tabla 1, extraída de la Worldsteel, 2019 [24] muestra el ranking mundial de producción de acero en el año 2018, evidenciando el decimosexto lugar de la siderurgia española en producción de acero bruto. Atendiendo a los países que conforman la Unión Europea España ocupa la cuarta posición prácticamente igualada a Francia.

PAIS	2018	
	Ranking	Toneladas
China	1	928,3
India	2	105,5
Japón	3	104,3
Estados Unidos	4	88,6
Corea del Sur	5	72,5
Rusia	6	71,7
Alemania	7	42,4
Turquía	8	37,3
Brasil	9	34,9
Italia	10	24,5
Irán	11	24,5
Taiwan, China	12	23,2
Ucrania	13	21,1
México	14	20,2
Francia	15	15,4
España	16	14,3

Tabla 1. Producción de acero en 2018 de los 16 primeros países en toneladas. [24]

El respeto por el medio ambiente, una gestión adecuada de los recursos, la minimización de los residuos y el reciclaje, son los ejes con los que la industria siderúrgica afronta el futuro asegurándose la competitividad con otras potencias.

De hecho en los últimos 40 años la industria siderúrgica Española ha conseguido reducir en un 75% las emisiones de CO₂, en un 95% el consumo de agua en el proceso y ha logrado a su vez que el 75% de la producción de acero corresponda a acero reciclado. El reciclaje del acero es altamente eficiente e indispensable ya que se puede reciclar indefinidamente, una y otra vez, sin pérdida alguna de su calidad, y de hecho actualmente se sigue reciclando acero fabricado hace más de 100 años.

Esta importancia conlleva la potenciación de los hornos de arco eléctrico ya que son los únicos que pueden trabajar únicamente con chatarra para reciclar, sin necesitar el arrabio o mineral de hierro. [10]

5.2 PROCESOS DE PRODUCCIÓN DEL ACERO

Existen dos procesos diferentes en la actual industria de producción del acero; la siderurgia integral, es decir, alto horno y acería de oxígeno LD, y la acería de horno eléctrico como se puede comprobar en la siguiente ilustración.

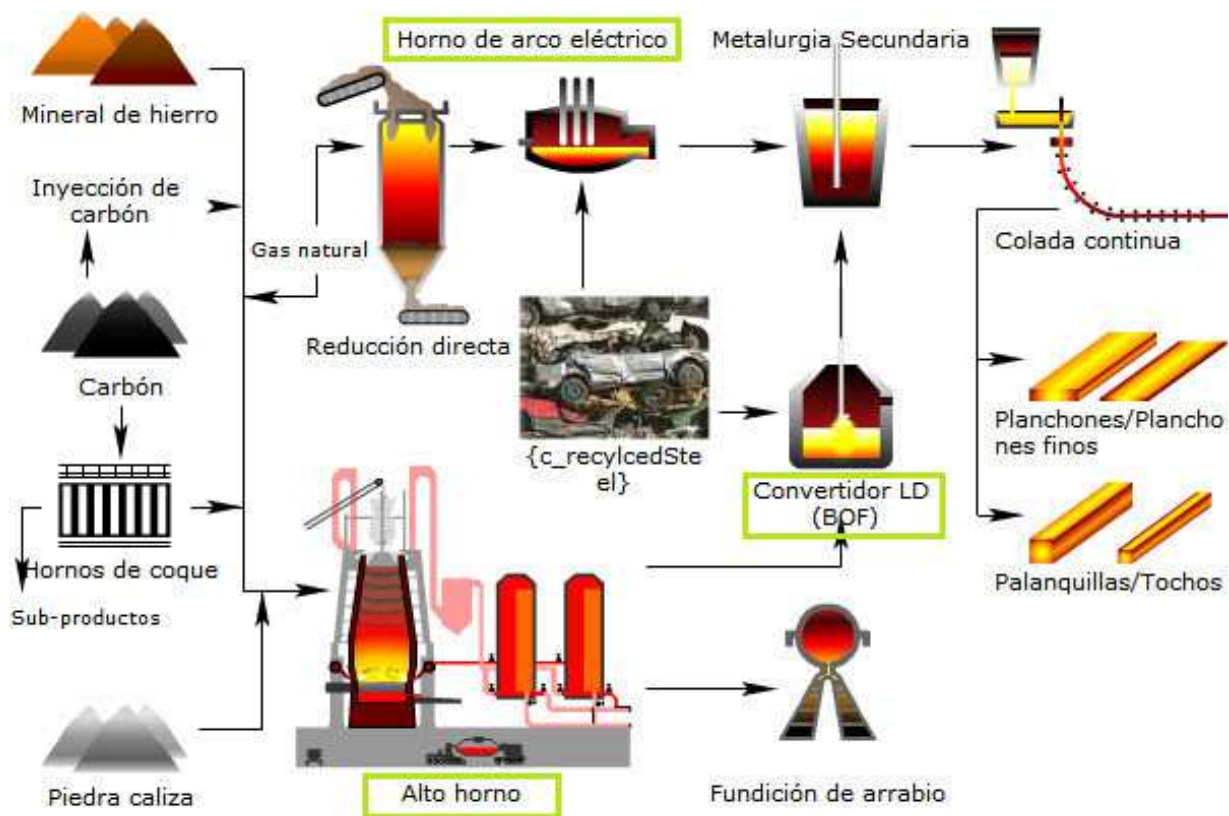


Ilustración 2. Procesos de producción del acero [PEMIGSA]

En el primero de los casos la producción se basa principalmente obteniendo el mineral de hierro como materia prima y la chatarra que se utiliza alrededor de un 20% es usada para controlar la temperatura del proceso, mientras que en el horno de arco eléctrico se utiliza el 100% de chatarra como materia prima.

Los próximos apartados se centrarán en el proceso de producción del acero en horno de arco eléctrico, ya que, es en el proceso característico en el cual se forma la escoria de acería.

5.3 ACERÍA DE ARCO ELÉCTRICO

La acería de horno eléctrico tal y como su nombre indica, produce el acero con hornos que utilizan la corriente eléctrica a través de electrodos para fundir y refinar los materiales que forman el acero. Inicialmente estos hornos se utilizaban únicamente para la fabricación de aceros especiales, pero actualmente el alto nivel tecnológico del reciclaje masivo de la chatarra, hace que se pueda realizar cualquier tipo de acero, siendo el control de la calidad de la chatarra indispensable en el proceso.

Los hornos de arco eléctrico (HAE) son los más versátiles y funcionales de todos los tipos de hornos que se utilizan para la producción de acero. Ello es debido principalmente a que pueden proporcionar altas temperaturas hasta 1900 °C y permiten controlar las variaciones de ésta con un alto grado de precisión, al ser la electricidad el modo de calentamiento.

Además, este tipo de hornos apenas utiliza combustible para alcanzar las temperaturas de operación, salvo quizá de modo auxiliar. Esto se traduce en una disminución importante del nivel de impurezas que se introducen al acero final.

Las principales ventajas que proporciona este tipo de horno son que puede producir acero sin hierro fundido, es decir, sólo con chatarra y que su versatilidad le permite producir todo tipo de aceros, desde aceros con regular contenido de carbono hasta aceros de alta aleación, tales como aceros para herramientas, aceros inoxidable e incluso aceros especiales. [25]

5.3.1 VOLUMEN Y DISTRIBUCIÓN DE HORNOS DE ARCO ELÉCTRICO

Como ya se ha mencionado, España es un gran productor de acero, sobretodo mediante el proceso en el horno de arco eléctrico. Atendiendo a la distribución geográfica de los hornos de arco eléctrico en España, hay actualmente 1 siderurgia integral y 21 aceras de horno eléctrico de arco como se puede comprobar en la siguiente ilustración de UNESID. [10]



Ilustración 3. Mapa de localización de las acerías de horno de arco eléctrico en España [10]

Aunque la mayor concentración se sitúa en la cornisa cantábrica, especialmente Asturias y País Vasco, como se puede ver en el mapa nuestra industria está muy extendida con fábricas en once de las Comunidades Autónomas.

Teniendo en cuenta la producción de acero de todas las acerías de horno de arco eléctrico existentes en España, en 2018 se produjeron un total de 14.320.000 t de acero de las cuales [10]:

- Acero común o especial.....13.351.000 t
- Acero inoxidable.....970.000 t

Si se comparan estos datos, con la producción total de acero del año 2016 se aprecia un aumento en la producción del acero a nivel estatal, aunque si se compara con la producción de 2017 se aprecia una ligera variación negativa de la producción del 0,8% respecto al año 2018, como se puede comprobar en la siguiente tabla. [10]

	ENERO-DICIEMBRE			
	2016	2017	2018	Variación
PRODUCCIÓN DE ACERO TOTAL (kt)	13.658	14.441	14.320	-0,80%
Aceros no Aleados (kt)	12.060	12.767	12.770	0,00%
Otros Aceros Aleados (kt)	596	671	581	-13,40%
Aceros Inoxidables (kt)	1.002	1.003	970	-3,30%

Tabla 2. Producción española de acero en 2018 [10]

Atendiendo a la producción de acero por comunidades autónomas, el reparto por comunidades, según los datos de 2018, es el siguiente: [11]

País Vasco.....	48,0%
Cataluña.....	15,4%
Andalucía.....	11,3%
Cantabria.....	7,6%
Madrid.....	6,7%
Galicia.....	5,0%
Extremadura.....	4,0%
Aragón.....	1,5%

Tras analizar el reparto productivo del acero por comunidades autónomas queda claro que País Vasco es la comunidad autónoma que más acero produce y por consiguiente, la que más residuos metalúrgicos genera, siendo esta una de las motivaciones principales para la redacción del presente estudio.

5.3.2 MATERIAS PRIMAS

Como ya se ha comentado en apartados anteriores la principal materia prima de este tipo de hornos es la chatarra, aunque también se utiliza la llamada chatarra artificial o arrabio líquido. Además, se añaden a la mezcla, ciertas sustancias reductoras, oxidantes, fundentes o escorificantes, desulfurantes, aleantes y algún producto fundente, como se comentará en los siguientes apartados.

5.3.2.1 CHATARRA

En términos metalúrgicos se entiende por chatarra cualquier material metálico de desecho procedente de los diversos procesos de fabricación de metales o aleaciones, así como también toda pieza metálica o resto de ella que por la causa que fuere ya no sea utilizable con el fin para el que fue creada. La denominación de chatarra no implica que en su posterior utilización haya de ser sometida a un nuevo proceso de fusión, sino que dicho

aprovechamiento puede alcanzarse por cualquier proceso de acondicionamiento o utilizarse como está para una nueva finalidad. Según su composición, la chatarra empleada en los hornos de acería se puede clasificar en dos grandes grupos, chatarra de acero y chatarra de fundición.



Ilustración 4. Chatarra para la producción de acero [UNESID]

- Chatarra de Acero. Como su nombre indica es la que está constituida exclusivamente por trozos de acero. Como el material del que procede puede ser un simple acero al carbono o ser aleado, para distinguirla se le denomina de acuerdo con su composición; por ejemplo, chatarra de acero al carbono, chatarra de acero al manganeso, cromo-níquel, etc.
Por otra parte, en algunos casos se indica el origen de la chatarra y así se dice chatarra de carriles, de desguace (de barcos), de despuntes (de laminación), etc. nombres todos que dan una indicación, no ya solamente del origen, sino en muchas ocasiones también de su composición.
- Chatarra de Fundición. En la fabricación de acero en el horno eléctrico se rehúye el empleo de este tipo de chatarra, aunque a veces viene incluida en partidas adquiridas como chatarra de acero. En general, la chatarra de fundición tiene, además de sus característicos altos contenidos de carbono y silicio (que obliga a consumir más oxígeno que lo normal), un contenido bastante fuerte de impurezas nocivas para el acero, como azufre y fósforo; este último por la composición del arrabio del que procede y el azufre por haberlo adquirido en el curso de su refusión con coque en cubilote.
Estos elementos son costosos de eliminar y por eso la fundición no se emplea más que en casos de escasez o para elevar el contenido de carbono de un acero cuando la especificación lo requiera, pero siempre es más favorable para este fin el empleo de un arrabio de composición conocida. [25]

5.3.2.2 CHATARRA ARTIFICIAL

Engloba un conjunto de productos, distintos en su forma e iguales en su composición, que bajo el título genérico de “chatarra artificial” recibe los nombres de “pellets” “prerreducidos”, “hierro esponja”, “fierro esponja”, “direct reduction iron DRI”, “briquetted iron BI”. “nódulos”, etc. En general se trata del producto de la reducción de minerales de hierro por procedimientos en los que no se llega a la fusión del metal ni a la reducción completa del mineral. Según el proceso recibe un nombre entre los citados anteriormente. [25]

5.3.2.3 ARRABIO LÍQUIDO

Algunas veces se carga arrabio o fundición (3-5 % C) o coque para aumentar el contenido de carbono que favorezca el hervido y la escoria espumosa. No es conveniente que la proporción de arrabio supere un 30-40 % del total de la carga, porque el soplado prolongado de oxígeno afecta fuertemente a los refractarios y, además, la cantidad de escoria generada es tanta que requiere de hasta dos o tres eliminaciones de escoria. [25]

5.3.2.4 OXIDANTES

Se emplean para elaborar la primera escoria de la colada, con la que se eliminan los elementos oxidables. En acería clásica se empleaban oxidantes sólidos, como mineral de hierro Fe_2O_3 o cascarilla de laminación. Hoy en día se emplea casi exclusivamente oxígeno inyectado con lanza. [25]

5.3.2.5 ESCORIFICANTES Y FUNDENTES

Además de la carga metálica del horno hay que añadir otras materias, llamadas unas veces fundentes y otras escorificantes. Según sea el revestimiento del horno así deben ser las escorias y, por tanto, las materias primas para formarlas. [25]

En los hornos ácidos las escorias se forman a base de sílice y en los básicos a base de cal. En estos últimos se emplean también fundentes para fluidificar las escorias y rebajar su punto de fusión. Tales pueden ser el espato flúor, el sílice y la cal (puede emplearse en forma de carbonato o en forma de cal viva). [25]

5.3.2.6 AGENTES DE HERVIDO

Son los productos que contienen carbono y lo aportan para reaccionar con el oxígeno en la primera escoria oxidante, descarburadota y defosforadora. Los agentes de hervido son el lingote de arrabio y el polvo de carbón.



Ilustración 5. Polvo de carbón [CARBOTECNIA]

5.3.2.7 DESULFURANTES

El azufre se encuentra en el baño de acero, por lo que su eliminación se consigue haciéndole reaccionar con metales o compuestos alcalinos o alcalino-térreos.

Dado que la desulfuración ha de hacerse en ambiente reductor, los agentes desulfurantes serán más efectivos si además de la parte básica tienen una componente reductora. En la actualidad se emplea la caliza o cal, el carburo cálcico y el siliciuro de cal. [25]



Ilustración 6. Producto de cal [CALTEK]

5.3.2.8 REDUCTORES

Son productos que se emplean en la segunda fase de la colada, es decir, en la escoria reductora. Esta fase en los procesos ya antiguos se realizaba en el mismo horno de arco. Hoy día se hace en el equipo de metalurgia secundaria, aunque los productos y reacciones puestos en juego son prácticamente los mismos. Algunos reductores son:

- Carbono
- Ferroaleaciones
 - Ferrosilicios
 - Ferromagnesio
 - Siliciuro de cal
- Carburo cálcico
- Aluminio y titanio

5.3.2.9 ALEANTES

Hay otro grupo de ferroaleaciones que se utilizan como vehículos de incorporación al acero de elementos aleantes para la obtención de aceros especiales. Algunas de estas ferroaleaciones pueden considerarse también como reductores.

Casi la totalidad de las ferroaleaciones, se cargan sobre baño calmado y lo más libre posible de escoria. Estas ferroaleaciones pueden ser:

- Ferroníquel
- Ferrocromo
- Ferromolibdeno
- Ferrovanadio
- Ferrotitanio
- Ferrocovalto
- Ferrowolframio

5.3.3 COMPONENTES DE LOS HEA

El horno de arco eléctrico se compone de tres partes (solera, cuba y bóveda) y puede inclinarse hidráulicamente. Estas tres partes están revestidas en su interior de material refractario. Además, los muros exteriores de la solera, la cuba y la bóveda poseen una estructura de acero que normalmente está refrigerada por agua.

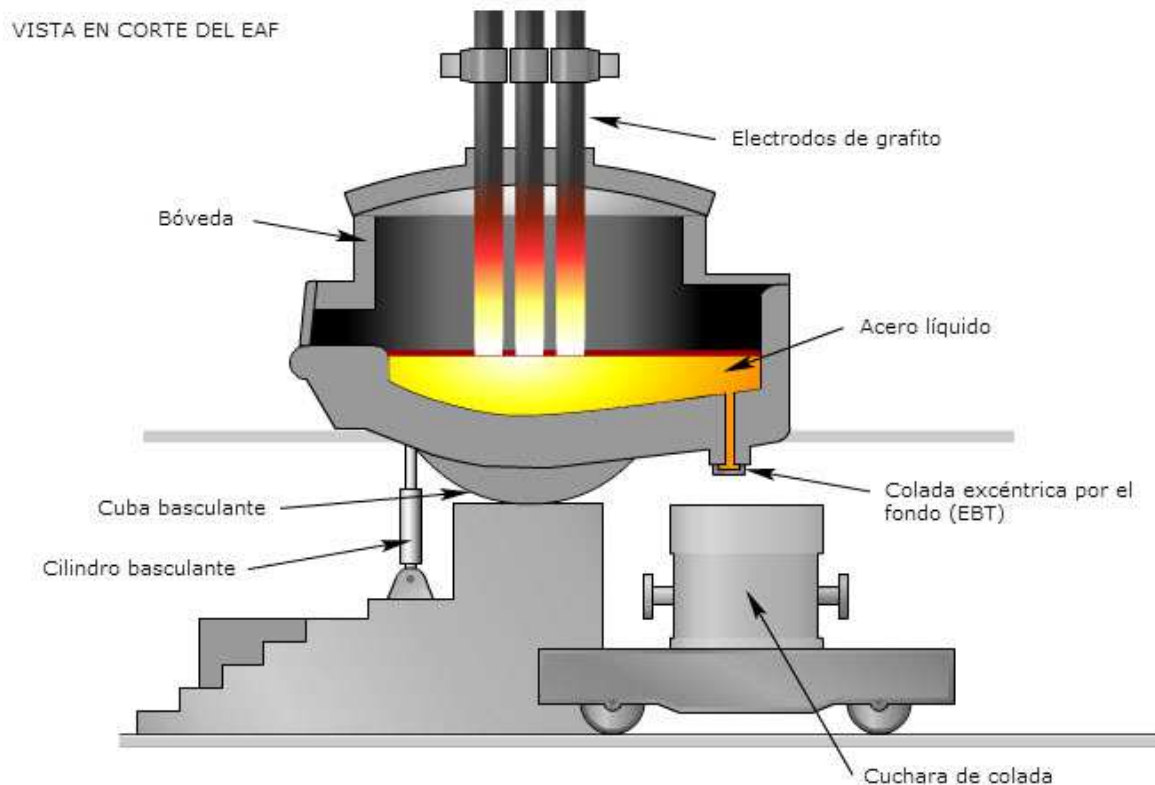


Ilustración 7. Sección de un horno de arco eléctrico [WORDPRESS]

Justo al lado del horno de arco eléctrico se sitúa un transformador especial de potencia, por lo general refrigerado por aceite y alojado en una carcasa para su protección. El conjunto se completa con una unidad hidráulica para el movimiento de los electrodos y el mecanismo de elevación de la bóveda, un sistema de refrigeración de agua, uno de aire comprimido, otro de extracción de los gases resultantes y un carro de transporte de cucharas. [26]

A continuación se explicarán de manera más detallada los principales componentes de un horno de arco eléctrico.

- **Cuba del horno o cuchara de colada.**
Generalmente es cilíndrica y recubierta por refractario. Su diámetro determina el peso de la colada. (Aproximadamente 50-150 t). La puerta del horno permite desescoriar y operar durante el proceso de fusión.
- **Paredes.** Son las que están en contacto con la masa líquida hasta una determinada altura y en la actualidad están refrigeradas por agua.
- **Bóveda.** Es la tapa del horno, construida con anillos metálicos refrigerados por agua y revestidos con alúmina. Están dotadas de un sistema giratorio que permite la apertura total de la parte superior del horno.

- Electrodos de grafito. Son los encargados de hacer saltar el arco y transportar la energía eléctrica dentro del horno. Los electrodos están fabricados de grafito de alta pureza y estos entran al horno por un gran orificio llamado corazón de bóveda. Cuando los electrodos se encuentran cerca de la chatarra se genera un arco y se forma un circuito eléctrico. Por último, mencionar que los hornos de corriente eléctrica alterna cuentan con tres electrodos y los de corriente rectificada, en cambio, solo cuentan con uno o dos.
- Refractarios. Existe un gran problema en el material refractario que constituye las paredes del horno ya que las paredes laterales aguantan 1000 coladas, mientras que las bóvedas solo 400. Esto es así debido a que la bóveda también sufre la erosión del polvo arrastrado hacia el sistema de escape.
La coraza de las paredes por encima de la línea de escorias está constituida por chapa de acero, y por debajo de ella, por cobre, debido a su conductividad. En cuanto a los crisoles, estos están constituidos por ladrillos impregnados con alquitrán lo que les permite resistir miles de hornadas.
- Brazos portaelectrodos.
- Sistema de regulación electrónica y el accionamiento hidráulico de los electrodos.
- Sistema de cables flexibles. Llevan la corriente a los brazos que están refrigerados por agua.
- Transformador eléctrico. Transforma la corriente de alta tensión a los voltajes necesarios.
- Salida de humos. Este sistema conduce los humos a la instalación de depuración. Algunos poseen además, una salida de humos refrigerada lo que permite reducir la temperatura de los humos de escape considerablemente. [25]

5.3.4 PROCESO PRODUCTIVO DEL ACERO

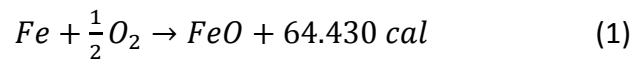
La producción de acero mediante horno eléctrico se divide principalmente en dos etapas: la etapa de fusión o siderurgia primaria, de la que se obtiene la escoria negra, y la etapa de afino o siderurgia secundaria, de la cual se obtiene la escoria blanca.

5.3.4.1 FUSIÓN O SIDERÚRGIA PRIMARIA

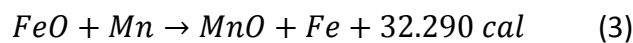
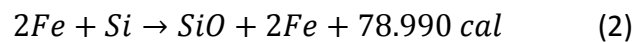
En rasgos generales, la etapa de fusión incluye una serie de fases como la oxidación, dirigida a eliminar impurezas de magnesio y de silicio, la desfosforación y la formación de escoria espumante en la que se acumulan todas las impurezas.

5.3.4.1.1 Oxidación y formación de escoria espumante

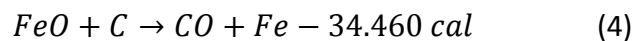
Mediante la inclusión de oxígeno en el horno, debido al gran contenido de hierro presente en la chatarra, éste es el primero en oxidarse de acuerdo a la siguiente reacción química:



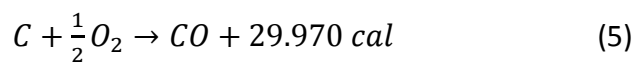
A continuación, el óxido de hierro oxida al manganeso y silicio presentes en el acero líquido según las reacciones:



Los tres óxidos pasan a ser parte de la escoria que flota sobre el acero líquido. Cuando prácticamente todo el silicio y gran parte del manganeso se hayan oxidado, y hay suficiente óxido de hierro libre en la escoria se introduce carbón en forma de polvo, para reducir el óxido de hierro y recuperar el hierro de la escoria mediante la reacción:



El carbono también reacciona con el oxígeno presente de acuerdo a la reacción:



El monóxido de carbono desprendido en forma de gas produce lo que se denomina hervido de baño, lo cual es necesario para uniformizar la composición y temperatura del baño y facilitar la eliminación de otros gases. Además, cuando el CO pasa a través de la capa de escoria, se produce lo que se conoce como escoria espumante [27].

Para que el paso del carbono monóxido tenga efecto de espumante en la escoria, es preciso que la viscosidad de la escoria sea superior a 4 poise, si no las burbujas de CO atraviesa la capa de escorias sin realizar su función de espumante [27].

Ésta etapa de oxidación se acaba cuando la ebullición del líquido se calma, que es un indicador de que el carbono se ha oxidado completamente.

Posteriormente, por diferencia de densidades entre el acero líquido y la escoria negra, éstos son separados. El acero se vierte a la cuchara que seguirá el proceso de afino y la escoria es extraída para su enfriamiento por una de las puertas del horno como se puede comprobar en la siguiente ilustración.

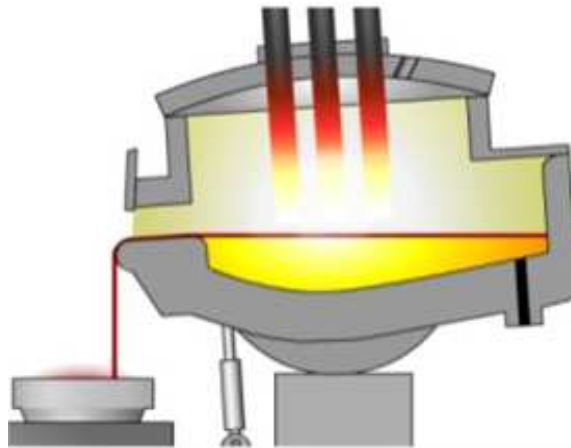
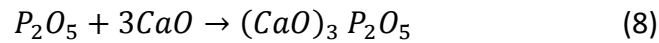
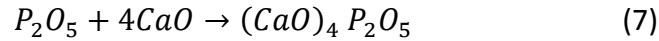
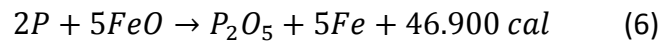


Ilustración 8. Proceso de desescoriado del horno de arco eléctrico [STEELMIT]

5.3.4.1.2 Desfosforación

La presencia de fósforo en el acero frío es perjudicial porque provoca fragilidad del material, por lo tanto se debe eliminar la mayor parte posible del mismo presente en la materia prima. Este se consigue mediante las reacciones:



Los óxidos de fósforo pasan a formar parte de la composición de las escorias, de acuerdo a lo reflejado en la siguiente ilustración.

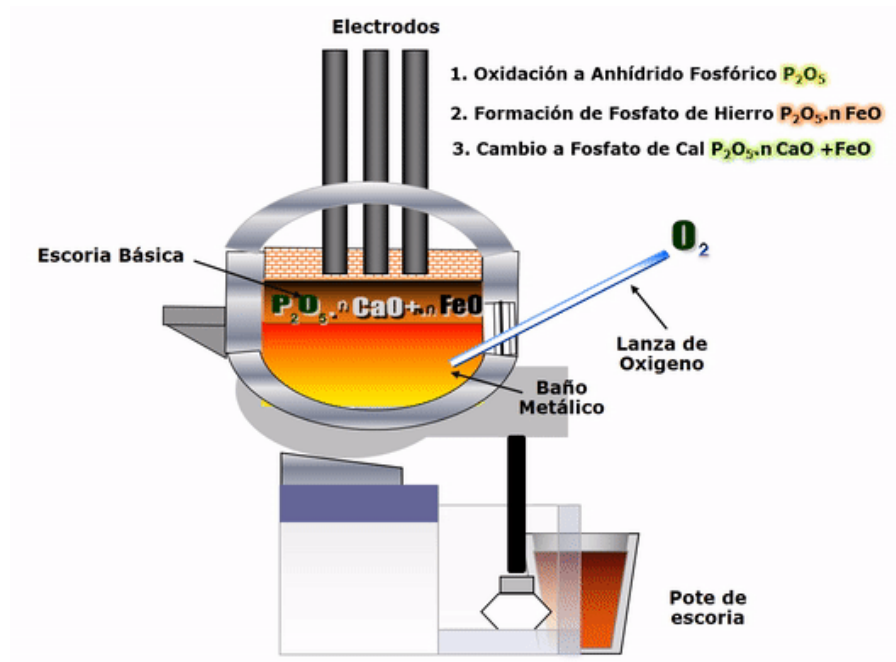


Ilustración 9. Proceso de desfosforación del acero [STEEMIT]

Como se puede comprobar en la siguiente figura, el grado de eliminación de fósforo del baño de acero dependerá de la basicidad de la escoria.

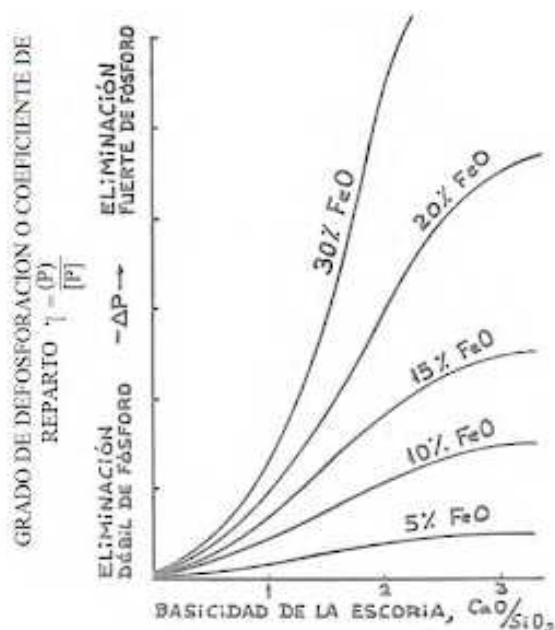


Ilustración 10. Influencia de las condiciones de la escoria sobre el grado de desfosforación del baño de acero [25]

La fabricación de aceros ordinarios y especiales difiere principalmente en la etapa de afino, puesto que en los especiales hay que incorporar o excluir aleaciones metalúrgicas para conseguir que el acero final tenga las prestaciones requeridas, lo cual se realiza mediante la adición de ferroaleaciones una vez que la mezcla está en la cuchara u olla receptora.

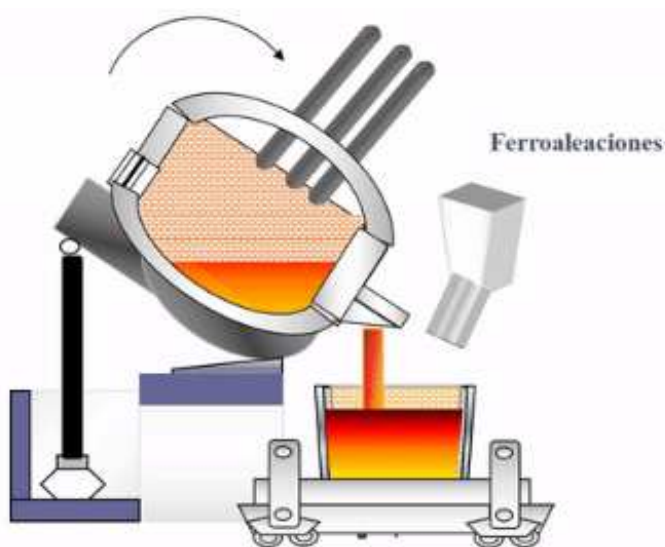


Ilustración 11. Proceso de metalurgia primaria [STEELMIT]

5.3.4.2 AFINO O SIDERÚRGIA SECUNDARIA

La etapa de afino de incluye una serie de fases como la desoxidación, que permite eliminar óxidos metálicos del baño, la desulfuración y si fuese necesario, la metalurgia de inclusiones.

5.3.4.2.1 Desoxidación

Esta fase, en el proceso llevado a cabo en HAE comienza realmente en la primera fase de fusión; en el primer horno se hace parcialmente la reducción de FeO. Aun así el acero fundido procedente del proceso de fusión es vertido a la cuchara y el proceso propiamente de afino tiene lugar en el horno conocido como “Horno Cuchara”.

El acero líquido está muy oxidado por lo que en el proceso de afino se procede a cubrirlo con una escoria fuertemente reductora (escoria blanca), formada normalmente por 3 partes de cal, una parte de espato-flúor (fluoruro de calcio) y una parte de coque o grafito.

La escoria se agita continuamente con el soplado de gas inerte, normalmente argón, que se utiliza para homogeneizar la composición química del líquido fundido y la temperatura, evitar la oxidación secundaria del líquido fundido y facilitar el desplazamiento de las inclusiones metálicas hacia la escoria.

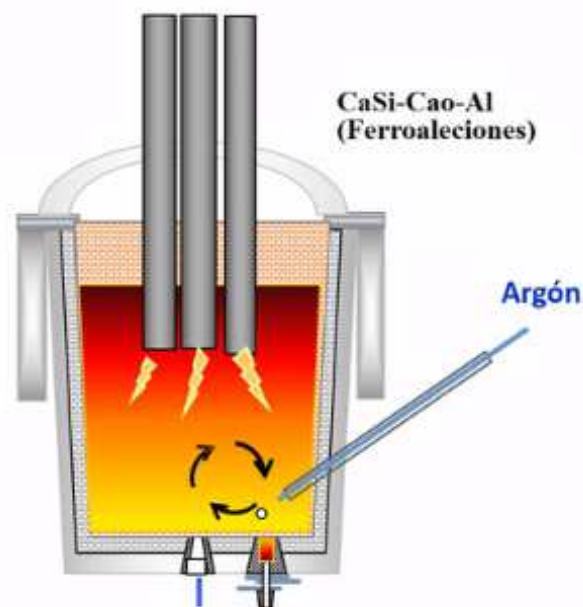
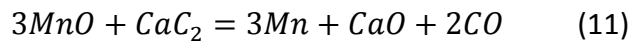
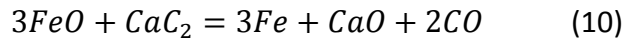
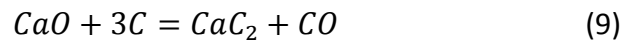


Ilustración 12. Proceso de afino en el horno cuchara [STEELMIT]

El líquido fundido tiende a oxidar la escoria, y ésta a desoxidar el líquido fundido. Esto se hace mediante la desoxidación por carburo cálcico (CaC_2), de acuerdo a las reacciones químicas:



El punto de fusión del fluoruro de calcio es similar al del hierro, su función principal es disolver los óxidos.

El aporte de carbono a la escoria se hace por inclusión de carbón en forma de polvo, que es lo que mantiene la escoria con funciones reductoras.

La desoxidación definitiva del acero se consigue cuando se añaden ferroaleaciones de silicio y manganeso. Así se consigue formar en el baño metálico partículas líquidas, primero de óxido de manganeso (MnO) y luego de sílice (SiO₂), que tienen tendencia a cohesionarse entre sí dando lugar a partículas de gran tamaño que suben a la escoria.

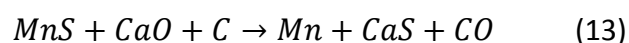
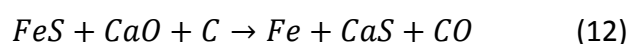
El contenido en óxido de hierro de la escoria reductora al comienzo de la etapa de afino es del 6-12%, a los 10 minutos el contenido es del 2% y al cabo de unos 30 minutos se encuentra entre el 0,5-1%.

Esta fase se conoce como calmar el acero y se realiza con objeto de evitar la efervescencia del líquido fundido y el desprendimiento de gases, que puede dar lugar a porosidades durante el enfriamiento y solidificación del acero.

5.3.4.2.2 Desulfuración

La presencia de azufre en el acero líquido provoca fragilidad en caliente. Este hecho se debe a que forma con el hierro sulfuro de hierro además de un eutéctico cuyo punto de fusión es muy bajo (988°C). El sulfuro y el eutéctico solidifican formando membranas que envuelven los cristales de hierro ya solidificados a temperaturas de 1.535°C. El acero resultante si debe ser tratado a temperaturas comprendidas entre 1.000-1.300°C (laminado en caliente, forjado, etc.) presenta fragilidad, apareciendo numerosas grietas durante el proceso. Este fenómeno se produce como consecuencia de la fusión del eutéctico y del sulfuro de hierro haciendo que los cristales de hierro pierdan cohesión.

La desulfuración se produce con el simple contacto del líquido fundido con la escoria reductora, en presencia de una cantidad suficiente de óxido de calcio y carbón según la siguiente reacción:



La desulfuración es más eficaz cuanto más básica sea la escoria y menor sea el contenido de óxido de hierro en la misma como se puede apreciar en la siguiente figura.

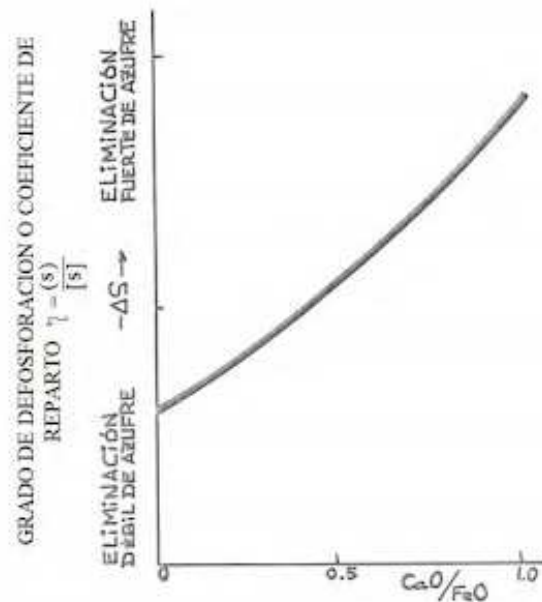


Ilustración 13. Influencia de las condiciones de la escoria sobre el grado de desulfuración del baño de acero [25]

La basicidad de la escoria se consigue mediante adición de óxidos de calcio y magnesio, los últimos ayudan en el proceso de desulfuración, protegen las paredes refractarias y mantienen fluidez alta del acero fundido a temperatura de tratamiento (1550-1620°C). [28]

5.3.4.2.3 Metalurgia de inclusiones

Esta fase se realiza cuando las inclusiones no metálicas presentes en el acero son perjudiciales para la calidad del mismo, por lo que se procede a su ajuste. El control de la morfología de las inclusiones tendrá como objetivo el que las inclusiones que permanezcan en el acero sean compatibles con las propiedades mecánicas del mismo.

Los procesos de afino de aceros especiales, pueden contemplar fases de control de nitrógeno, hidrógeno, oxígeno, etc. Para ajustar la composición del acero en función de las especificaciones requeridas. En el caso de los aceros inoxidable, se hace también una descarburación con el fin de eliminar carbono.

Antes de colar el líquido fundido se vuelve a desescoriar, obteniendo así la escoria conocida como escoria blanca de acería. El líquido fundido se cuela por la piqueta, volcando el horno hacia la piqueta situada enfrente de la puerta de desescoriado, para evitar que el líquido fundido arrastre algo de escoria.

5.3.5 RESIDUOS EN LA PRODUCCIÓN DEL ACERO

El proceso de producción del acero produce cinco tipos de residuos que por orden mayor a menor cantidad son: las escorias siderúrgicas, los polvos de acería, los refractarios, las arenas de fundición y las cascarillas de laminación.

Los polvos de acería son partículas finas arrastradas por el escape de los gases procedentes del horno eléctrico y que debido a su composición principalmente de hierro y zinc y de metales pesados como el plomo y el cadmio, son difíciles de valorizar. Una de las soluciones para encontrarles una valorización es tratar el polvo y reintroducirlo en el horno, aumentando el contenido de zinc del acero a realizar.



Ilustración 14. Aglomeración de polvos de acería de aceros inoxidables. [CSIC]

Las cascarillas de laminación que se producen a la hora tratar el acero para darle forma, son utilizadas como aditivo para las aleaciones de hierro.



Ilustración 15. Cascarilla de laminación proveniente del proceso de laminación. [GERDAU DIACO S.A]

Las arenas de fundición que proceden de los moldes obsoletos tras el proceso de colada están constituidas principalmente por cuarzo y arcilla. Una valorización para este producto que ya se realiza, es utilizarlos como árido de hormigón o como agregado en la fabricación de ladrillo y tejas.



Ilustración 16. Arenas de fundición. [xx]

Los refractarios, que son partes desgastadas del material utilizado para recubrir el horno y están compuestos principalmente por elementos silicios, son valorizados de la misma manera que las arenas de fundición.



Ilustración 17. Refractarios para horno de arco eléctrico [DEGUISA S.L.U.]

Las escorias de acería se generan por la neutralización de óxidos ácidos y básicos que flotan en el baño de la fundición del metal y se separan del metal fundido para su posterior enfriamiento. Los principales componentes son óxidos, silicatos, hierro, caliza, magnesio y manganeso además de remanentes de otros elementos químicos que son agregados al horno durante el proceso de fusión y refinación del acero.

Pero no sólo estos factores influyen en la composición de la escoria, la gran variedad de aleaciones finales producidas de hierro y acero, el tipo de chatarra, el control de las variables operacionales y las diferentes técnicas y procesos en la realización de tales aleaciones influyen en la composición.



Ilustración 18. Escorias negras de acería [GIKESA]

5.3.6 VOLUMEN DE ESCORÍA DE ACERÍA DEL HAE

Teniendo en cuenta que las escorias constituyen la mayor parte de los residuos de los HAE y que el tema principal del presente estudio gira entorno a su gestión y valoración, se considera necesario determinar el volumen de escoria anual que se genera por cada tonelada de acero producido en hornos de arco eléctrico, tanto en el ámbito Español como en la Comunidad Autónoma del País Vasco.

5.3.6.1 VOLUMEN DE ESCORIAS DE ACERÍA EN ESPAÑA

En el caso de España, como no se tienen datos concretos de generación de escoria de acería se calculará en base a la producción de acero.

Según los datos facilitados por el CEDEX [11], el proceso de fusión produce entre 110 y 150 kg de escoria negra por tonelada de acero, y el proceso de afino, entre 20-30 kg de escoria blanca por tonelada de acero.

Considerando dicha relación de generación de escorias que se producen en España por tonelada de acero, se obtienen las siguientes cantidades de escorias de acería, correspondientes a la producción de acero común o especial del año 2018 recogida en apartados anteriores:

PRODUCCIÓN DE ACERO (t)	GENERACIÓN DE ESCORIA Kg/t DE ACERO		PRODUCCIÓN DE ESCORIAS (t)
14.320.000	Escoria Negra	110-150	1.861.600
	Escoria Blanca	20-30	358.000

Tabla 3. Producción anual de escorias de acería [Elaboración Propia]

Por lo tanto, considerando la producción anual del año 2018, la cual asciende a 14.320.000 t de acero, el **volumen de escorias negras generado en España es de 1.861.600 t**, cifra bastante elevada, suponiendo un 13% del volumen de acero producido.

5.3.6.2 Volumen de Escorias de Acería en la CAPV

Históricamente las escorias de acería han tenido una contribución muy importante a la generación de residuos en la CAPV debido a la gran concentración de acerías, tanto si se compara con el resto del Estado como con Europa.

En el año 2018 las escorias de acería fueron el segundo residuo más importante en términos de generación de la CAPV, con una contribución del 13,25% respecto al total de residuos inventariados, aunque cabe mencionar, que debido a la desindustrialización paulatina en la que se encuentra el País Vasco, el volumen de escoria de acería es menor que en años anteriores. [29]

CANTIDAD DE ESCORIA GENERADA EN LA CAPV

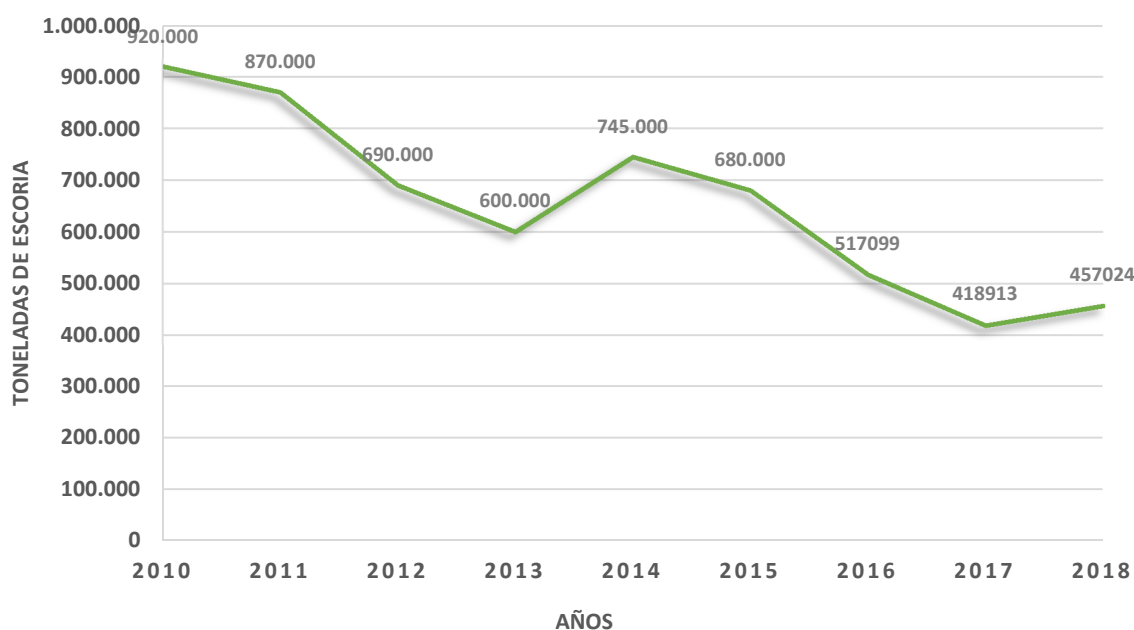


Gráfico 1. Evolución de la generación de escorias de acería en la CAPV años 2010-2018. [Elaboración Propia]

En total, la generación de las escorias ascendió en 2018 a 457.024 toneladas, donde un 81% corresponde con la generación de escorias negras, y el 19% restante corresponde a escoria blanca y otras escorias, como se puede comprobar en la siguiente tabla. [29]

TIPOS DE ESCORIAS		
Blanca + otras escorias (t)	Negra (t)	Total 2018 (t)
86.835	370.189	457.024
19%	81%	100%

Tabla 4. Clasificación de las escorias de acería en función del tipo de escoria (2018) [Elaboración Propia]

Por lo tanto, considerando la producción anual del año 2018, el **volumen de escorias negras en la CAPV asciende a 370.189 t**, suponiendo un 6,40% del volumen de acero producido y un 13,25% respecto al total de residuos inventariados en la CAPV, porcentaje bastante elevado.

En lo que respecta a la distribución territorial, Bizkaia es el territorio donde se genera la mayor cantidad de escoria (57%), seguida de Gipuzkoa (31%) y, finalmente de Álava (12%).

PORCENTAJE DE GENERACIÓN DE ESCORIAS POR PROVINCIA

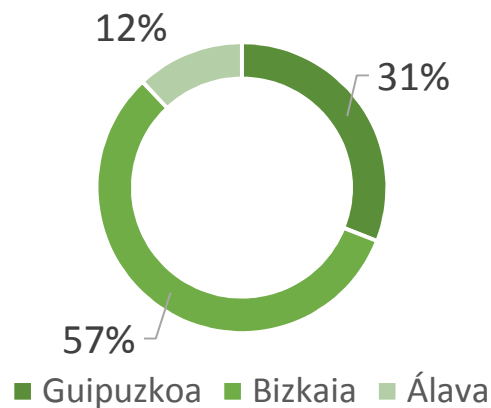


Gráfico 2. Distribución de la generación de Escorias de Acería por territorio histórico [Elaboración Propia]

5.4 PROPIEDADES DE LAS ESCORIAS DE ACERÍA

Como ya se ha comentado, del proceso de fabricación del acero mediante horno de arco eléctrico se obtienen dos tipos de escorias, blancas y negras.

En el presente apartado se profundizará en las propiedades de ambas escorias antes de ser procesadas, ya que al proceder de distintas etapas del proceso metalúrgico del acero, tienen distinta composición, siendo la motivación principal del presente proyecto la valorización, únicamente de las escorias negras.

5.4.1 ESCORIAS NEGRAS DE ACERÍA

Como ya se ha mencionado en apartados anteriores, mediante el proceso de fusión en el horno de arco eléctrico se obtiene acero líquido y, nadando sobre la superficie, escoria negra, que se extrae por una de las puertas del horno.

Las escorias negras de HAE destacan por su heterogeneidad, es decir, las formas que tienen los granos tienden a no ser regulares y cavernosas, mientras que la composición química dependerá de la chatarra utilizada en la producción del acero y de las variables operacionales del proceso productivo. El método de extracción del horno también influye en el aspecto y forma de la escoria.

5.4.1.1 PROPIEDADES FÍSICAS

En la escoria negra pueden encontrar granos bastante redondeados o granos con formas abruptas, e incluso oclusiones superficiales similares a burbujas de aire. La diferencia en la

textura superficial no se encuentra entre diferentes granos, sino que es común que se encuentre entre diferentes caras del mismo grano.

El color de la escoria negra varía desde gris muy oscuro hasta gris claro. A su vez también destacan en algunos granos tonalidades marrones, grises y blancas. El gris es debido a la presencia de partículas de hierro metálicas mientras que el blanco es debido a la presencia de cal. [11]

Como ya se ha mencionado, los métodos de extracción de la escoria en los hornos también determinarán las características de la misma. [11]

- Vertida directamente al suelo: Se enfría con agua para que pueda ser transportada con camiones. Presenta un aspecto muy poroso, tamaño relativamente pequeño y estado vítreo.
- Vertida en un cono de fundición: Se vierte posteriormente en un foso y se deja enfriar. Presenta un aspecto menos poroso y es más cristalina.
- Vertida en un cono de fundición y se deja enfriar: Se extrae del cono una vez fría, obteniendo una escoria compacta, con pocos poros, dura y muy cristalina.



Ilustración 19. Escorias negras tras su extracción del horno y enfriamiento [CEDEX]

En cuanto a las propiedades físicas de las escorias Españolas antes de someterlas a ningún tratamiento para su reutilización, se ha obtenido los siguientes resultados de caracterización física: [30]

PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS ESCORIAS NEGRAS		
Propiedad	Árido Grueso	Árido Fino
Tamaño (mm)	4,76 – 25,0	0 – 4,76
Densidad Aparente (Mg/m ³)	3,35	3,70
Absorción (%)	3,29	2,84
Porosidad (%)	10,5	-
Desgaste de Los Ángeles (%)	≈ 20	-

Tabla 5. Propiedades físicas de los áridos procedentes de escorias negras [30]

5.4.1.2 PROPIEDADES QUÍMICAS

Aclarados en el apartado anterior los factores y variables que pueden condicionar la composición química de las escorias negras, pueden tomarse como representativos los porcentajes recogidos en la siguiente tabla: [27] [31] [32]

COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS ESCORIAS NEGRAS	
Sustancia	Rango (%)
Ca O	22 - 60
Si O ₂	11 - 37
Fe O	0,5 - 4
Fe ₂ O ₃	38
Mg O	4 - 12
Cr ₂ O ₃	1 - 8
Ti O ₂	0,6 - 2
MnO	1 - 4
Al ₂ O ₃	2 - 8
P ₂ O ₆	0 - 0,02

Tabla 6. Composición química de las escorias negras de acería [27] [31] [32]

Por otra parte, para el caso concreto de las escorias estudiadas en España se han obtenido los siguientes resultados de composición química: [30]

COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS ESCORIAS NEGRAS ESPAÑOLAS		
Sustancia	Rango (%)	Valor Medio (%)
Ca O	23,0 - 32,0	25
Ca O libre	0 – 0,4	2
Si O ₂	8,0 - 15,0	11
Fe O	7,0 - 35,0	25
Fe ₂ O ₃	11,0 - 40,0	25
Mg O	4,8 - 6,6	5
Mn O	2,5 – 4,5	4
Al ₂ O ₃	3,5 – 7,0	5

Tabla 7. Composición química de la escoria de acería española [30]

5.4.2 ESCORIAS BLANCAS

La escoria blanca de acería se produce en las últimas etapas de afino del proceso de fabricación del acero. Sus características vienen determinadas por el concreto afino llevado acabo y posterior enfriamiento. Su composición y estructura química difiere según su origen, con mayor sensibilidad que las escorias de altos hornos o negras. Esto es, la composición y estructura de la misma variará si hay cambios en el proceso de fabricación, incluso si se trata del mismo productor. Si además añadimos el hecho de que el proceso de meteorización produce considerables cambios, la exposición atmosférica de las pilas de escoria se debe tener en cuenta a la hora de caracterizar la misma.

5.4.2.1 PROPIEDADES FÍSICAS

La inspección ocular de la escoria blanca permite afirmar que se trata de una material de color blanquecino, granular, polvorienta y que se disgrega al tocarla. Su gran contenido de finos se debe al ya mencionado efecto de pulverización que sufre el material al enfriarse.

Tras analizar la escoria blanca de horno de cuchara procedente de la factoría de la empresa Tubos Reunidos (Álava, España), tras un período de tratamiento de dos años hasta su correcta estabilización, arroja los siguientes resultados: [33]

PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS ESCORIAS BLANCAS	
Propiedad	Árido Grueso
Superficie específica (cm ² /g)	2064
Densidad (g/m ³)	2,65
Tamaño (µm)	2 - 200

Tabla 8. Propiedades físicas de las escorias blancas [33]

Debido a los procesos de hidratación y carbonatación de los diferentes compuestos presentes en la escoria blanca, ésta sufre variaciones volumétricas, por lo que se la considera altamente expansiva en presencia de agua.

El incremento de volumen principalmente tiene lugar en las primeras horas desde la extracción del horno. El primer periodo de expansión (0-20 h) es apreciable y se debe a la hidratación de la cal, el segundo periodo de expansión y menos pronunciado 20-140 h se debe a la hidratación más lenta de la periclase. [30]

5.4.2.2 PROPIEDADES QUÍMICAS

En las escorias blancas, procedentes de la fase de afino, más del 60% de su peso está compuesto por óxidos de calcio y magnesio. El óxido de calcio es necesario para mantener la basicidad de la escoria, mientras que el óxido de magnesio se añade con el fin de proteger las paredes refractarias del horno cuchara.

Los óxidos ácidos presentes son los correspondientes a los 13 óxidos de silicio y aluminio, cuya concentración conjunta en general es inferior al 40% del peso total. En menor medida están los óxidos alcalinos, de hierro, de manganeso y de titanio, los sulfuros (del proceso de desulfuración), fluoruro de calcio y otros. Además, las escorias blancas de acería se caracterizan por su contenido en metales pesados como cromo, zinc o plomo (inferior al 1%) y el reducido tamaño de sus partículas. [30]

Ensayos químicos realizados en nuestro país establecen la siguiente composición para las escorias blancas de acería: [11]

COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS ESCORIAS BLANCAS	
Sustancia	Rango (%)
Ca O	45,3 - 62,1
Si O ₂	17,4 - 19,3
Fe O	0,0 - 0,95
Fe ₂ O ₃	1,1 - 3,6
Mg O	4,5 - 17,2
Mn O	0,0 - 1,2
Al ₂ O ₃	3,2 - 10,4
S	1,45 - 1,65
C	0,0 - 0,03
Fluoruro	1,4
Sulfuro (mg/kg)	503
Zinc (ppm)	596
Plomo (ppm)	84
Cobre (ppm)	200
Cromo (ppm)	150
Níquel (ppm)	80

Tabla 9. Composición química de las escorias blancas de acería [11]

Una vez analizado el proceso metalúrgico del cual proceden las escorias, su volumen y su caracterización tanto física como química tras ser extraídas del horno, cabe mencionar, que para cualquier valorización, estas escorias deberán ser tratadas de acuerdo a las normativas vigentes correspondientes a la futura aplicación de las mismas.

En los próximos apartados, se analizarán las posibilidades de valoración de la escoria negra, ya que es la que históricamente presenta mayores posibilidades de valorización debido a su similitud a los áridos empleados en el sector de la construcción, y a que, como ya se ha comprobado en apartados anteriores, es la escoria que presenta un mayor volumen como residuo de los HEA y que actualmente una gran parte es desechado en vertedero.

6 VALORACIÓN DE LA ESCORIA EN EL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN

Dada la alta producción de acero en el País Vasco y, por consiguiente, de escoria, el volumen de escoria negra generado durante la última década del siglo XX, condujo a que las administraciones vascas establecieran el marco normativo y metodológico para la regulación de la valorización y posterior utilización de las escorias negras, procedentes de la fabricación de acero en HEA, en sector de la construcción para el ámbito de la Comunidad Autónoma del País Vasco, que quedó plasmado en la publicación del Decreto 34/2003. [14]

Durante los últimos años, se han ido implantando en la Comunidad Autónoma del País Vasco diversas plantas de producción de árido siderúrgico a partir de la valorización de escoria negra de fusión de HEA, siendo estos gestores o valorizadores autorizados, para su uso en aplicaciones relacionadas con el sector de la construcción y que garantizaran demandas de mercado más sostenibles y con miras a una economía circular. [18]

Así mismo, las aplicaciones constructivas en las que ha sido utilizado el árido son diversas, siendo este bastante utilizado en obras promovidas por administraciones públicas. A continuación, se presenta un listado de obras de valorización de escoria llevadas a cabo en la CAPV. [20]

PROYECTO	FECHA	UTILIZACIÓN
Eje Ballonti	2006	Material granular para capa de Rodadura S12
Acceso a Nervacero desde Ballonti	2006	Material granular para capa de rodadura Intermedia S20
GI-3851	2007	Zahorra en capas estructurales de firmes en carreteras
Edificio KUBIK (Parque Tecnológico de Zamudio)	2009	Material granular en la fabricación de hormigón estructural
Obras de pavimentación y ampliación del puerto de Pasajes	2012	Material granular en proyectos de urbanización bajo superficie sellada
Eje Plentzia-Mungia Fase 2	2013	Material granular en ejecución de carreteras, explanadas o terraplenes.
Urbanización del entorno del Barrio de San Mamés	2014	Material para confección de prefabricados y baldosas hidráulicas
Urbanización y aledaños del Puente Frank Gehry en Zorrozaurre	2015	Material para confección de prefabricados y baldosas hidráulicas

Tabla 10. Ejemplos de valorización de árido siderúrgico en el sector de la construcción de la CAPV [20]

Además, la Autoridad Portuaria de Bilbao ha llevado a cabo en los últimos años numerosas obras en las que ha incorporado árido siderúrgico como sustitutivo del árido natural, pero estos, se analizarán de manera más detallada en apartados posteriores.

Siendo la valorización de la escoria negra en el sector de la construcción una práctica real, a día de hoy, que valoriza aproximadamente el 63% de las escorias negras de acería generadas anualmente en la CAPV (22) y teniendo en cuenta la creciente demanda de nuevos usos del sector de la construcción, se ha llegado a que el Decreto 34/2003 haya quedado, en parte, obsoleto en cuanto a aplicaciones de uso.

En consecuencia, las administraciones públicas vascas identificaron la necesidad de que la gestión de los residuos en el País Vasco evolucione hacia un marco metodológico común y estandarizado y, en general, más alineado con las directrices y prácticas de economía circular llevadas a cabo a nivel europeo.

Fruto de dicho análisis, en los últimos años la administración pública vasca ha publicado numerosas leyes, guías y planes que impulsan y definen los usos del árido siderúrgico en el sector de la construcción. Entre ellos, destacar el “Decreto 64/2019, de 9 de abril, por el que se establece el régimen jurídico aplicable a las actividades de valorización de escorias negras procedentes de la fabricación de acero en hornos de arco eléctrico y su posterior utilización como árido siderúrgico” [15], la “Guía de aplicación del decreto de actividades de valorización de escorias negras de fabricación de acero en hornos de arco eléctrico y su utilización como árido siderúrgico” [18] o el “Plan de prevención y gestión de residuos de la CAPV 2020” [4] donde se establecen planes como:

- Analizar conjuntamente con el sector los posibles usos actuales de la escoria fomentando si procede el desarrollo de otras normas.
- Con respecto a los áridos reciclados, desarrollar herramientas de Compra Pública Verde; promover acuerdos con los Departamentos de Vivienda y Transportes, grandes constructoras, arquitectos, ayuntamientos, etc.
- Incorporar en normativa la obligatoriedad del consumo de áridos reciclados en obras públicas en porcentajes máximos coherentes con los distintos usos prescritos en la Orden técnica de usos de áridos reciclados del Gobierno Vasco.

Por lo tanto, en los próximos apartados, se analizarán las posibilidades de valorización de la escoria negra de acería en el sector de construcción, de acuerdo al marco normativo de la CAPV, además de, los tratamientos necesarios para el uso de la escoria como árido siderúrgico y, un claro ejemplo de buenas prácticas en la valorización de escoria de acería en grandes obras civiles y portuarias, llevadas a cabo por la administración pública de la Autoridad Portuaria de Bilbao.

6.1 TRATAMIENTO DE LA ESCORIA

Las escorias negras de HAE están constituidas, mayoritariamente, por cal, sílice, magnesia, alúmina y óxidos de hierro. Éstas no presentan propiedades hidráulicas y puzolánicas latentes, por lo que su mayor potencial aprovechamiento en aplicaciones de infraestructura civil y edificación ha de orientarse hacia la valorización como material granular. [18]

El proceso de valorización de la escoria negra de HEA, para obtener un material granular denominado como árido siderúrgico, contempla tratamientos previos dirigidos a eliminar elementos metálicos, a obtener usos granulométricos comerciales, así como a garantizar la estabilidad volumétrica del material granular resultante. Por su parte, la empresa gestora o valorizadora de esta escoria ha de garantizar el cumplimiento de los siguientes criterios técnicos en el ámbito de operación de la Comunidad Autónoma del País Vasco.

En los próximos apartados, se detallarán las etapas y tratamientos a los que deberá someterse la escoria negra, a fin de generar árido siderúrgico adecuado según los criterios técnicos de la CAPV. Estas etapas están recogidas de manera esquemática en el siguiente gráfico.



Gráfico 3. Tratamientos previos de la escoria para su utilización como árido siderúrgico [APB]

Dichos tratamientos previos, fijados por varias administraciones públicas de la CAPV, a fin de impulsar la valorización de escorias negras en el sector de la construcción bajo un marco normativo común, así como las posibilidades de valorización en dicho sector, se recogen en los siguientes documentos:

- La “Guía de aplicación del decreto de actividades de valorización de escorias negras de fabricación de acero en hornos de arco eléctrico y su utilización como árido siderúrgico” de IHOBE. [18]
- El “Decreto 64/2019, de 9 de abril, por el que se establece el régimen jurídico aplicable a las actividades de valorización de escorias negras procedentes de la fabricación de acero en hornos de arco eléctrico y su posterior utilización como árido siderúrgico” publicado en el Boletín Oficial del País Vasco. [15]
- El “Decreto 34/2003, de 18 de febrero, por el que se regula la valorización y posterior utilización de escorias procedentes de la fabricación de acero en hornos de arco eléctrico, en el ámbito de la Comunidad Autónoma del País Vasco” publicado en el Boletín Oficial del País Vasco. [14]

6.1.1 ALMACENAMIENTO DE LA ESCORIA NEGRA

Al objeto de evitar la contaminación de la escoria negra con otro tipo de subproductos siderúrgicos, se deberán asegurar espacios de acopio de escorias, suficientemente compartimentados, en las instalaciones siderúrgicas. Se habrá de establecer separación física suficiente entre acopios, tales que garanticen que la escoria blanca no entra en contacto con la escoria negra. [15]

6.1.2 ENVEJECIMIENTO O ESTABILIZACIÓN DE COMPUESTOS EXPANSIVOS

Para producir aceros de alta calidad se precisan, por razones metalúrgicas, elevadas adiciones de cal. Como consecuencia de este proceso, las escorias de acería presentan altos contenidos de CaO (óxido de calcio). El óxido de calcio, en las escorias enfriadas, se encuentra en forma de silicatos, tri- y bicálcicos, junto con ferritos, aluminatos, así como en forma de cal libre (CaO libre) o residual, no disuelta en el desarrollo del proceso de producción de acero.

Dicha cal libre puede, en presencia de humedad, hidratarse y producir, debido a la mayor exigencia de volumen de la fase hidratada, un deterioro de la estructura de la escoria de acería. Además del contenido de cal libre, la porosidad, y consiguientemente la accesibilidad para la humedad, es un criterio esencial respecto a la resistencia al hinchamiento.

Adicionalmente, la presencia de magnesia libre (MgO libre), puede determinar, de forma deletérea, la estabilidad o resistencia al hinchamiento de la escoria negra de la etapa de fusión. La magnesia libre, en forma cristalina de periclasa, constituye una parte muy significativa de la expansividad potencial de la escoria.

El envejecimiento o maduración de la escoria negra se viene realizando mediante exposición inducida a la intemperie, más o menos prolongada en el tiempo. El regado y volteo (ciclos de humedad-sequedad) de las escorias en los depósitos y acopios se revela como un remedio eficaz para su estabilización, ya que se propician los fenómenos de expansión mediante la hidratación y carbonatación de la cal y magnesia libres, antes de ser utilizadas en la fabricación de otros materiales. Otras opciones para el envejecimiento de la escoria puede ser el acopio en presencia de CO₂ atmosférico u otros procesos de carbonatación acelerada dirigidos a transformar los compuestos expansivos en carbonatos. [15]

Por lo tanto, será de vital importancia realizar dichos procesos de envejecimiento para garantizar la estabilización de los compuestos potencialmente expansivos contenidos en la escoria negra de origen o áridos siderúrgicos subsiguientes.



Ilustración 20. Procesos de envejecimiento y maduración de escoria negra [18]

Para ello, se recomienda realizar se recomienda extender el material en una superficie amplia, sobre capa impermeable, sometiéndolo a ciclos de humectación-secado durante el tiempo necesario que garantice suficiente estabilización volumétrica de los compuestos expansivos (cal y magnesia libre), así como una disminución de la lixiviación de metales pesados de acuerdo a los requerimientos establecidos en los diferentes usos. El proceso de maduración o envejecimiento es principalmente efectivo durante los primeros 45 días, estabilizándose a partir de ese momento.

Como ya se ha mencionado en apartados anteriores, destacar que un enfriamiento rápido de la escoria líquida induce una estructura porosa en el subsiguiente árido siderúrgico como consecuencia de una mayor presencia de burbujas de aire ocluido, mientras que un enfriamiento lento da lugar a estructuras más densas.

Dicha porosidad determina la densidad y absorción de las partículas granulares obtenidas tras la valorización físico-mecánica de la escoria. Con todo, la porosidad es función de la cantidad de gases ocluidos en las escorias en líquido durante los procesos de espumado en el HEA.

Con todo, el período de estabilización de la escoria puede variar entre 72 horas y 4 meses en función del tipo de escoria, el proceso de enfriamiento, el objetivo de expansión deseable para una determinada aplicación y el procedimiento de envejecimiento adoptado.

En cualquier caso, el árido siderúrgico se considerará suficientemente estable si el valor de la expansión, determinado de acuerdo al apartado 19.3 de la UNE EN 1744 [34], resulta ser adecuado para el uso propuesto.

6.1.3 MACHAQUEO O MOLINO PRIMARIO

La escoria se triturará utilizando cualquier tecnología de machaqueo que garantice tamaños adecuados, caras de fractura y mayor optimización de la eliminación de elementos metálicos embebidos en la escoria primigenia. El producto de machaqueo tendrá que respetar la granulometría requerida en cada uso. [15]



Ilustración 21. Planta móvil de machaqueo de escoria negra [KLEEMANN]

6.1.4 DESFERRETIZACIÓN O SEPARACIÓN MAGNÉTICA

Al menos debe existir 1 sistema de desferretización o separación magnética. Se recomienda instalar imanes en al menos 2 etapas del proceso de tratamiento de la escoria, al objeto de extraer el máximo contenido de hierro metálico. [15]

6.1.5 CRIBADO

El material granular se transportará a través de cintas hasta las cribas, clasificándose por tamaños, de acuerdo a los usos comerciales requeridos por el mercado. [15]



Ilustración 22. Sistema de cribas de material granular procedente del tratamiento de escoria negra [18]

6.1.6 ACOPIO DIFERENCIADO POR FRACCIONES DE MATERIAL GRANULAR SIDERÚRGICO

El material granular se clasificará atendiendo a fracciones granulométricas diferenciadas, en función de los usos comerciales declarados por el gestor o valorizador. Las fracciones deberán ser acopiadas sobre capa impermeable para evitar la lixiviación. [15]



Ilustración 23. Acopio de fracciones diferenciadas de árido siderúrgico sobre capa impermeable [18]

6.1.7 CARACTERIZACIÓN DEL ÁRIDO SIDERÚRGICO

El empleo de áridos siderúrgicos en aplicaciones constructivas representa una potencial afección ambiental ligada a la posible liberación de sus componentes. Por ello, se han de establecer una serie de criterios y requisitos que garanticen un comportamiento aceptable de este producto y que preserven al medio de este riesgo potencial. [18]

En este sentido, como paso previo a la expedición del árido siderúrgico, procedente del tratamiento de la escoria negra, el gestor-valorizador deberá determinar el potencial de lixiviación, contenido total en metales pesados y expansividad, atendiendo a los criterios establecidos en el decreto 64/2019 [15]. Teniendo en cuenta que, los valores prescritos en dicho decreto, lo serán sin perjuicio del cumplimiento de los requisitos técnicos de las aplicaciones atendiendo al uso final al que aquellas se destinen.

Mencionar, que los criterios, recogidos por el decreto 64/2019, se aplicarán dependiendo de la aplicación final del árido siderúrgico, diferenciando 3 tipos de aplicaciones (estas aplicaciones serán analizadas en apartados posteriores): [15]

- Tipo 1. Aplicaciones ligadas
- Tipo 2. Aplicaciones no liadas con cobertura no totalmente impermeable
- Tipo 3. Aplicaciones no liadas con cobertura totalmente impermeable

A continuación, se analizarán los criterios para la caracterización del árido siderúrgico en base a lo recogido en el Anexo II del Decreto 64/2019. [15]

6.1.7.1 CRITERIOS AMBIENTALES

Los áridos siderúrgicos empleados en aplicaciones ligadas (tipo 1) no precisarán de medidas de control ambiental toda vez que queda acreditada la ausencia de afección al medio. Por otro lado, los áridos siderúrgicos empleados en aplicaciones no ligadas (tipos 2 y 3) estarán sujetos a los siguientes criterios de evaluación y control ambiental: [15]

TIPO	CONDICIONES DE USO	ELEMENTOS DE IMPERMEABILIZACIÓN
Tipo 2	Usos donde se emplee el árido como material granular y cumpla criterios ambientales. Coberturas no totalmente impermeables.	<ul style="list-style-type: none"> – Cobertura de material granular compactado (densidad superior a 97% PM) con granulometría continua en espesor no inferior a 25 centímetros. – Superficie con inclinación igual o superior a 3H:1V vegetada. – Cualquier otro elemento con análogas propiedades.
Tipo 3	Usos donde se emplee el árido como material granular y cumpla criterios ambientales. Cobertura con un alto nivel de impermeabilización.	<ul style="list-style-type: none"> – Solera o pavimento de hormigón de espesor mínimo de 20 centímetros. – Gravacemento, de espesor mínimo de 20 centímetros. – Capas asfálticas tipo hormigón bituminoso (espesor igual o superior a 5 centímetros). – Lámina de impermeabilización (por ejemplo, de PE de alta densidad) protegida por geotextiles. – Cualquier otro elemento con análogas propiedades.

Tabla 11. Tipos de aplicación de los áridos siderúrgicos, condiciones de usos y elementos de impermeabilización [15]

6.1.7.2 CONTENIDO TOTAL DE METALES

En aquellas aplicaciones en las que el árido siderúrgico se emplee en contacto directo con el suelo de acuerdo con los tipos 2 y 3, dicho árido deberá presentar unas concentraciones totales inferiores, de forma genérica, a las establecidas en la siguiente tabla. [15]

PARÁMETRO	VALOR LÍMITE (MG/KG)
Arsénico (As)	30
Cadmio (Cd)	5
Cobre (Cu)	10.000
Cromo (Cr) (VI)	8
Cromo (Cr) total	10.000
Mercurio (Hg)	4
Molibdeno (Mo)	75
Níquel (Ni)	110
Plomo (Pb)	120
Zinc (Zn)	10.000
Vanadio (V)	1.000

Tabla 12. Valores límite de contenido total de metales en árido siderúrgico para aplicaciones no ligadas [15]

6.1.7.3 LIXIVIACIÓN

De cara a prevenir el potencial impacto ambiental de la aplicación de áridos siderúrgicos derivados de la emisión de sustancias contaminantes se deberá llevar a cabo un control de su lixiviación. Para ello, se someterán al ensayo de lixiviación según norma UNE-EN-12457-4 [35] acreditándose la no superación de los valores límite de lixiviación establecidos en la siguiente tabla. [15]

Parámetro	Lixiviación UNE-EN-12457-4	
	Tipo 2 (mg/kg)	Tipo 3 (mg/kg)
Arsénico (As)	0,5	0,6
Bario (Ba)	20	25
Cadmio (Cd)	0,04	0,05
Cromo (Cr) total	0,5	2
Cromo (Cr) VI	0,1	0,4
Cobre (Cu)	2	3
Mercurio (Hg)	0,01	0,01
Molibdeno (Mo)	0,5	2,8

Níquel (Ni)	0,4	0,5
Plomo (Pb)	0,5	0,6
Antimonio (Sb)	0,06	0,08
Selenio (Se)	0,1	0,4
Zinc (Zn)	4	5
Cloro (Cl)	800	5.000
Flúor (F)	18	30
SO ₄	1.000	5.000
Vanadio (V)	1,5	4

Tabla 13. Valores límite de lixiviación de árido siderúrgico en aplicaciones no ligadas para Tipos 2 y 3 [35]

6.1.7.4 EXPANSIVIDAD

Se deberá llevar a cabo un control de la expansividad, determinada de acuerdo al apartado 19.3 de la UNE-EN 1744 [34], acreditativo de que no se ha producido la mezcla de escorias negras con escorias blancas.

6.1.7.5 FRECUENCIA DE LOS MUESTREOS

Será obligatorio el control y la monitorización ambiental a lo largo del tiempo según los criterios descritos anteriormente, y de acuerdo a la periodicidad y condiciones de muestreo y análisis detallados a continuación.

PRODUCCIÓN ANUAL	Nº DE MUESTRAS	FRECUENCIA
< 30.000 Tm/año	1	3 meses
< 30.000 Tm/año	1	1 mes

Tabla 14. Frecuencia de muestreo y control de la producción de árido siderúrgico [15]

6.2 UNIDADES DE OBRA DE IMPLMENTACION

El Decreto 64/2019 regula la valorización de escorias negras procedentes de la fabricación de acero en hornos de arco eléctrico, estableciendo la relación de usos para los que las mismas se consideran aptas, una vez transformadas en áridos siderúrgicos, si bien tal relación de usos se establece desde una valoración exclusivamente medioambiental.

Por ello, la utilización final de las escorias valorizadas debe ajustarse, también, a los requisitos técnicos de carácter constructivo y a aquellos otros que pudieran resultar de aplicación en función del destino final propuesto.

Las entidades usuarias finales del árido siderúrgico, además del resto de las obligaciones establecidas en el Decreto 64/2019, deberán cumplir con las siguientes obligaciones: [15]

- Utilizar árido siderúrgico que proceda exclusivamente de instalaciones autorizadas.
- Disponer de la documentación acreditativa del cumplimiento de las condiciones ambientales según lo descrito en el Decreto, así como la correspondiente al mercado CE del árido siderúrgico.
- Utilizar el árido siderúrgico conforme a los usos establecidos en el Decreto.
- Facilitar al suministrador de árido siderúrgico información en relación a los usos concretos que se vayan a dar a los áridos siderúrgicos.
- Incorporar, en su caso, información relativa a la utilización de áridos siderúrgicos a la documentación técnica.

Las aplicaciones contemplados como admitidos para la utilización de áridos siderúrgicos, además de los que se destinen como materia prima en otros procesos de fabricación industrial (fabricación de cemento, lana de roca, etc) en la CAPV se describen a continuación agrupadas en 3 posibles categorías, siempre bajo la consideración de los criterios ambientales de aceptación descritos en el decreto 64/2019.

Como ya se ha mencionado, por un lado, se tienen las aplicaciones ligadas (escenario 1), y por otro, las aplicaciones no ligadas, dentro de las cuales, encontramos dos escenarios posibles, que estarán asociados a los índices de lixiviación del material y a las condiciones de uso (impermeabilización) requeridas, siendo estas las aplicaciones ligadas con cobertura no totalmente impermeable (escenario 2) y con cobertura totalmente impermeable (escenario 3). [15]

6.2.1 APLICACIONES LIGADAS

Se refiere al uso de los materiales granulares mezclados con cualquier tipo de conglomerante que confiere cohesión al conjunto encapsulando los áridos dentro de una matriz inorgánica, donde su exposición al medio y la liberación de componentes se consideran nulas o despreciables. [9]

6.2.1.1 *HORMIGÓN ESTRUCTURAL*

Se define como hormigón al material compuesto empleado en construcción, formado esencialmente por un aglomerante al que se añaden partículas de un agregado, agua y aditivos específicos.

El hormigón estructural es el utilizado habitualmente en la ejecución de cualquier tipo de estructura, bien sea de obra civil o de edificación. Su dosificación, fabricación, amasado, transporte así como su control de calidad, vienen definidos por las prescripciones de la instrucción EHE 08 REAL DECRETO 1247/2008, de 18 de julio, por el que se aprueba la instrucción de hormigón estructural. [9]

➤ HORMIGÓN PREPARADO

Se denomina hormigón preparado a aquel que se fabrica en una central que no pertenece a las instalaciones propias de la obra y que está inscrita en el estandando dicha inscripción a disposición del peticionario y de las Administraciones competentes. Al estar fabricado en una central fija, este tipo de hormigón posee características específicas y controladas evitando así problemas derivados de la fabricación en obra (problemas de homogeneización, malas dosificaciones...). [18]

Los áridos siderúrgicos se podrán utilizar en forma de árido grueso y árido fino o combinaciones de estas con áridos naturales o artificiales siempre que el material combinado cumpla las especificaciones del artículo 28 de la EHE-08 [9]. De acuerdo a la experiencia existente se recomienda garantizar valores de expansión del árido siderúrgico, inferiores al 0,5%. [34]

➤ PREFABRICADOS DE HORMIGÓN: BLOQUES, BORDILLOS, PAVIMENTOS, BARRERAS, TUBERÍAS, ETC.

Se define como producto prefabricado de hormigón todo aquel elemento de dicho material que es ejecutado en una fábrica o lugar diferente del emplazamiento definitivo de la estructura, protegido de condiciones climáticas desfavorables y bajo un proceso industrial de control de producción definido. [18]

Los áridos siderúrgicos se podrán utilizar, para la fabricación del hormigón, en forma de árido grueso y árido fino o combinaciones de estas con áridos naturales o artificiales siempre que el material combinado cumpla las especificaciones del Artículo 28 de la EHE-08 [9]. De acuerdo a la experiencia existente se recomienda garantizar valores de expansión del árido siderúrgico, inferiores al 0,3%. [34]

➤ CAJONES DE HORMIGÓN PARA DIQUES PORTUARIOS

Los cajones flotantes son estructuras de hormigón armado de planta habitualmente rectangular, aligeradas mediante celdas verticales de diferentes formas geométricas; mayoritariamente circulares o cuadrangulares. Las infraestructuras típicas que emplean este tipo de cajones son los muelles y otras estructuras de atraque, los diques de abrigo verticales y los diques especiales tipo flotante. [18]

Los áridos siderúrgicos se podrán utilizar, para la fabricación del hormigón, en forma de árido grueso y árido fino o combinaciones de estas con áridos naturales o artificiales siempre que el material combinado cumpla las especificaciones del artículo 28 de la EHE-08 [9]. De acuerdo a la experiencia existente se recomienda garantizar valores de expansión del árido siderúrgico, inferiores al 0,3%. [34]

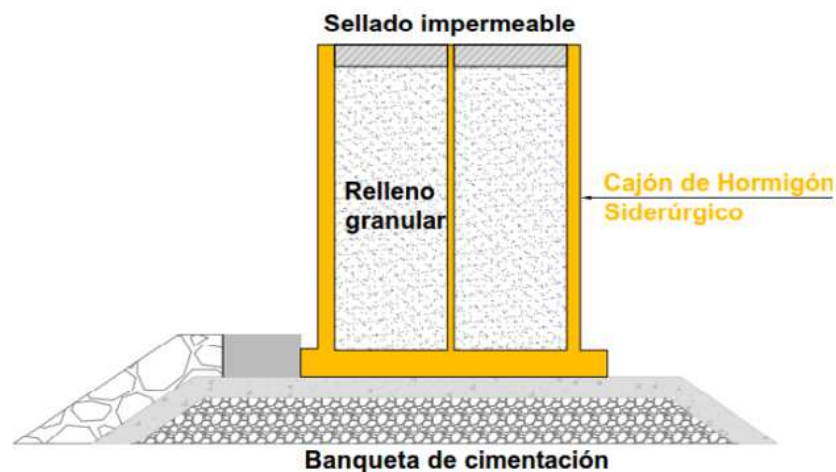


Ilustración 24. Cajón de hormigón para diques portuarios [18]

6.2.1.2 *HORMIGÓN NO ESTRUCTURAL: HORMIGONES DE LIMPIEZA, DE NIVELACIÓN, CUNETAS, ETC.*

Se definen como hormigones de uso no estructural aquellos hormigones que no aportan responsabilidad estructural a la construcción, si bien colaboran en mejorar las condiciones durables del hormigón estructural o que aportan el volumen necesario de un material resistente para conformar la geometría requerida para un fin determinado. Estos hormigones se pueden clasificar en dos clases principales: [9]

➤ HORMIGÓN DE LIMPIEZA

Es un hormigón que tiene como fin evitar la desecación del hormigón estructural durante su vertido, así como una posible contaminación de éste durante las primeras horas de su hormigonado.

Para ello, se dispone una capa de hormigón pobre, directamente sobre el terreno, de unos 10 cm de espesor, que permite dotar de rigidez, limpieza, uniformidad y nivelación adecuada a la superficie inferior de la cimentación. [18]

El hormigonado del hormigón estructural del elemento en cuestión se hace contra el hormigón de limpieza. Los áridos siderúrgicos se podrán utilizar en forma de árido grueso y árido fino o combinaciones de estas con áridos naturales o artificiales siempre que el material combinado cumpla las especificaciones del artículo 28 de la EHE-08 [9]. Se recomienda garantizar valores de expansión del árido siderúrgico, inferiores al 0,5%. [34]

El hormigón siderúrgico de limpieza se empleará directamente sobre el terreno natural, con un espesor de unos 10 cm y servirá de base para hormigones estructurales como losas de cimentación, zapatas, etc. [15]

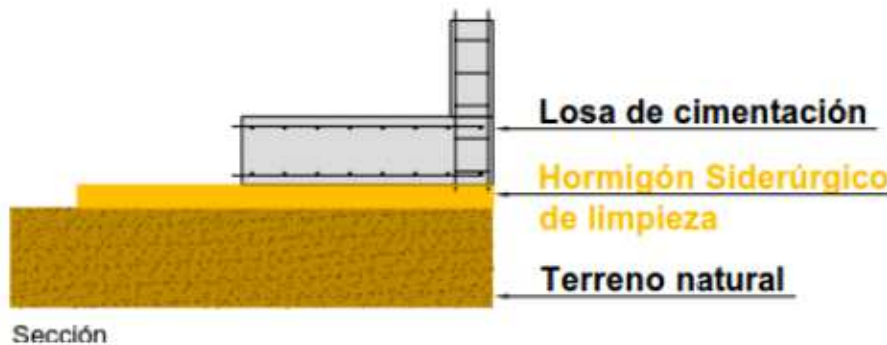


Ilustración 25. Hormigón de limpieza bajo zapata [18]

➤ HORMIGÓN DE RELLENO

Hormigón que tiene como fin conformar volúmenes de material resistente. Ejemplos de éstos son los hormigones para aceras, hormigones para bordillos y los hormigones de relleno.

Los áridos siderúrgicos se podrán utilizar en forma de árido grueso y árido fino o combinaciones de estas con áridos naturales o artificiales siempre que el material combinado cumpla las especificaciones del Artículo 28 de la EHE-08 [9]. Se recomienda garantizar valores de expansión del árido siderúrgico, inferiores al 0,5%. [34]

Estos hormigones irán situados directamente sobre el terreno natural o sobre tierras de excavación y serán empleados como base de pavimentos, relleno de trasdós de muros, relleno de envolvente en zanjas para instalaciones, etc.



Ilustración 26. Hormigón de relleno no estructural en trasdós de muro de fábrica [18]

6.2.1.3 HORMIGÓN PARA CARRETERAS

➤ PAVIMENTOS DE HORMIGÓN: CAPA INFERIOR DE PAVIMENTOS BICAPA

Se define como pavimento de hormigón el constituido por un conjunto de losas de hormigón en masa separadas mediante juntas transversales, o por una losa continua de hormigón armado. En ambos casos, eventualmente dotados de juntas longitudinales. Los espesores estarán comprendidos entre 23 y 25 cm en función del tipo de carretera. En dicho pavimento el hormigón se coloca en obra con una consistencia tal, que requiere el empleo de vibradores internos para su compactación, así como maquinaria específica para su extensión y acabado superficial. Estos pavimentos pueden construirse en una sola capa o en dos capas, de forma sucesiva entre sí, con un desfase lo más reducido posible a fin de garantizar su adherencia. [18] [9]

En los hormigones empleados para la capa inferior de pavimentos bicapa, se podrán utilizar áridos siderúrgicos pero se deberán cumplir las prescripciones técnicas exigidas en el artículo 28 de la EHE-08 [9] y se deberá declarar el origen de los materiales, tal como se establece en la legislación comunitaria sobre estas materias. Para el empleo de áridos siderúrgicos, se exige que las condiciones para su tratamiento y aplicación, así como los valores de expansión máximos permitidos, estén fijadas expresamente en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares.

Este tipo de hormigones se emplearán sobre la base de hormigón magro y bajo la capa superior de pavimentos rígidos de hormigón bicapa. El espesor total del pavimento estará comprendido entre 23 y 25cm en función del tipo de carretera. [15]

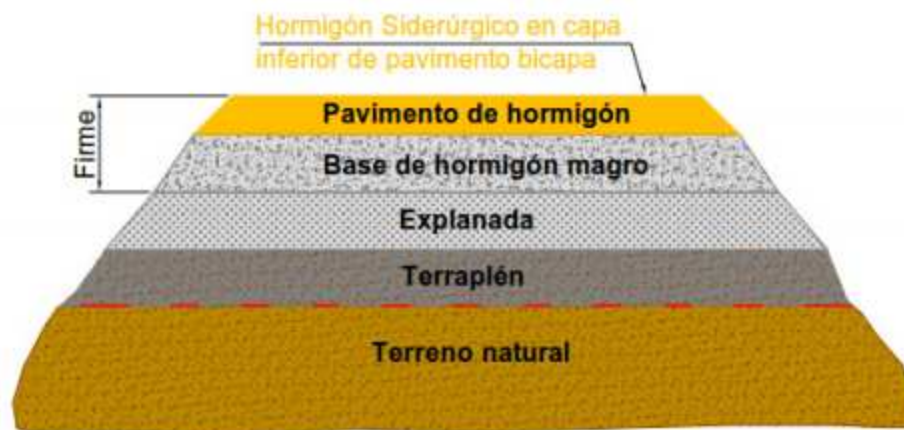


Ilustración 27. Capa inferior de pavimento hormigón bicapa [18]

➤ HORMIGÓN MAGRO VIBRADO

Se define como hormigón magro vibrado la mezcla homogénea de áridos, cemento, agua y aditivos, empleada en capas de base bajo pavimentos rígidos de hormigón o adoquines, que se coloca en obra con una consistencia tal que requiere el empleo de vibradores internos para su compactación. [9]

En los hormigones empleados para la capa inferior de pavimentos bicapa, se podrán utilizar áridos siderúrgicos pero se deberán cumplir las prescripciones técnicas exigidas en el artículo 28 de la EHE-08 [9] y se deberá declarar el origen de los materiales, tal como se establece en la legislación comunitaria sobre estas materias. Para el empleo de áridos siderúrgicos, se exige que las condiciones para su tratamiento y aplicación, así como los valores de expansión máximos permitidos, estén fijadas expresamente en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares. [18]

Se aplicará este tipo de hormigón directamente sobre la subbase o la explanada “en función de la categoría de tráfico” y se pueden disponer láminas de plástico entre las bases de hormigón magro y el pavimento de hormigón (al no existir adherencia, impide la reflexión de grietas de retracción) o una capa granular entre el hormigón magro y los adoquines. Los espesores serán de un máximo de 15 cm. [15]



Ilustración 28. Hormigón magro vibrado en base de pavimento de hormigón [18]

6.2.1.4 MATERIAL TRATADO CON CEMENTO: GRAVACEMENTO (ESCORIA CEMENTO)

Se define como material tratado con cemento a la mezcla homogénea, en las proporciones adecuadas, de material granular, cemento, agua y, eventualmente aditivos, realizada en central, que convenientemente compactada, se utiliza como capa estructural en firmes de carretera (base y/o subbase). Dependiendo del material granular utilizado se distinguen dos tipos de materiales tratados con cemento: suelocemento y gravacemento. [9]

En los hormigones empleados para la capa inferior de pavimentos bicapa, se podrán utilizar áridos siderúrgicos pero se deberán cumplir las prescripciones técnicas exigidas en el artículo 28 de la EHE-08 [9] y se deberá declarar el origen de los materiales, tal como se establece en la legislación comunitaria sobre estas materias. Para el empleo de áridos siderúrgicos, se exige que las condiciones para su tratamiento y aplicación, así como los valores de expansión máximos permitidos, estén fijadas expresamente en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares. [18]

En este caso particular, en el que se utiliza árido siderúrgico de escoria negra de acería, se denominará al material como escoria cemento. Este material se fabrica, pone en obra, compacta y termina de forma análoga a la gravacemento. Se utiliza como capa estructural en firmes de carretera en bases y/o subbases situadas justo debajo del pavimento y sobre la explanada. Los espesores de la tongada compactada estarán comprendidos entre 20 y 25 cm. [15] [18]

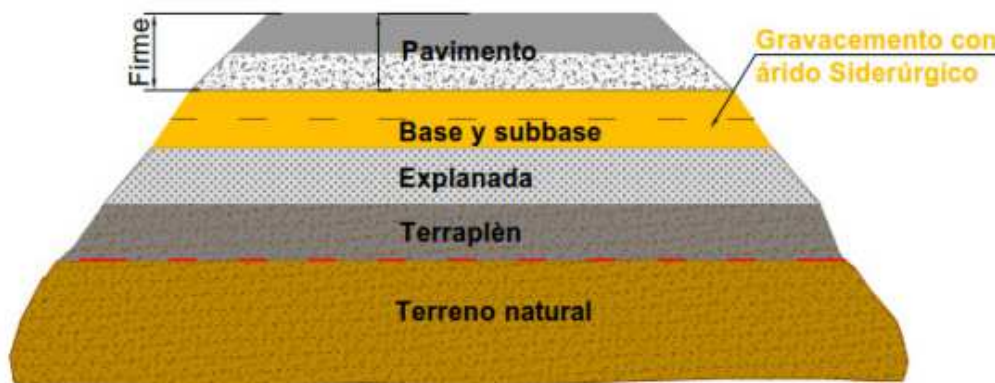


Ilustración 29. Gravacemento con árido siderúrgico (escoria cemento) en base y subbase de carretera [18]

6.2.1.5 MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE

Se define como mezcla bituminosa en caliente la combinación de un ligante hidrocarbonado, áridos (incluido el polvo mineral) y, eventualmente, aditivos, de manera que todas las partículas del árido queden recubiertas por una película homogénea de ligante. [9]

➤ HORMIGÓN BITUMINOSO

Se define como mezcla bituminosa tipo hormigón bituminoso la combinación de un betún asfáltico, áridos con granulometría continua, polvo mineral y, eventualmente, aditivos, de manera que todas las partículas del árido queden recubiertas por una película homogénea de ligante, cuyo proceso de fabricación y puesta en obra deben realizarse a una temperatura muy superior a la del ambiente. En función de la temperatura necesaria para su fabricación y puesta en obra las mezclas bituminosas tipo hormigón bituminoso se clasifican en calientes y semicalientes. [9]

En la fabricación de hormigones bituminosos se podrán utilizar áridos siderúrgicos de acería de horno eléctrico como árido grueso y árido fino o combinaciones de estas con áridos naturales o artificiales siempre que el material combinado cumpla las prescripciones técnicas exigidas en el artículo que se incluye en el Anejo 3 “Áridos siderúrgicos de horno eléctrico para mezclas bituminosas” de la Norma de dimensionamiento de firmes del País Vasco [16] y se declare el origen de los materiales, tal como se establece en la legislación comunitaria sobre estas materias. [18]

Las mezclas bituminosas fabricadas con áridos siderúrgicos de horno eléctrico deben cumplir las prescripciones de los correspondientes artículos 542 y 543 del Pliego General de Prescripciones Técnicas para Obras de Carreteras y Puentes PG-3 [12], en su caso, con las prescripciones técnicas particulares para mezclas bituminosas que acompañen al proyecto.

Los áridos siderúrgicos de acería de horno eléctrico no serán susceptibles de ningún tipo de meteorización o de alteración físico-química apreciable bajo las condiciones más desfavorables que, presumiblemente, puedan darse en la zona de empleo. Tampoco podrán dar origen, con el agua, a disoluciones que puedan causar daños a estructuras o a otras capas del firme, o contaminar el suelo o corrientes de agua. [18]

El árido siderúrgico procedente de la valorización de escorias de horno de arco eléctrico deberá presentar una expansividad inferior al 3,5% [34]. La duración del ensayo será de ciento sesenta y ocho horas (168 h) donde el contenido de cal libre del árido siderúrgico debe ser inferior al 0,5% [34]. El hormigón bituminoso se empleará en las capas inferiores del pavimento (capa base y capa intermedia) justo debajo de la capa de rodadura y encima de la capa base. La capa base tendrá espesores comprendidos entre 5 y 10 cm y la capa de rodadura entre 7 y 15 cm. [9]



Ilustración 30. Hormigón bituminoso con árido siderúrgico en pavimento flexible [18]

➤ MEZCLAS BITUMINOSAS PARA CAPA DE RODADURA

Se definen como mezclas bituminosas para capa de rodadura aquellas resultantes de la combinación de un betún asfáltico, áridos en granulometría continua con bajas proporciones de árido fino o con discontinuidad granulométrica en algunos tamices, polvo mineral y, eventualmente, aditivos, de manera que todas las partículas del árido queden recubiertas por una película homogénea de ligante, cuyo proceso de fabricación y puesta en obra debe realizarse a una temperatura muy superior a la del ambiente. [9]

En función de su granulometría las mezclas bituminosas para capa de rodadura se clasifican, a su vez, en drenantes y discontinuas. Las mezclas bituminosas drenantes son aquellas que, por su baja proporción de árido fino, presentan un contenido muy alto de huecos interconectados que le proporcionan sus características drenantes, pudiéndose emplear en capas de rodadura de cuatro a cinco centímetros (4 a 5 cm) de espesor. [9]

Las mezclas bituminosas discontinuas son aquellas cuyos áridos presentan una discontinuidad granulométrica muy acentuada en los tamaños inferiores del árido grueso, que se utilizan para capas de rodadura en espesores reducidos de dos a tres centímetros (2 a 3 cm), y cuyo tamaño máximo del árido no supera los once milímetros (< 11 mm). [9]

Se aplicarán las mismas especificaciones para el uso de árido siderúrgico que en el caso del hormigón bituminoso. [18]

Las mezclas bituminosas para capas de rodadura se dispondrán en la capa superior del pavimento, soportando directamente las solicitaciones del tráfico. La capa de rodadura tendrá espesores reducidos de entre 4 y 5 cm, contiene los materiales de mayor calidad del pavimento y su función es dotar a la carretera de las mejores propiedades de rodadura y antideslizantes. [9]

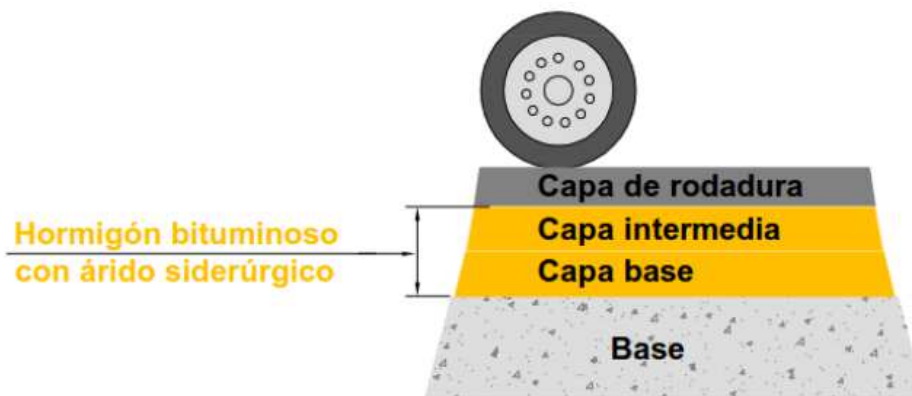


Ilustración 31. Mezcla bituminosa para capa de rodadura base y/o intermedia [18]

6.2.1.6 MEZCLAS BITUMINOSAS EN FRÍO

Se define como mezcla bituminosa en frío la combinación de áridos y un ligante bituminoso para la cual no es preciso calentar previamente los áridos. La mezcla se extenderá y compactará a la temperatura ambiente. [9]

Se aplicarán las mismas especificaciones para el uso de árido siderúrgico que en el caso de las mezclas bituminosas en caliente. [18]

La mezcla bituminosa se repartirá, de arriba a abajo, en una capa de rodadura, una capa intermedia, y una o más capas de bases (ver apartados anteriores). El espesor de la capa inferior será siempre mayor o igual al de la capa inmediata superior y, en general, se tenderá a proyectar el menor número posible de capas o tongadas. [9]

6.2.1.7 TRATAMIENTOS SUPERFICIALES CON GRAVILLA

Los tratamientos superficiales mediante riegos con gravilla tienen por objeto proporcionar una textura adecuada para la circulación de los vehículos e impermeabilizar el firme, sin que aporten directamente un incremento en la capacidad estructural. [9]

Los áridos siderúrgicos podrán utilizarse en tratamientos superficiales para todas las categorías de tráfico pesado, tanto en la calzada como en los arcenes, siempre que cumplan las prescripciones técnicas exigidas y se declare el origen de los materiales, tal como se establece en la legislación comunitaria sobre estos materiales. [18]

Para el empleo de estos materiales se exige que las condiciones para su tratamiento y aplicación, así como valores admisibles de expansión, estén fijadas expresamente en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares. Se situarán en la parte más superficial del firme de carreteras. [15]

6.2.2 APLICACIONES NO LIGADAS BAJO COBERTURA NO TOTALMENTE IMPERMEABLE

Para aplicaciones no ligadas bajo cobertura no totalmente impermeable se podrán utilizar áridos siderúrgicos de escorias negras de acería, siempre que cumplan las prescripciones técnicas exigidas en el decreto 64/2019, y se declare el origen de los materiales, tal como se establece en la legislación comunitaria sobre estas materias. [18]

Para el empleo de estos materiales se exige que las condiciones para su tratamiento y aplicación estén fijadas expresamente en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares. [15]

6.2.2.1 ZONAS EN TALUD DE TERREPLENES

Se define como terraplén al relleno formado por extensión y compactación de suelos por encima del terreno natural con el que se constituye el cimiento del firme. Está constituido por el núcleo del terraplén, la coronación, los espaldones y la explanada mejorada.

Los espaldones corresponden a la parte exterior de un relleno tipo terraplén, que constituirá o formará parte de los taludes del mismo. No se considerarán parte del espaldón los revestimientos sin misión estructural en el relleno entre los que se consideran, plantaciones, cubierta de tierra vegetal, encachados, protecciones antierosión, etc. [9]

Las zonas en talud (espaldones) se sitúan en la parte exterior del relleno tipo terraplén. Se utilizarán áridos siderúrgicos de escorias negras de acería siempre y cuando se asegure una

cierta limitación de infiltración. En estos casos, los espaldones evitarán parcialmente la infiltración de agua, bien por el propio tipo de material, bien mediante la adopción de medidas complementarias. Los valores de expansión del árido siderúrgico vendrán definidos en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares de la obra. [15]

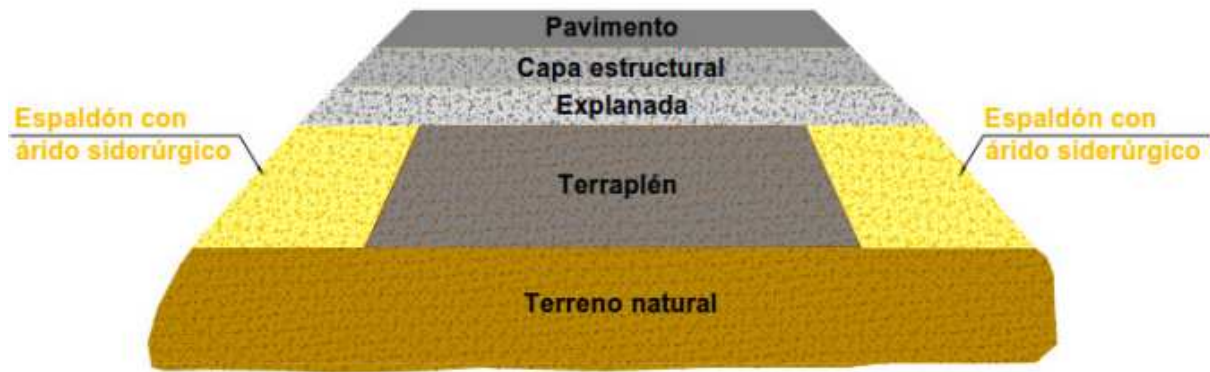


Ilustración 32. Árido siderúrgico en espaldón de terraplén [CT1]

6.2.2.2 RELLENOS LOCALIZADOS O ASIMILABLES A TERRAPLÉN BAJO COBERTURA NO MUY IMPERMEABLE

Dentro de este apartado, el árido siderúrgico como material de relleno localizable o asimilable bajo cobertura no totalmente impermeable, recoge los siguientes casos: [15] [9]

- Rellenos en trasdós de obras de fábrica. Extensión y compactación de rellenos, procedentes de excavaciones o préstamos, localizados en trasdós de obras de fábrica en el que por su reducida extensión, compromiso estructural u otra causa, no permite la utilización de los mismos equipos de maquinaria con que se lleva a cabo la ejecución de otros tipos de rellenos, o bien exija unos cuidados especiales en su construcción.
- Relleno en trasdós de muro de contención. Los muros de contención son aquellas estructuras que se utilizan para la contención de tierras o terrenos inestables cuando las condiciones no permiten que estas masas asuman sus pendientes naturales. Estas condiciones se presentan cuando el ancho de una excavación, corte o terraplén está restringido por condiciones de propiedad, utilización de la estructura o economía.
- Relleno para cubrición de vertederos y pistas provisionales en su interior. Una vez que se acaba la vida útil de un vertedero controlado, se procede a la recuperación de la zona ocupada. Una de las etapas de la recuperación consiste en el sellado del vertedero, con el fin de interponer una barrera para aislar los residuos, evitar la filtración de las aguas fluviales y cerrar el paso de la salida de los gases evacuados a través del sistema de extracción de los gases. Incluye la revegetación de la superficie.

- Rellenos para cubrición de tuberías. Formación de relleno de zanjas en las que se alojan las instalaciones para lo que se realiza un relleno envolvente de las mismas y una compactación en tongadas sucesivas de 20 cm de espesor máximo.
- Nivelación de terrenos y terraplenes. Las nivelaciones consisten en la operación de determinar una cota taquimétrica del terreno u obra, conociendo previamente una cota inicial o de salida. Las nivelaciones servirán para resolver las diferencias altimétricas, para definir cotas de obra de plataformas, nivelación de explanaciones y terraplenes destinados a carreteras, diques, escolleras, soleras, etc. Se podría entender la explanación como la operación de movimiento de tierras a efectuar con el objetivo de convertir la superficie de un terreno en un plano horizontal o inclinado.

En todos los casos mencionado, los rellenos realizados con lo áridos siderúrgicos de escoria negra de acería se localizarán directamente sobre el terreno natural o sobre una capa base de material granular. En cualquiera de los casos, los rellenos conformados por áridos siderúrgicos, carecerán de cualquier tipo de misión drenante. [18]

En el caso de la cubrición de los vertederos, los rellenos con árido siderúrgico podrán ir situados en la capa de regularización, directamente sobre el vertido de residuos y bajo las diferentes capas que garantizan la impermeabilización parcial o total del vertedero. Los espesores de esta capa, la expansión del árido siderúrgico y la compactación del relleno vendrán definidos en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares del proyecto de vertedero. [18] [15]



Ilustración 33. Capas de cubrición de vertederos [18]

6.2.2.3 SUB-BALASTO DE VÍAS FÉRREAS

Consiste en una capa situada por debajo de la banqueta de balasto y sobre la capa de forma de la vía de modo que se asegure el buen comportamiento de la vía férrea desde el punto de vista de su rigidez, alineación, nivelación y drenaje. El sub-balasto debe estar formado por una grava arenosa bien graduada, con algún porcentaje de elementos finos para que sea compactable, no se desligue bajo el tráfico de las máquinas durante la obra, sea insensible al hielo y proteja la plataforma de la erosión de las aguas de lluvia. [9]

El sub-balasto con árido siderúrgico se dispondrá entre la capa de forma de la vía férrea y la capa de balasto que corona la vía. Se utilizarán áridos siderúrgicos siempre y cuando se asegure una cierta limitación de infiltración, bien por el propio tipo de material, bien mediante la adopción de medidas complementarias. Los valores de expansión del árido siderúrgico vendrán definidos en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares de la obra. [15] [18]

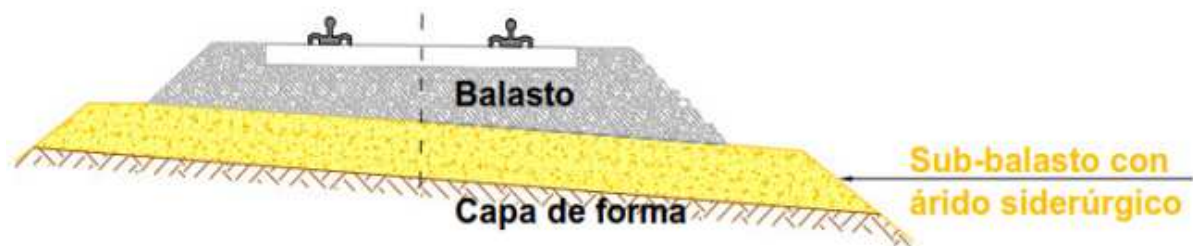


Ilustración 34. Sub-balasto de vías férreas [18]

6.2.2.4 APANTALLAMIENTOS SÓNICOS PARA ESTRUCTURAS VIARIAS

Se entiende por apantallamiento sónico o barrera/ pantalla acústica, aquellas estructuras o elementos exteriores diseñados para reducir la contaminación acústica. Estos dispositivos son métodos efectivos de mitigación acústica que por su situación y características protegen del ruido proveniente de una determinada fuente sonora (carreteras, vías férreas e industriales) a un determinado receptor, dificultando la transmisión del sonido. [9]

Se podrán utilizar áridos siderúrgicos de escorias de acería como relleno para la formación de diques de o taludes de tierra. Estos rellenos irán colocados directamente sobre el terreno natural y se interpondrá una capa de material granular compactado sobre el árido siderúrgico a modo de “semi” barrera, sobre la cual se colocará opcionalmente una capa de tierra natural y el sembrado/plantación correspondiente. [18] [15]

Los valores de expansión deberán ser definidos en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares de la obra. [15]



Ilustración 35. Apantallamiento sónico en forma de dique [18]

6.2.3 APLICACIONES NO LIGADAS BAJO COBERTURA DE ALTA IMPERMEABILIZACIÓN

Para aplicaciones no ligadas bajo cobertura de alta impermeabilización se podrán utilizar las escorias negras de acería como áridos siderúrgicos, siempre que cumplan las prescripciones técnicas exigidas en el decreto 64/2019 y se declare el origen de los materiales, tal como se establece en la legislación comunitaria sobre estas materias.

Para el empleo de estos materiales se exige que las condiciones para su tratamiento y aplicación estén fijadas expresamente en el Pliego de Prescripciones Técnicas. [15]

6.2.3.1 ZAHORRAS ARTIFICIALES

Se define como zahorra el material granular, de granulometría continua, constituido por partículas total o parcialmente trituradas, en la proporción mínima que se especifique en cada caso y que es utilizado como capa base y/o subbase estructural de firmes de carreteras. [9]

Se tendrán en cuenta las siguientes limitaciones en la utilización de áridos siderúrgicos de escorias negras de acería: [15] [18]

- El espesor del conjunto de capas granulares y explanada mejorada realizadas con áridos siderúrgicos de acería de horno eléctrico no debe ser superior a 70 cm. Cuando la capa esté formada por una combinación de áridos siderúrgicos de acería de horno eléctrico y otros áridos este espesor se podrá corregir al alza en función del porcentaje de áridos siderúrgicos de acería.
- No se emplearán en zonas confinadas, como bases o subbases limitadas por bordillos. En trasdoses de puentes no se emplearán en los 50 m próximos a la estructura.

- No se podrán utilizar en carreteras inundables con un período de retorno de 100 años y que se especifican en el Plan Integral de Prevención de Inundaciones de la Comunidad Autónoma del País Vasco.
- Las capas en las que se utilicen se deben drenar adecuadamente, evitando especialmente el estancamiento de agua en las mismas.
- Se debe estudiar la posible corrosión de elementos galvanizados o tuberías de aluminio localizados en las proximidades.

El árido siderúrgico deberá presentar valores de expansividad inferiores al 5% [34] y las zahorras con áridos siderúrgicos irán localizadas en la capa estructural del firme de carreteras (capa base y/o subbase) sobre la explanada y bajo el pavimento que garantizará una cobertura de alta impermeabilización. [15]

6.2.3.2 BASES/SUBBASES DE VÍAS PEATONALES, CICLISTAS Y PISTAS DEPORTIVAS

Al igual que los firmes de carretera, los firmes para vías ciclistas, peatonales y pistas deportivas están constituidos por varias capas denominadas subbase, base y pavimento.

Se podrá utilizar árido siderúrgico de escoria negra de acería en capas de base y de subbase, si la hubiese, como árido en zahorras artificiales, teniendo las mismas consideraciones que las zahorras artificiales empleadas como capa base y/o subbase estructural de firmes de carreteras. [15] [18]

El árido siderúrgico de escoria negra de acería deberá presentar valores de expansión inferiores al 5% [34]. Los materiales con áridos siderúrgicos irán localizadas en la capa de base y/o subbase de este tipo de vías, sobre el suelo natural excavado o sobre la explanada, si la hubiese. Irán situados inmediatamente por debajo del pavimento que garantizará una cobertura de alta impermeabilización.

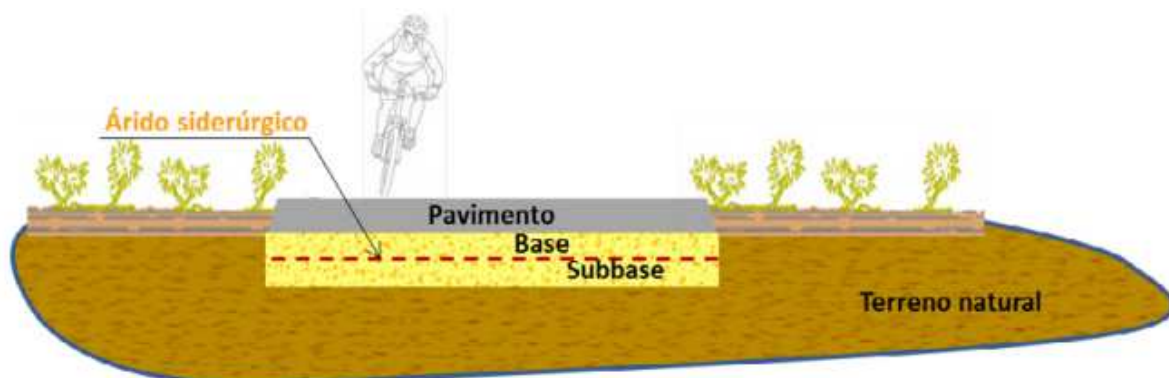


Ilustración 36. Base y subbase de vías ciclistas o peatonales [18]

6.2.3.3 EXPLANADAS MEJORADAS

Se entiende por explanada mejorada el conjunto de capas de suelos u otros materiales que se encuentra bajo el firme y cuya finalidad es mejorar y homogeneizar la capacidad de soporte del cimiento del firme, facilitar las labores de construcción, proteger los suelos del agua mediante impermeabilización o evacuación, y obtener las superficies geométricas. [9]

Se adoptarán las consideraciones relativas a zahorras artificiales en cuanto al uso del árido siderúrgico de escoria negra, debiendo presentar valores de expansión inferiores al 5%. [34]

La explanada mejorada se apoya sobre el terreno subyacente, consistente en el terreno natural en fondos de desmonte, los suelos o materiales de aportación en núcleo de terraplenes o en capa de transición de pedraplenes o rellenos todo-uno, y ambas formaciones en las secciones a media ladera. El plano de explanada constituye la superficie superior de la explanada mejorada, sobre la que se apoya el firme de la carretera, que garantizará una cobertura de alta impermeabilización. [15] [9]

6.2.3.4 TERRAPLENES

Se entiende por terraplén al relleno formado por extensión y compactación de suelos por encima del terreno natural con el que se constituye el cimiento del firme, constituido por el núcleo del terraplén y por la explanada mejorada. En estos rellenos se distinguirán 4 zonas, siendo estas, coronación, núcleo, espaldón y cimiento. [9]

Se adoptarán las consideraciones relativas a zahorras artificiales en cuanto al uso del árido siderúrgico de escoria negra de acería, debiendo presentar valores de expansión inferiores al 5%. [34]

Los rellenos de tipo terraplén irán situados directamente sobre el terreno natural y bajo la capa de explanada o de firme en función del tipo de carretera. Los áridos siderúrgicos de escoria negra de acería podrán utilizarse en las zonas de coronación, el núcleo y la cimentación al estar situadas bajo coberturas de alta impermeabilización. No podrá utilizarse en zonas expuestas de talud (espaldones) incluso cuando tengan coberturas de tierra natural. [15]

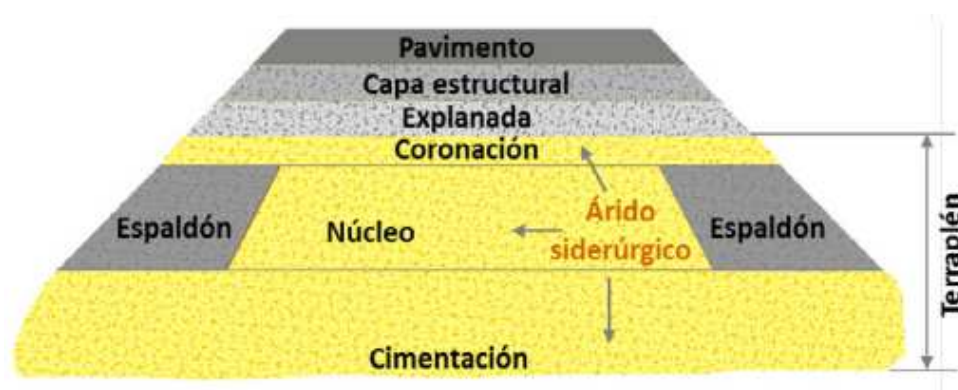


Ilustración 37. Relleno de tipo terraplén [18]

6.2.3.5 RELLENOS LOCALIZADOS BAJO COBERTURA DE ALTA IMPERMEABILIZACIÓN

Esta unidad consiste en la extensión y compactación de suelos, procedentes de excavaciones o préstamos, en relleno de zanjas, trasdós de obras de fábrica, cimentación o apoyo de estribos o cualquier otra zona, que por su reducida extensión, compromiso estructural u otra causa no permita la utilización de los mismos equipos de maquinaria con que se lleva a cabo la ejecución del resto del relleno, o bien exija unos cuidados especiales en su construcción. [9]

Dentro de este apartado, el árido siderúrgico como material de relleno localizable o asimilable bajo cobertura totalmente impermeable, recoge los siguientes casos: [15] [9]

- Rellenos de zanjas, cubrición de tuberías y rellenos de nivelación bajo aceras.
- Encachados bajo solera.
- Relleno de trasdós de muros de pasos inferiores.
- Relleno en trasdós de estribos de puentes.
- Relleno de trasdós de muro de sostenimiento (bajo calzada).
- Relleno de trasdós de muro de contención.
- Relleno interior de cajones de hormigón cerrados.

En todos los casos, los valores de expansividad de los áridos siderúrgicos vendrán definidos en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares de la obra. Además, los rellenos localizados con árido siderúrgico irán situados, en la mayoría de los casos, sobre en contacto con el terreno natural pero deberán disponer de capas o coberturas que aseguren una alta impermeabilización. [15] [18]

En el caso de los cajones de hormigón cerrados, se dispondrá de un sellado impermeable para coronar el relleno de tipo granular con árido siderúrgico y los valores de expansividad deberán presentar valores inferiores al 0,3%. [34]

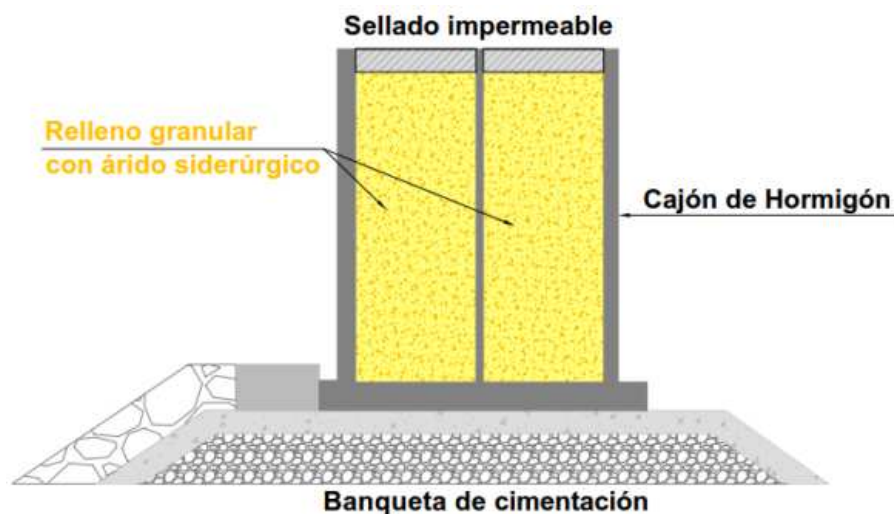


Ilustración 38. Relleno de cajones de hormigón [18]

6.2.3.6 PROYECTOS DE URBANIZACIÓN

Se entienden por proyectos de urbanización a aquellos proyectos de planeamiento urbanístico para la ejecución de obras de urbanización de una calle, plaza, polígono industrial, sector, barrio etc.

En los supuestos de utilización de áridos siderúrgicos de escorias de acería para la ejecución de proyectos de urbanización que no hayan sido contemplados en las aplicaciones descritas anteriormente, tal utilización se hallará sometida a las condiciones señaladas en el presente Decreto 64/2019. [15] Se deberá incorporar, además, una capa superior impermeable.

6.3 CONTRATACIÓN PÚBLICA VERDE EN LA CAPV

La transición hacia prácticas efectivas de valorización de árido siderúrgico en el sector de la construcción, requiere cambios tanto en los sistemas productivos como en las prácticas y patrones de consumo de todos los actores de la sociedad, incluida la administración pública.

La compra y contratación pública, como expresión de la administración como consumidora, representa un instrumento importante para conseguir este nuevo modelo productivo y de consumo más sostenible, por su impacto y poder tractor sobre el mercado.

En ese sentido, tanto el Programa Marco Ambiental 2020 [17] como el Plan de Prevención y Gestión de Residuos 2020 del Gobierno Vasco [4], recogen el papel ejemplar del sector público y destacan la contratación pública como uno de los instrumentos que debe alinearse con los objetivos estratégicos del país para apoyar la consecución de los compromisos adquiridos.

Del mismo modo, el Programa de Compra y Contratación Pública Verde del País Vasco 2020 [19] recoge este compromiso y además de integrar requisitos de promoción de la economía circular en los criterios de compra y contratación verde elaborados para todo el sector público vasco, el fomento de actuaciones de contratación circular o, lo que es lo mismo, de contratación pública con criterios y enfoques que fomenten la economía circular.

Dando cumplimiento a dicho compromiso con la contratación pública verde, desde la Autoridad Portuaria de Bilbao, y más concretamente desde el Departamento de Obras y Construcción, se ha apostado por el empleo del árido siderúrgico, es decir, la escoria negra de acería, en las obras de construcción.

Esto se analizará más de lleno en el siguiente apartado, donde se darán datos concretos obtenidos de primera mano tras la realización de un convenio educativo realizado, en el presente año 2020, a través de la “Fundación Puerto y Ría” en el Departamento de Obras y Construcción de la Autoridad Portuaria de Bilbao.

6.4 BUENAS PRÁCTICAS DE VALORIZACIÓN DE ESCORIA NEGRA EN LA AUTORIDAD PORTUARIA DE BILBAO

La autoridad portuaria de Bilbao, es una entidad referente en cuanto al uso en obras de áridos reciclados, tanto procedentes de la valorización de residuos de construcción y demolición como de áridos siderúrgico procedente de la valorización de escoria negra de acerías de arco eléctrico en las obras de construcción del puerto de Bilbao.

El éxito de esta actuación parte del compromiso del puerto en trabajar en pro del medioambiente, traccionando a sus proveedores para que sirvan este árido con las características adecuadas prescritas a nivel técnico y ambiental. Por su parte ha sido imprescindible la implicación de los proveedores de estos materiales a la hora servir un árido de gran calidad, refrendados con marcado CE, y por supuesto cumpliendo con la normativa técnica y ambiental correspondiente a los usos prescritos.

Asimismo, cabe remarcar la labor que ha desarrollado la APB en trazar todas las partidas de los materiales reciclados instalados, controlando y registrando en todo momento los acopios de materiales entrantes y registrando su ubicación concreta en la correspondiente obra.

Dentro de las obras de Ampliación del Puerto de Bilbao, la APB ha empleado de forma continua el árido siderúrgico procedente de diversas acerías, como suelo adecuado en formación de explanadas y pistas provisionales, o como material de aportación para terraplenes de precarga en procesos de consolidación geotécnica.

A la vista de los resultados favorables que supone la utilización del árido siderúrgico en la fabricación de hormigón (elevada dureza, angulosidad, coeficiente de los ángeles, ausencia de elasticidad, elevado rozamiento interior, gran densidad y ahorro económico) la APB decidió ya hace varios años, el aprovechamiento del árido siderúrgico como sustitutivo de los áridos naturales, bien calizos u ofíticos, destinado para fabricar hormigón en masa, bloque de hormigón o mezclas bituminosas.

El proceso de valorización de las escorias, realizado por el gestor autorizado que fábrica el árido que da lugar a su transformación en árido siderúrgico, contempla una serie de tratamientos, mencionados en apartados anteriores y dirigidos a eliminar elementos metálicos, a obtener usos granulométricos adecuados, así como a garantizar la estabilidad volumétrica del material granular resultante y su calidad para su uso comercial en los diferentes usos permitidos.

Para la producción de dicho árido la APB dispone de varios grupos de machaqueo que fragmentan y trituran de forma sucesiva los bloques y pegotes existentes dentro de la escoria hasta reducirlos al tamaño requerido. Estos grupos son dispuestos en terreno portuario cuando alguna obra lo requiere lo que permite una disponibilidad de árido siderúrgica continua.

En cuanto al envejecimiento o maduración de la escoria negra, se viene realizando mediante exposición inducida a la intemperie, más o menos prolongada en el tiempo. Según la experiencia de la APB el plazo mínimo recomendado es de aproximadamente 4 meses para árido grueso.

Por otro lado, la transformación y el empleo de árido siderúrgico para la elaboración de hormigón y mezclas bituminosas en caliente de manera exitosa, la APB recalca que es necesario tener en cuenta una serie de condicionantes:

- La necesidad de una buena planificación en la generación de acopios de árido condicionado fundamentalmente por plazos de envejecimiento y valorización
- Garantizar separación física absoluta entre acopios escoria negra/blanca
- Tener en cuenta la necesidad de las distintas dosificaciones de hormigón
- La mayor densidad de las mezclas bituminosas en caliente
- La necesidad de unas prestaciones superiores en equipos, medios de puesta en obra y en la fabricación del hormigón

6.4.1 OBRAS DESARROLLADAS POR LA AUTORIDAD PORTUARIA

En las obras desarrolladas por la APB, se ha empleado como producto final, fundamentalmente en la formación de terraplenes para precarga y consolidación de terrenos de baja capacidad portante o para reducir las afecciones por asientos diferenciales en cimentaciones, destacando la elevada densidad del material por su origen y presencia de hierro con un peso específico para partículas de hasta 3,8 tons/m³.

También se ha empleado en la ejecución de nuevas pavimentaciones, bien como árido para sellar arenas de dragado o como coronación de núcleo como suelo adecuado, destacando como principal característica que se trata de un material que es trabajable ajeno a las posibles condiciones meteorológicas adversas de la CAPV, debido a su origen y la ausencia de material fino arcilloso.

Asimismo, se ha empleado fundamentalmente y de forma satisfactoria como materia prima, en la fabricación de hormigón en masa de elevadas prestaciones al conseguirse densidades de hormigón endurecido de forma continuada y en condiciones de obra superiores a 2,85 t/m³, así como para la fabricación de mezclas bituminosas en caliente.

Entre las diferentes actuaciones estratégicas llevadas a cabo por el puerto, se encuadran las siguientes obras:

Emplazamiento	Aplicación	Medición (ton)	Fecha
1. Concesión silo almacenamiento GSN	Formación de precargas	100.000	2008-2009
2. Muelle AZ-3	Áridos para hormigón	1.500	2008-2009
3. Refuerzo morro dique Punta Lucero	Áridos para hormigón	70.000	2010-2011
4. Ampliación concesión Depósito Franco	Explanada mejorada	15.000	2011
5. Nuevo muelle de cruceros	Explanada mejorada	23.000	2014
6. Prolongación dique-muelle Punta Sollana	Áridos para hormigón	250.000	2013 - 2016
7. Pavimentación muelle comercial AZ-3	Áridos para MBC	1.000	2017
8. Urbanización anexa concesión HAIZEA WIND	Áridos para MBC	3.500	2018
9. Pavimentación muelle comercial Punta Sollana	Áridos para MBC	5.700	2018
10. Ampliación concesión Navacel en dársena Udondo	Formación de precargas	18.000	2019
11. Espigón Central	Explanada mejorada	90.000	2019

Tabla 15. Obras con árido siderúrgico llevadas a cabo en el Puerto de Bilbao [APB]

Entre estas actuaciones cabe destacar la **obra de prolongación del dique de Punta Sollana**, situado en la zona industrial del puerto de Bilbao, debido a la gran cantidad de material empleado. La obra, que duró cuatro años y finalizó en el año 2016, permite, sobre todo, impulsar los tráficos de graneles sólidos y líquidos al incrementarse tanto la longitud de muelle disponible en 330 ml, con un calado mínimo de 20 m, como la superficie de explanada de muelle en 20.000 m².



Ilustración 39. Obra de prolongación del dique de Punta Sollana en el Puerto de Bilbao [APB]

Dicha infraestructura se cofinanció por la Unión Europea, con una aportación aproximada de 3,53 millones de euros a través del programa denominado “Operaciones Eficientes y mejora del rendimiento Medioambiental del puerto de Bilbao”. El resto de financiación procede de recursos propios de la Autoridad Portuaria hasta un importe total ya certificado de 40,11 millones de euros.

En su construcción, la Autoridad Portuaria incorporo, como innovación técnica y más respetuosa con el medioambiente, el diseño y ejecución del espaldón previsto en el Proyecto con un hormigón de altas prestaciones de una densidad de hasta 2,65 t/m³.

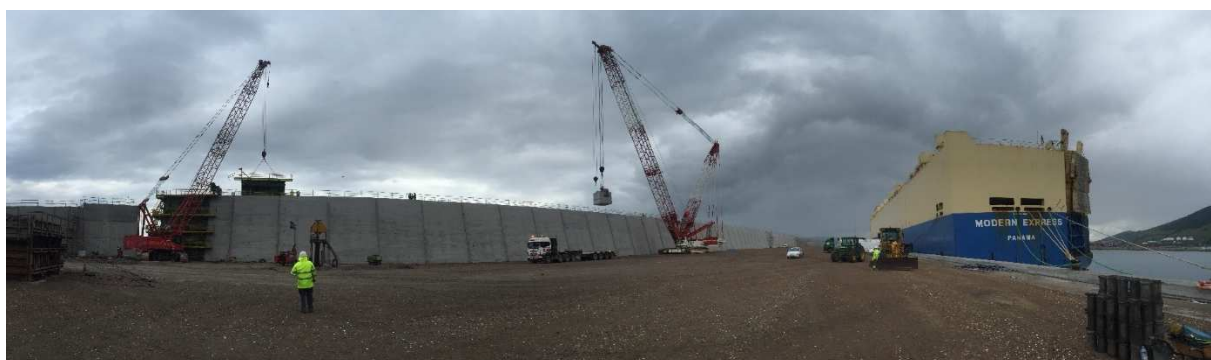


Ilustración 40. Espaldón del dique de Punta Sollana en el Puerto de Bilbao [APB]

Para ello se empleó un árido siderúrgico procedente del reciclado de las escorias negras con marcado CE (250.000 toneladas) de los hornos de arco eléctrico de distintas acerías del País Vasco: Acería Compacta de Bizkaia, Acería Nervacero, Acería de Zumarraga, valorizadas a

través del gestor autorizado Transportes Bombín. Esto permitió reducir el presupuesto de ejecución en un millón de euros respecto a lo presupuestado inicialmente.

Otro de los proyectos ejecutados en este ámbito, es la **reposición de bloques en el morro del dique de Punta Lucero**, donde el árido siderúrgico fue empleado como materia prima para la fabricación de bloques de hormigón. En total, se ejecutaron 4.514 unidades de bloques de distinta geometría.



Ilustración 41. Acopio de bloques de reposición en la explanada de Punta Sollana [APB]

En cuanto al uso de árido siderúrgico como materia prima para la fabricación de mezcla bituminosa en caliente, dentro de los proyectos de demostración de economía circular de Ihobe, es la **pavimentación de 21.000 m² en la explanada de muelle Punta Sollana**.



Ilustración 42. Compactado de la pavimentación en la explanada de muelle Punta Sollana en el Puerto de Bilbao [APB]

En este caso el árido siderúrgico se empleó como materia prima para la fabricación de mezcla bituminosa en caliente (Capa Base S16 y capa de rodadura S12). Para la elaboración de las mezclas bituminosas requerida, se han empleado un 58-61% de árido siderúrgico, un 18-20% de asfalto reciclado y un 21-22% de árido calizo, todos ellos con marcado CE y con un porcentaje de betún sobre mezcla de entorno al 4%.

Finalmente, uno de los proyectos más recientes es el **extendido de 340.000 m² de capa de firme** para suelo con un espesor de capa de 0,3m en el espigón central donde se ha empleado un hormigón con una densidad de 2,35 t/m³. En la ejecución del suelo se ha empleado un 65% de árido reciclado procedente de la valorización de RCDs, así como un 25% de árido siderúrgico, con marcado CE procedente de la Acería de Nervacero y se ha utilizado un total de 90.000 toneladas de material.



Ilustración 43. Explanada mejorada del espigón central en el Puerto de Bilbao [APB]

6.4.2 RESULTADOS

De esta amplia trayectoria desarrollada desde la APB en el campo del uso de áridos de origen reciclado en las obras de construcción, se desprende que el uso del árido siderúrgico ha sido satisfactorio y con buenos resultados. Los resultados principales son los siguientes:

- Se han utilizado **más de 200.000 m³ de hormigón con árido siderúrgico** desde 2009 en las obras de la APB.
- Se han ejecutado **más de 45.000 m² de pavimentación con árido siderúrgico** desde 2017 en las obras de la APB.
- Se han empleado **más de 550.000 toneladas de árido siderúrgico** desde en las obras de la APB.

Las **principales ventajas** que supone el uso de árido siderúrgico puede dividirse en dos vertientes. Una es la **interna o las ventajas directas que supone a la APB**, donde el uso de este árido permite mejorar las prestaciones del hormigón, así como gestionar un árido que es muy competitivo desde el punto de vista económico. **Estas ventajas son las siguientes:**

- Un menor volumen de hormigón por unidad de bloque debido a la mayor densidad del mismo.

- Un menor coste de fabricación del hormigón y de la mezcla bituminosa en caliente, derivado de un menor coste del árido siderúrgico frente al árido calizo y ofítico.
- Reducir el presupuesto de ejecución de las obras.
- Disponibilidad del material dentro de Bizkaia lo que supone un menor impacto ambiental y menores costes derivados del transporte.
- Mayor durabilidad de las mezclas bituminosas en caliente. Menos mantenimiento y generación de residuos.
- Obtención de hormigón de elevadas prestaciones: Mayor densidad y resistencia a largo plazo.

La segunda, desde el punto de vista de mejora ambiental en el entorno, supone una reducción de consumo de áridos naturales, y por lo tanto de recursos naturales (consumo de materiales y energía en la cantera), así como el aprovechamiento de un residuo que pasa a ser un material, reduciendo su envío a vertedero y evitando su saturación. Con todo ello la mejora en el Ciclo de Vida de las Obras de la APB es sustancial.

La apuesta del Puerto de Bilbao por la Economía Circular supone avanzar hacia un modelo de gestión y de explotación de sostenible, pensando en el desarrollo de las obras del puerto de forma que se minimice el uso de recursos naturales y reduciendo la emisión de residuos en la ejecución de las mismas.

7 VALORIZACIÓN EN EL SECTOR DE LA ENERGÍA

Actualmente, el único sector a nivel nacional y autonómico que está llevando a cabo iniciativas que fomenten la valorización de una parte de la escoria negra generada en los hornos de arco eléctrico, es el de la construcción, como se ha podido comprobar en el apartado anterior.

Aun así, hay una gran cantidad de la escoria generada en los HAE de la CAPV que la industria de la construcción no es capaz de absorber y que se deposita en los vertederos vascos, con el correspondiente impacto ambiental.

Más concretamente, en el año 2016, según el “Informe de Economía Circular y Gestión de Residuos en Euskadi” [22], de las 370.189 toneladas de escorias negras de acería generadas en Euskadi, el 63% fueron sometidas a procesos de reciclado, pero el 37% restante 136.968 toneladas, fueron eliminadas mediante deposición en vertedero.

Dado el gran volumen de escorias que son desechadas anualmente en vertederos vascos, y que el sector de la construcción no es capaz de absorber, se determina como necesario el desarrollo de nuevos usos para las escorias de acería en otros sectores productivos estratégicos.

Por lo tanto, tomando como punto de partida la necesidad de identificar un nuevo sector que permita la valorización de la escoria negra, y teniendo en cuenta, los conocimientos teórico y prácticos adquiridos en el Master de Ingeniería Energética Sostenible de la (UPV/EHU), el presente estudio se centrará en las posibilidades de valorización de la escoria en el sector de la energía.

7.1 EL ALMACENAMIENTO TÉRMICO

Hoy en día vivimos en una sociedad con gran dependencia energética, en la cual, la demanda se incrementa considerablemente año a año. Según el “International Energy Outlook 2019”, en el año 2018 se consumieron 161 PWh. Se estima que en 2040 dicha demanda aumentará hasta los 239 PWh, produciéndose un incremento cercano al 48% [36].

Ante esta situación, uno de los mayores retos que la sociedad actual debe afrontar, es la gestión óptima de los recursos energéticos disponibles, tanto fósiles como renovables, y la búsqueda de tecnologías energéticas alternativas.

Por otro lado, ante la incertidumbre del agotamiento de los recursos fósiles [37], es necesaria la búsqueda de alternativas que aseguren dicho suministro energético. En este ámbito, las

energías renovables deben de tener un peso determinante en la producción eléctrica mundial. Sin embargo, estas presentan ciertos inconvenientes. Entre ellos, destacan su alto coste frente a las energías tradicionales, como la nuclear, o la no gestionabilidad de su fuente (principalmente viento y sol) [38].

Para lograr una gran expansión de las energías renovables, el desarrollo de tecnologías de almacenamiento energético de bajo coste, que permitan gestionar su intermitencia, es de vital importancia. A modo de ejemplo, en la siguiente tabla se incluye el coste por kWh y la eficiencia de diferentes tecnologías de almacenamiento disponibles en la actualidad.

TECNOLOGÍA DE ALMACENAMIENTO TÉRMICO	COSTE (\$/KWH)	EFICIENCIA (%)
Batería de ácido de plomo	100-400	80
Batería de iones de litio	200-600	85
Super condensador	300-2000	95
Volante de inercia de alta velocidad	1600	95
Hidroeléctrica de bombeo	75	85
2-Tanques indirecto	89	97
2-Tanques directo	50	97
Termoclina en lecho compactado	34	94

Tabla 16. Coste y eficiencia de diferentes tecnologías de almacenamiento energético [39]

Por otro lado, una de las áreas con mayor potencial de actuación es la correcta gestión del calor. Existen numerosas industrias como las acerías, vidrieras o cementeras, entre otras, donde los procesos productivos, involucran altas temperaturas (650-1500 °C) y donde el contenido energético, en forma de calor residual, se pierde de diversas maneras.

A modo de ejemplo local, destacar que, según el Ente Vasco de la Energía (EVE), la industria vasca consumió en 2014 alrededor de 24 TWh [39]. De esta energía, se estima que entre el 35-40% fue transformada en forma de energía térmica, lo que equivale a 5.7-6.6 TWh anuales. Actualmente, solamente el 49% de este calor producido es recuperado, existiendo un importante margen de mejora, tanto en los procesos productivos como en las tecnologías de recuperación.

Teniendo en cuenta lo anterior y, debido a su bajo coste y eficiencia en comparación con otras tecnologías del estado del arte, **el almacenamiento de energía térmica se presenta como una atractiva posibilidad de valorización energética de la escoria negra de acería, a la vez que, permite optimizar la gestión energética en ámbitos como la producción eléctrica en centrales termo-solares o el aprovechamiento del calor residual en procesos industriales.**

Actualmente, la mayoría de sistemas de almacenamiento térmico implantados a nivel industrial, están basados en tecnologías de calor sensible que utilizan mezclas de sales fundidas en configuración de doble tanque. Si bien es cierto que el uso de este material está más extendido en la industria termo-solar, también existen algunos dispositivos aplicados a la industria del acero que permiten recuperar parte de la energía involucrada en el proceso [40].

No obstante, las sales fundidas como material de almacenamiento térmico presentan varias limitaciones que no permiten un aprovechamiento óptimo.

En primer lugar, la baja conductividad térmica de este material (alrededor de $0,5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$) implica una pobre transferencia de calor, y hace difícil, con un intercambiador de calor simple, el almacenamiento y posterior disponibilidad rápida de la energía. En consecuencia, no es posible plantear una potencia elevada en dispositivos basados en esta tecnología, manteniendo una inversión inicial reducida y un bajo coste de operación.

En segundo lugar, el rango de temperatura de trabajo está limitado por la fusión y descomposición de la sal, entre 290-565 °C en el caso de la sal “Solar”. Esta ventana de operación, es un factor limitante para su implementación en procesos de recuperación de calor industrial.

Con el fin de superar las limitaciones mencionadas, se plantea la sustitución de las sales fundidas como material de almacenamiento térmico (MAT) por escoria negra de acería, lo que permitiría valorizar la escoria negra dispuesta en vertedero, con sus beneficios ambientales y económicos asociados, a la vez que se plantea una nueva solución tecnológica a los problemas de aprovechamiento energético asociado a las energías renovables y a la recuperación de calor de la industria.

7.1.1 SISTEMAS DE LECHO FIJO

Una alternativa al concepto de doble tanque de sales fundidas, ya introducida en 2002 [41], es la conocida como “termoclina en lecho compactado”.

Dicha tecnología consiste en el uso de un lecho fijo constituido por partículas sólidas de geometría regular o irregular, que actúa como material de almacenamiento térmico. A través de los intersticios creados por dichas partículas, se hace circular un fluido (gas o líquido), denominado fluido caloportador, el cual cede calor al sólido durante el proceso de carga del sistema y lo recibe de este en la descarga.

En esta configuración, la transferencia de calor entre el fluido y el sólido genera un fenómeno de estratificación de temperatura denominado termoclina. En condiciones normales de operación, durante el proceso de carga, el fluido caliente se introduce por la parte superior y se extrae frío por la inferior.

Por el contrario, durante el proceso de descarga, el fluido frío se introduce por la parte inferior y se extrae caliente por la superior. Esta gestión del sistema está relacionada con el máximo aprovechamiento de los fenómenos térmicos de flotación y transferencia térmica por convección natural. En la siguiente figura se muestra un esquema de este concepto.

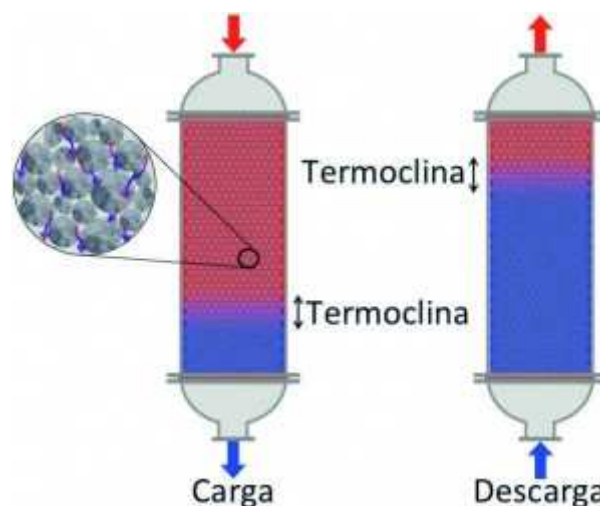


Ilustración 44. Esquema de la termoclina y del funcionamiento en la operación de carga (izquierda) y de descarga (derecha) [42]

Esta tecnología presenta ciertas ventajas frente a la actual de doble tanque de sales fundidas:

- Es capaz de suministrar temperatura constante durante el proceso de descarga, tratándose de una solución mono-tanque. En función de la aplicación final del calor, este hecho puede ser de gran importancia, como en el caso de la generación eléctrica por medio de turbinas de vapor.
- El uso de materiales sólidos, como medio de almacenamiento, permite extender el rango de operación desde temperatura ambiente hasta por encima de los 1000 °C, cuando por ejemplo, se utiliza aire como fluido caloportador.

- Al tratarse de una tecnología normalmente mono-tanque y permitir el uso de materiales de bajo coste (escoria negra de acería) como medio de almacenamiento, la inversión requerida en este tipo de solución es inferior al sistema de doble tanque con sales fundidas o cualquiera de las soluciones de almacenamiento térmico descritas en apartados anteriores. Además, en el caso de utilizar sales fundidas como fluido caloportador, la sustitución de gran parte de éstas, en torno a un 65-70%, por un medio sólido, reduce considerablemente la cantidad de sales requerida.

Sin embargo, la termoclina en lecho fijo es una tecnología de almacenamiento térmico relativamente joven y todavía está lejos de su completa implantación a escala industrial. Actualmente, solo existen en funcionamiento dos sistemas de este tipo.

La primera en construirse fue la desarrollada en la central termo-solar “Solar One” en Barstow (USA) durante el 2001 [41], la cual utiliza una mezcla de arena y rocas como medio de almacenamiento térmico y aceite como fluido caloportador.

La segunda instalación fue construida en 2014 en el desierto de Ait Baha (Marruecos) y se utiliza para suministrar calor a una cementera [43]. En este caso, el sistema emplea rocas y aire como material de almacenamiento térmico y fluido caloportador, respectivamente.



Ilustración 45. Planta piloto de ESC Ait Baha en Marruecos [43]

Estas experiencias a escala industrial han permitido investigar el comportamiento térmico de la termoclina de lecho compacto, mostrando resultados muy prometedores. Sin embargo, existen todavía varios aspectos que deben de ser optimizados, como la búsqueda y el desarrollo de materiales con alta densidad energética y propiedades de transporte de calor mejores que las que presentan las rocas y arenas utilizadas en los dos sistemas mencionados.

En este punto, es donde la escoria negra de acería tiene un gran potencial como material de almacenamiento térmico (MAT) debido a sus propiedades termo-físicas, su bajo coste y su alta durabilidad. Aun así, tras realizar una búsqueda exhaustiva de prácticas de valorización de la escoria negra de acería como material de almacenamiento térmico, no se ha identificado ninguna práctica real de utilización de la escoria como MAT, sino estos sistemas de lecho fijo con escoria como MAT están aún en nivel de investigación.

El programa de investigación principal, en cuanto a identificación y desarrollo de posibilidades de valorización de las escorias negras de acería como material de almacenamiento térmico, es el programa europeo RESLAG, el cual, nace bajo el bajo marco del programa “HORIZONT 2020 –EU. 3.4.5. – Permitir la transición hacia una economía y sociedad verdes a través de la eco-innovación” de la Unión Europea, y su objetivo principal es demostrar que existen sectores industriales capaces de hacer un uso efectivo de las escorias dispuestas en vertedero, si cuentan con un respaldo tecnológico y de conocimiento adecuado. [6]

Por lo tanto, en los próximos apartados se analizarán los mayores logros y resultados de la investigación llevada a cabo por el proyecto RESLAG en materia de valorización de la escoria, con especial atención, a su valorización como material de almacenamiento térmico (MAT). Posteriormente, se realizarán ciertos cálculos asociados a los beneficios económicos, energéticos y ambientales que esta nueva posibilidad de valorización energética de la escoria, traería consigo si se implantaran en la industria vasca.

7.2 PROYECTO EUROPEO RESLAG

La industria siderúrgica europea genera más de 20 millones de toneladas de escorias al año, más concretamente en el año 2010, año de estudio del proyecto RESLAG, la industria generó alrededor de 21,8 Mt de escoria de acero.

El 76% de la escoria se recicló en aplicaciones relacionadas con la construcción, descritas en apartados anteriores, pero este sector no puede absorber la cantidad total de escoria producida. El 24% restante, fue vertido o auto almacenado, 2,9 Mt y 2,3 Mt respectivamente, lo que supone un grave problema medio ambiental y muy contrario a las políticas europeas que impulsan la reutilización de los residuos y la economía circular. [44]

Teniendo en cuenta el gran volumen escoria dispuesta en verteros europeos o almacenada anualmente, queda claro que es necesario diseñar y desarrollar otras posibilidades de valorización de la escoria negra de horno de arco eléctrico a las ya conocidas hoy en día, enfocadas todas ellas al sector de la construcción.

Esto, junto con el gran aumento de la demanda de energía en los últimos años [36], conllevó a que la Unión Europea pusiera en marcha el proyecto RESLAG de investigación y desarrollo cuyo objetivo principal es la valorización efectiva de la escoria negra destinada a vertedero en diversos sectores industriales, lo que implicaría beneficios tanto ambientales y económicos, como energéticos.

Para lograr este ambicioso objetivo, el proyecto RESLAG considera cuatro demostraciones a gran escala para reciclar escorias negras procedentes de la producción del acero: [45]

- Extracción de metales no ferrosos de alto contenido agregado.
- Como materia prima para sistemas de almacenamiento térmico (SAT) para aplicaciones de recuperación de calor residual en la industria.
- Como materia prima para sistemas de almacenamiento térmico (SAT) en aplicaciones de energía solar por concentración (ESC).
- Como materia prima para la producción de compuestos cerámicos refractarios innovadores.

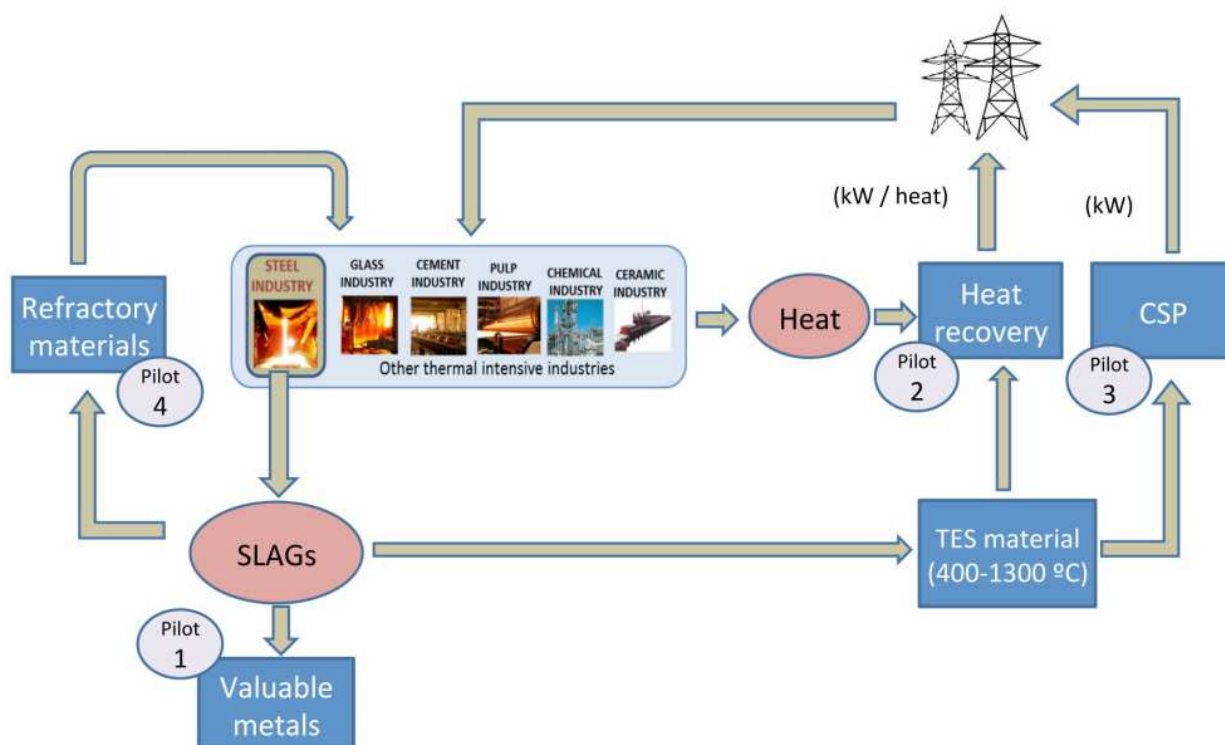


Ilustración 46. Concepto principal del proyecto RESLAG [6]

El proyecto RESLAG demuestra, que además de la no deposición de la escoria en vertedero existen otros beneficios ambientales muy importantes que provienen del uso "activo" de la escoria en procesos industriales, como el ahorro de y la eliminación de los impactos negativos asociados con la minería (de la recuperación de metales valiosos y de la producción de materiales cerámicos). [44]

Además de estos beneficios ambientales, la valorización de la escoria negra trae consigo beneficios económicos. Por un lado, para los generadores de la misma, ya que, pasaría de tratarse como un residuo, a ser un subproducto reutilizable en la misma industria o bien vendido a otras industrias que pudiesen necesitarlo al hilo de las estrategias de valorización. Y por otro lado, para los usuarios finales de las aplicaciones de la investigación RESLAG.

En general, el objetivo principal del proyecto RESLAG es valorizar la escoria de acero que actualmente no se recicla (ahora se vierte parcialmente en vertederos y en parte en las fábricas de acero) y reutilizarla como materia prima para 4 aplicaciones innovadoras que contribuyen a una economía circular en el sector del acero, con un enfoque de valor añadido transversal. Estas aplicaciones se han demostrado a nivel piloto y han sido dirigidas por las industrias de usuarios finales de países europeos.

En conjunto, estas aplicaciones abren enormemente el abanico de posibilidades de valorización de la escoria no solo para el sector del acero o de la construcción sino también para un sector estratégico como es el de la energía. Además, cuenta con el apoyo de las principales organizaciones europeas que representan a las industrias intensivas en energía, el sector ESC, las plataformas energéticas, los gobiernos, etc.



Ilustración 47. Detalles del Proyecto RESLAG [45]

De las cuatro posibles aplicaciones para a valorización de la escoria investigadas por el proyecto RESLAG, en el presente estudio solo se estudiarán dos de ellas, las que hacen referencia directa a la valorización energética de la escoria, es decir, la escoria negra de acería como material de almacenamiento de térmico (MAT) de bajo costo asociadas tanto a la recuperación de calor residual (RCR) de la industria, como a las aplicaciones de energía solar por concentración (ESC).

7.2.1 MATERIAL DE ALMACENAMIENTO DE CALOR PARA LA RECUPERACIÓN DE CALOR RESIDUAL EN LA INDUSTRIA

Como es bien sabido, los requisitos de energía primaria de las industrias pesadas son intensivos, incluso, si las empresas están haciendo un gran esfuerzo para reducir la energía de entrada necesaria y optimizar la eficiencia energética general, entre el 20 y el 50% de esta energía se pierde durante el proceso de fabricación. [46]

Dentro del alcance del proyecto RESLAG, con CIC EnergiGUNE como líder de la investigación, se aborda la recuperación de energía residual de la industria siderúrgica del hierro y el acero debido a que es uno de los sectores industriales con mayor potencial para la recuperación del calor residual de la Unión Europea, como se puede comprobar en el siguiente gráfico.

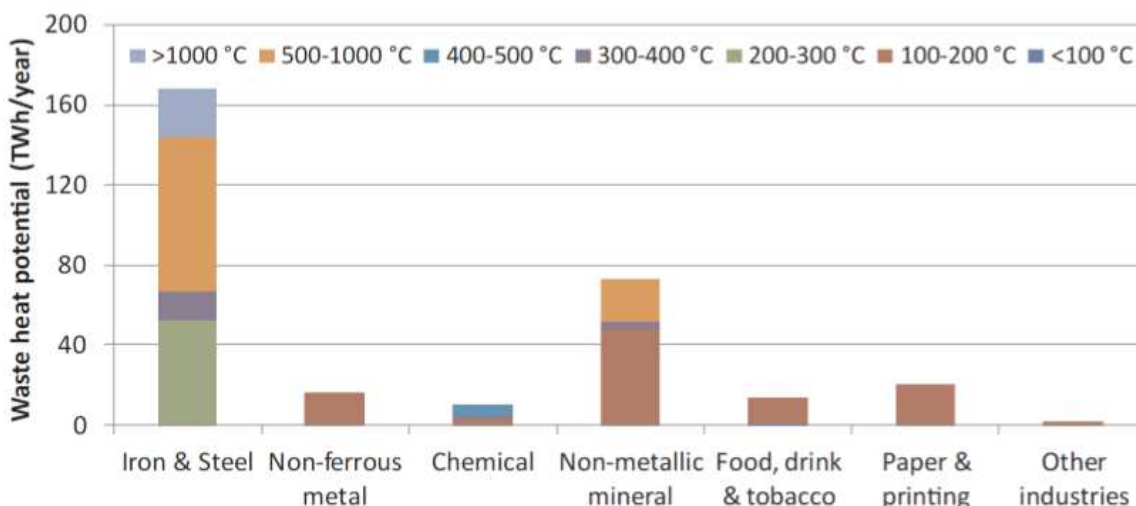


Gráfico 4. Potencial de calor residual por sector industrial para la UE en 2015 [46]

En este marco, se ha seleccionado el tema particular de la tecnología del horno de arco eléctrico (HAE) debido a que es una de las metodologías productivas de acero más desarrollada a nivel Europeo. Según EUROFER, la Asociación Europea del Acero, la producción actual de acero en Europa está dominada por la ruta del HAE, como se puede comprobar en la siguiente ilustración. [47]



Ilustración 48. Mapa de distribución europea de industrias productivas de acero [47]

Esta metodología productiva del acero requiere un alto aporte de energía, que luego se pierde alrededor del 50% como calor residual, productos de combustión y otros. [48] De esta cantidad, el 15% está contenido en el calor sensible de los gases de escape (alrededor de 112 kWh por tonelada de acero producido). [48] [42]

Teniendo en cuenta lo anterior, la recuperación del calor residual (calor latente) ha sido identificada por varios autores como punto clave para aumentar la eficiencia térmica de diferentes procesos industriales, y en particular, para el proceso de fabricación de acero. [49] [50] Aun así, los SAT apenas implementados en las plantas de fabricación de acero, todavía no se encuentra una solución exitosa.

Las principales limitaciones son las bajas temperaturas de operación de los SAT, generalmente limitadas por el material de almacenamiento; 230 ° C para vapor, 150 ° C para materiales orgánicos y materiales de cambio de fase o un máximo de 550 ° C para sales fundidas y aleaciones de metales (AlSi). Como consecuencia, se obtienen capacidades de almacenamiento muy limitadas y eficiencias de ciclo pobres en comparación con la energía total perdida del EAF, a temperaturas de alrededor de 1500 ° C.

Cuando se buscan alternativas de temperaturas más altas, el lecho fijo compactado parece ser una tecnología satisfactoria, pero hasta ahora, el costo económico de estos sistemas está impulsado por el alto costo del material sugerido, tanto sólidos como líquidos, como óxido de alúmina, cuarzo sales fundidas o aceites minerales. [51]

Con la motivación principal de desarrollar la base para superar las limitaciones mencionadas y proponer una solución tecnológica de almacenamiento de energía térmica, efectiva en términos de rendimiento térmico y viabilidad económica para la producción de acero, el proyecto RESLAG, abre una ventana a la escoria negra del acero como material sólido de bajo costo para el almacenamiento de calor.

Por lo tanto, el objetivo principal del proyecto RESLAG, en cuanto a recuperación de calor residual en la industria, ha sido diseñar y construir un sistema de recuperación de calor de alta temperatura y alto rendimiento térmico orientado a la descarga de gases HAE con un doble objetivo: [42]

- Recuperar hasta un 15% de la energía primaria, contenida en la corriente de gases residuales del horno de arco eléctrico.
- Uso de escoria de acero como una solución exitosa y económica para almacenar el calor recuperado del horno de arco eléctrico.

Para llevar a cabo este objetivo, el equipo de CICEnergiGUNE, encargado de desarrollar la solución tecnológica para la recuperación de calor de los gases de escape a altas temperaturas que salen del HAE de una planta siderúrgica, ha realizado varios ensayos previos en sus instalaciones para obtener las propiedades termo-físicas de la escoria, así como, demostrar la viabilidad del sistema de almacenamiento de lecho fijo.

Mencionar que, el resultado final de la investigación desarrollada por CICEnergiGUNE bajo el amparo del proyecto RESLAG es el diseño, construcción y prueba de una instalación piloto experimental de almacenamiento térmico en el HAE de la acería ArcelorMittal en Sestao (España). Siendo materia prima de almacenamiento térmico, la escoria negra de la propia acería de ArcelorMittal en Sestao.

Esto, garantiza una transferencia tecnológica rápida y efectiva de la tecnología desarrollada del sistema de almacenamiento de calor, ya que, ArcelorMittal, estará en plena colaboración con las actividades de investigación asociadas al piloto de demostración de concepto del proyecto RESLAG.

A continuación, se analizarán las principales características de la instalación piloto de recuperación de calor del HAE de ArcelorMittal y los resultados obtenidos tras la prueba experimental realizada en la misma, siendo la singularidad principal de la acería, una operación discontinuada.

Como consecuencia, la búsqueda de una mejor explotación del calor capturado, el desacoplamiento de la producción y la aplicación final del calor se propone mediante una innovadora solución de almacenamiento de energía térmica en el proyecto RESLAG.

7.2.1.1 CARACTERÍSTICAS DE LA INSTALACIÓN PILOTO

Primero, para obtener un suministro continuo de calor de la operación por lotes del HAE, los investigadores del proyecto RESLAG, diseñaron una solución de tanque de almacenamiento doble. De modo que ambas unidades de lecho fijo operan simultáneamente y sincrónicamente de acuerdo con los tiempos de trabajo del HAE.

Por lo tanto, mientras uno de los tanques está en modo de carga almacenando el calor que sale de los gases de escape del EAF, el otro tanque, previamente cargado, está en modo de descarga. Cuando ambos tanques alcanzan el estado cargado y descargado respectivamente, la operación se invierte y el tanque descargado se usa para almacenar el calor de los desechos HAE, mientras que el tanque cargado comienza su operación de descarga. [42]

Aunque el diseño contempla un sistema de doble tanque por una mayor flexibilidad en la operación y para posibilitar la disposición de tanques más pequeños que permitan transportarlos dentro de la planta para su descarga, en ArcelorMittal, se instaló una solución mono-tanque de almacenamiento térmico, como se puede comprobar en la siguiente figura.

Con la solución mono-tanque, se podría operar de tal forma que durante el tiempo de actividad, el calor producido alimente tanto al SAT como a una turbina que genera electricidad. Durante el tiempo de inactividad del horno, es decir, cuando no se tiene fuente de calor directa, el SAT pueda suministrar energía térmica a la turbina.

A continuación, se presenta el esquema de esta planta piloto para la recuperación de calor de los gases de escape del HAE en el marco del proyecto RESLAG.

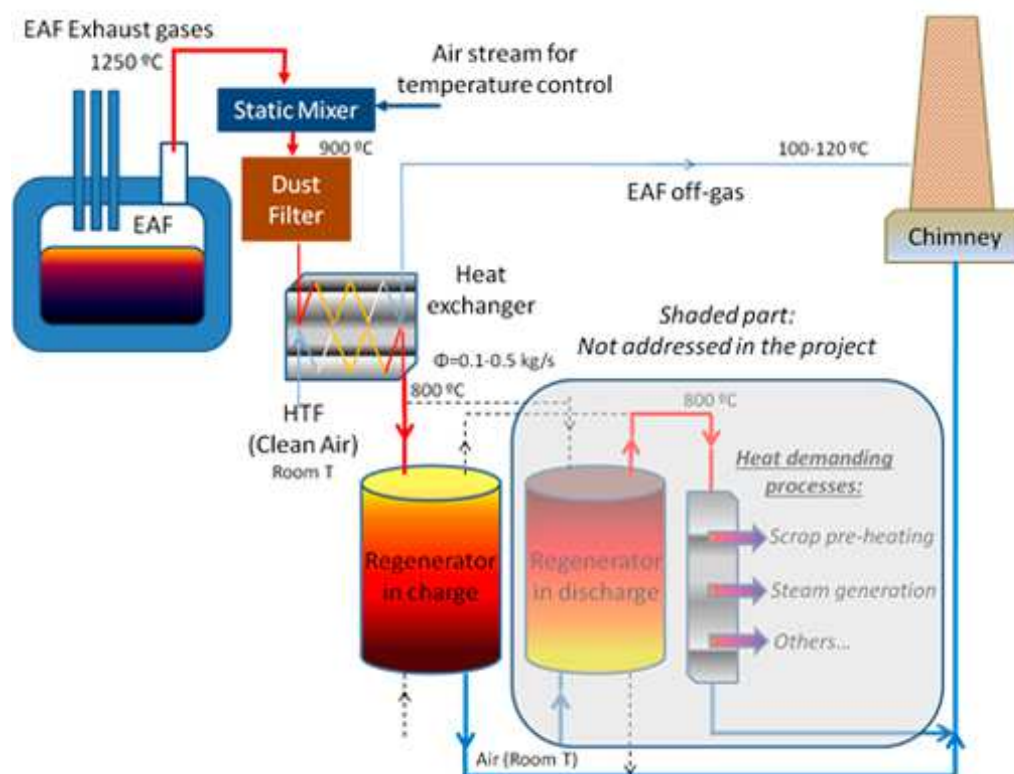


Ilustración 49. Configuración de la instalación piloto experimental construida en ArcelorMittal [6]

La instalación completa de recuperación de calor que se ha acoplado en la planta de fabricación de acero de ArcelorMittal de Sestao, presenta un diseño muy sofisticado, que incluye diferentes componentes para capturar, homogeneizar la temperatura y limpiar el gas de escape HAE, como un mezclador estático, un filtro de polvo de alta temperatura y un apagado, antes del SAT.

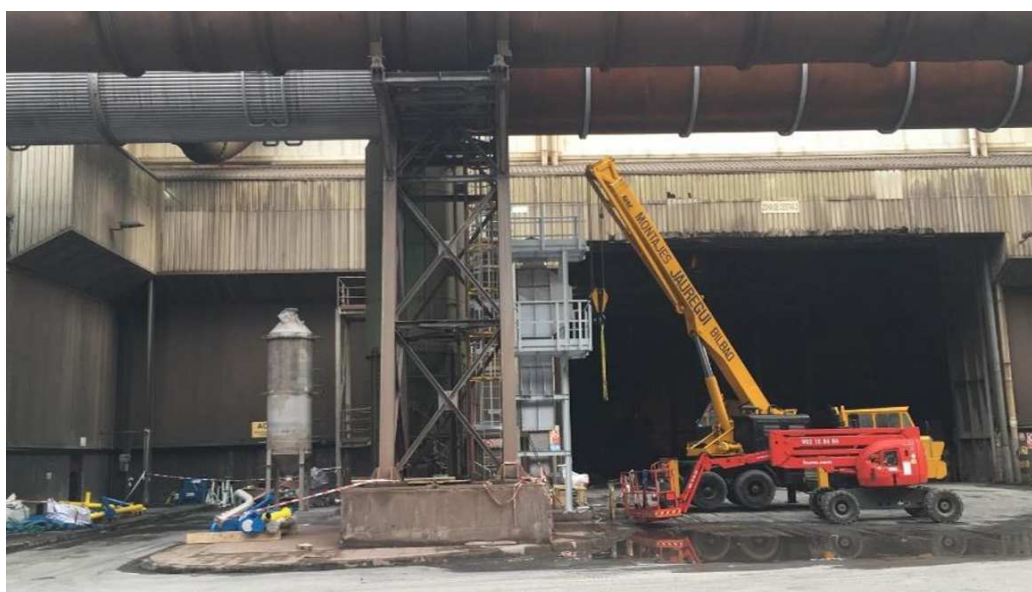


Ilustración 50. Fase de montaje de la SAT piloto experimental en ArcelorMittal, Sestao [52]

Una de las razones principales que motivan la introducción de los componentes mencionados es el alto contenido de polvo del gas de escape, que no puede insertarse directamente en el lecho fijo. Como consecuencia, se propone un intercambio de calor a un fluido limpio, aire. Este aire se usa como fluido de transferencia de calor en la unidad de almacenamiento. [42]

➤ **GEOMETRÍA Y PROPIEDADES DEL TANQUE Y LA ESCORIA**

Teniendo en cuenta la escala de demostración de concepto abordada en el proyecto RESLAG, el volumen de la unidad de almacenamiento se fijó en 3 m³ [42], como un sistema preindustrial representativo y se seleccionó una geometría cilíndrica para el tanque de almacenamiento térmico. Dicha geometría de tanque, se determinó como la mejor solución en base a ensayos realizados en las instalaciones de CICEnergiGUNE.



Ilustración 51. Tanque de lecho fijo compacto instalado en ArcelorMittal [52]

En la siguiente tabla se recogen los parámetros asociados a la geometría y propiedades, tanto del tanque, como de las partículas de escoria negra de HAE utilizadas.

CARACTERÍSTICAS DE LA UNIDAD SAT	
Volumen de almacenamiento del tanque (m ³)	3
Geometría del tanque de almacenamiento	Cilindrico
Material TES	Escoria Negra HAE
Altura del tanque (m)	2,5
Diámetro del tanque (m)	1,25
Diámetro de partículas TES (cm)	1
Fracción huecos	0,37
Grosor del Aislamiento de Fibra de Mullita (cm)	25

Tabla 17. Resumen de las principales características del SAT [42]



Ilustración 52. Tanque de lecho fijo de ArcelorMittal cargado de escoria negra [52]

Para minimizar las pérdidas térmicas del tanque al ambiente, finalmente fue revestido con una manta comercial aislante de 25 cm de fibra de mullita, ya que sus propiedades termo-físicas son adecuadas como material aislante para aplicaciones de alta temperatura. [42]

➤ **PARÁMETROS OPERATIVOS**

La gestión térmica de la unidad de almacenamiento de energía térmica implantada en ArcelorMittal está directamente condicionada por el funcionamiento por lotes de su horno de arco eléctrico. En este sentido, se presenta un esquema aproximado de la operación real de dicho horno.

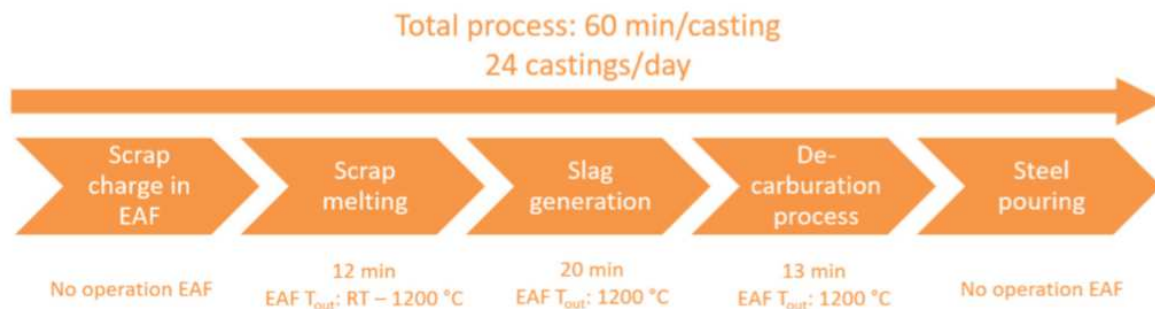


Ilustración 53. Fases y tiempos de operación de horno de arco eléctrico [Elaboración propia]

La operación de fundición completa dura aproximadamente 60 minutos, en la cual el HAE está activo alrededor de 45 minutos expulsando gases por encima de 1200 ° C. Teniendo en cuenta el diseño de la planta piloto, después de introducir los procesos de limpieza e intercambio de gas, la temperatura esperada del aire utilizado en la operación de carga del tanque de almacenamiento térmico es de alrededor de 700 ° C. Después de estos 45 minutos, el HAE se detiene durante 15 minutos, interrumpiendo el suministro de gas. Este tiempo corresponde a la apertura de la tapa del horno para el vertido de acero y la carga de chatarra.

En condiciones de funcionamiento regulares, la operación diaria de la acería es de 24 horas, por lo tanto, se suponen 24 piezas fundidas cada día. Como consecuencia, para la operación de la unidad de almacenamiento térmico investigada en el proyecto RESLAG, se supone que la carga demorará 45 minutos, durante la operación del HAE, seguida de 15 minutos en estado inactivo (sin circulación de fluido a través del lecho fijo). Por otro lado, la operación de descarga debe tomar 60 minutos (proceso de fundición completo) para garantizar el suministro de calor continuo deseado. [42]

A continuación, se presenta una tabla resumen de los parámetros fijados para el SAT instalado en ArcelorMittal.

PARÁMETROS OPERATIVOS	
Fluido de transferencia de calor	Aire
Ratio de flujo de masa	Variable
Temperatura del fluido caliente	700
Temperatura del fluido frío	20
Criterio de parada de carga	Carga completa
Criterio de parada de descarga	T = 40°C

Tabla 18. Principales parámetros operativos de la unidad de almacenamiento [42]

Debe tenerse en cuenta que, dados los parámetros operativos mencionados y el tamaño del tanque, la energía máxima que podría almacenarse en el prototipo propuesto, si todo el material de almacenamiento térmico varía su temperatura de 20 a 700 ° C, es 1,05 MWh térmicos. [42]

7.2.1.2 RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Como solución a la necesidad de demostrar la viabilidad de la escoria negra como materia prima para almacenamiento de energía térmica en procesos industriales y más concretamente, en acerías de horno de arco eléctrico, se ha propuesto un sistema mono-tanque de lecho fijo compacto.

Este sistema permite recuperar el calor residual de la planta de producción de acero a partir de los gases de escape del HAE, utilizando la escoria negra como material de almacenamiento de calor de alta temperatura y alto rendimiento térmico.

El objetivo principal de este sistema es lograr un suministro continuo de calor de la operación por lotes inherente del horno de acero. Esta estrategia de implementación presenta grandes ventajas, ya que el valor agregado de una **fuentes de calor continua** abre una gran cantidad de aplicaciones, no accesibles para fuentes discontinuas. Esta disponibilidad continua de calor de la unidad de almacenamiento de energía es un límite muy restrictivo, que conduce a una sincronización precisa del procedimiento de carga / descarga de almacenamiento de energía térmica con la operación del horno de arco eléctrico.

Como consecuencia, en caso particular de la unidad experimental de ArcelorMittal, se han obtenido grandes valores de caída de presión asociados con la gran cantidad de energía perdida del horno y los cortos tiempos disponibles para su captura y almacenamiento.

Estos fenómenos conducen claramente a condiciones de diseño estrictas, a fin de minimizar la energía de bombeo de fluido asociada sin reducir el rendimiento térmico de la unidad de almacenamiento. [42]

Además, bajo el proyecto RESLAG, también se ha investigado la influencia del período de inactividad asociado a la operación por lotes del horno. El corto tiempo de operación estática junto con el comportamiento de estratificación térmica en la unidad de almacenamiento propuesta, han demostrado el **impacto insignificante del período de inactividad en la operación de lecho fijo**. [42]

Los resultados obtenidos revelaron que, después de una optimización adecuada y un análisis paramétrico, se pueden **lograr eficiencias medias del 85% atendiendo a la eficiencia de la escoria negra como material de almacenamiento térmico y del 65% atendiendo a la eficiencia del ciclo general del sistema**. [42] [53]

RESULTADOS ENERGÉTICOS					
Número de ensayos	Energía (kWhth)		Energía de bombeo (kWh)	Eficiencia del sistema	Eficiencia del material
	Cargado	Descargado			
1	1419	893	46	62,9	85
2	1382	928	29	67,1	88,4
3	1445	930	17	64,6	88,6

Tabla 19. Balances de energía y eficiencia [42]

Estos valores muestran el gran potencial de recuperación del sistema de almacenamiento de energía térmica investigado por el proyecto RESLAG. Incluso si los valores obtenidos pudieran incrementarse mediante la implementación de una estrategia de carga diferente, el análisis presentado muestra el potencial de la solución de almacenamiento de energía térmica de lecho fijo compacto en el entorno de recuperación de calor residual de la fabricación de acero.

Cabe destacar, que este sistema también permite actuar sobre aspectos como la temperatura o el caudal, pudiendo adaptar la energía térmica a cualquier necesidad de reutilización, ya que, el fin del almacenamiento de la energía térmica recuperada del proceso, es el reaprovechamiento de la misma en otra aplicación que requiera calor.

Por ejemplo, en el proceso de fabricación de acero, existen numerosos procesos que exigen calor, como el precalentamiento de la chatarra antes de ser introducidos en el HAE, para lo cual puede ser utilizada la energía térmica almacenada.

Existen además otras posibles aplicaciones para la energía térmica almacenada como puede ser la producción de vapor para generar energía eléctrica. El uso final de dicho calor residual deberá ser analizado en base a las necesidades térmicas de cada proceso o instalación.

7.2.2 MATERIA PRIMA PARA SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA TÉRMICA EN APLICACIONES DE ENERGÍA SOLAR POR CONCENTRACIÓN.

Las plantas de energía solar por concentración (ESC) aprovechan la abundante cantidad de energía solar que se encuentra en la tierra de una manera sostenible y amigable con el medio ambiente. Por lo que, las tecnologías solares se convertirán en el futuro cercano en una opción cada vez más importante y competitiva en costos para proporcionar energía renovable libre de carbono a los mercados mundiales de energía. [54] [55]

Pero para superar las limitaciones de esta tecnología renovable, como son la producción discontinua, la necesidad de un material eficiente de bajo costo y un alto coste de inversión, es imprescindible el uso de sistemas eficientes de almacenamiento de energía térmica que aprovechen el calor sensible del material de almacenamiento.

El calor sensible útil se define por la diferencia entre dos niveles de temperatura, para los sistemas receptores centrales, la "temperatura fría" es de aproximadamente 290 ° C y la "temperatura caliente" de 550 ° C, para evitar problemas como la congelación, la degradación u otros problemas operativos. [56]

Durante el proceso de carga, las sales fundidas frías, como fluido caloportador, fluyen hacia el receptor donde se calientan, y posteriormente estas sales fundidas son redirigidas al tanque caliente. Cuando el sistema está en modo descarga, las sales fundidas fluyen desde el tanque caliente hasta el sistema de generación de vapor (SGS) donde intercambian su calor y generan vapor para la generación eléctrica. Una vez las sales salen del generador de vapor, vuelve al tanque frío con una temperatura reducida.

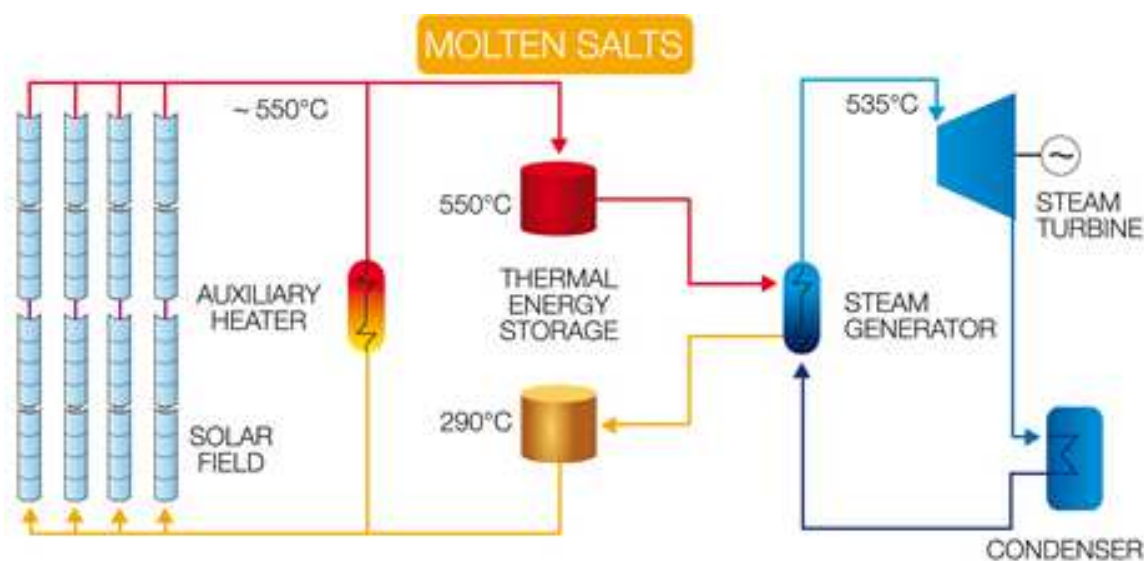


Ilustración 54. Esquema de una Planta Solar por Concentración Directa [ARCHIMEDES SOLAR ENERGY]

Si el fluido que fluye a través del receptor se utiliza también como medio de almacenamiento térmico, la configuración de la planta se llama directa; mientras que cuando el fluido utilizado en el receptor es diferente del medio de almacenamiento, la configuración de la planta se llama indirecta.

Hoy en día a escala comercial, los sistemas de almacenamiento indirecto de dos tanques se usan en varias plantas de colectores parabólicos, mientras que los sistemas directos de dos tanques se usan en plantas receptoras centrales. [57]

Sin embargo, como ya se ha mencionado en apartados anteriores, los sistemas de almacenamiento de doble tanque tienen un alto precio y son relevantes para subrayar que el desglose de costos del sistema de almacenamiento de dos tanques en una planta receptora central, indica que el inventario de sal fundida tiene la mayor parte del costo total. [58]

Por esta razón, no solo la combinación de tanques fríos y calientes en un único tanque puede ser una reducción de costos potencial [59], sino que también llenar este tanque caliente con un material sólido rentable, podría reemplazar una gran cantidad de fluido caloportador, que hoy en día suele estar constituido por sales fundidas, logrando un concepto más efectivo del tanque térmico. Además, la utilización de otros fluidos caloportadores con características similares a las sales fundidas pero con un menor coste también podría reducir el coste de las instalaciones ESC.

Por lo tanto, el proyecto RESLAG tiene como objetivo eliminar las restricciones que tienen las tecnologías de almacenamiento actuales para la aplicación de energía solar por concentración, ESC. Para alcanzar este objetivo, se ha estudiado y validado el concepto de

almacenamiento de energía térmica solar por concentración, con el fin de definir nuevos sistemas de almacenamiento basados en nuevos materiales, como la escoria, y con aire como fluido calorportador que facilitará la gestionabilidad de las energías renovables termosolares en la red eléctrica. [6]

7.2.2.1 ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA TÉRMICA MEDIANTE ESCORIA Y AIRE COMO FLUIDO CALOPORTADOR

Como es bien sabido, los sistemas de energía de torre solar concentrada usan numerosos espejos grandes, planos y de seguimiento solar (heliostatos) para enfocar la luz solar en un receptor, ubicado en la parte superior de una torre. Por lo tanto, un fluido de transferencia de calor se calienta en el receptor y se utiliza para generar vapor y con ello, electricidad. Debido a la alta temperatura de conversión, el aire tiene un potencial particularmente prometedor como fluido caloportador para una alta eficiencia solar-eléctrica. [60]

Sin embargo, para una introducción exitosa en el mercado de esta tecnología, las soluciones eficientes y escalables para el almacenamiento térmico son un requisito previo, así como, la validación del aire como fluido de transferencia de calor.

Por lo tanto, bajo el amparo del proyecto RESLAG, se han llevado a cabo varios ensayos del sistema de almacenamiento térmico basado en escorias y con aire como fluido caloportador a fin de demostrar su viabilidad en aplicaciones de ESC.

El resultado final de la investigación desarrollada, es la prueba realizada en la planta de demostración Julich Solar Power Tower en Alemania, única en el mundo debido a su uso de aire como medio de transferencia de calor para el receptor volumétrico abierto y el almacenamiento de energía térmica. [61]



Ilustración 55. Planta piloto de energía solar por concentración Julich Solar Tower [INSTITUTE OF SOLAR RESEARCH]

Mediante la prueba realizada en la instalación piloto de Alemania, el proyecto RESLAG pretende proveer un sistema competitivo de almacenamiento térmico capaz de suministrar energía en los picos de demanda nocturna, apoyar a la red eléctrica y regular la producción de energía eficientemente para periodos de alta demanda.

Además, como objetivo principal de las iniciativas del proyecto RESLAG, se pretende validar la viabilidad de la escoria negra como materia prima de almacenamiento de calor. [60]

7.2.2.1.1 CARACTERÍSTICAS DE LA INSTALACIÓN PILOTO ALEMANIA

Esta planta receptora central experimental se inauguró en 2009 para satisfacer las necesidades de un mayor desarrollo de esta tecnología y como ya se ha mencionado, es única en el mundo debido a su uso del aire como fluido caloportador.

A continuación, se recogen las principales características de la configuración de la planta, atendiendo por una parte, al campo solar, y por otra, al bloque de generación eléctrica. [62]

CARACTERÍSTICAS DE LA PLANTA		
CAMPO SOLAR	Tipo de fluido caloportador	Aire
	Area del campo solar de heliostatos (m2)	17.650
	Número de heliostatos	2.152
	Area de los heliostatos (m2)	8,2
	Altura de la torre (m)	60
	Temperatura de salida del receptor (°C)	680
BLOQUE DE GENERACIÓN	Capacidad de la turbina (bruta) (MW)	1,5
	Capacidad de la turbina (neta) (MW)	1,5
	Fabricante de la turbina	Siemens
	Metodo de enfriamiento	Seco

Tabla 20. Características de la planta de demostración Julich Solar Power en Alemania [62]

En cuanto al esquema de funcionamiento de la planta piloto, en su ciclo primario, el aire a presión atmosférica se calienta a temperaturas de aproximadamente 700 ° C. Este calor solar alimenta entonces un generador de vapor, produciendo vapor a 100 bares y 500 ° C y accionando un generador de turbina de 1,5 MWe.

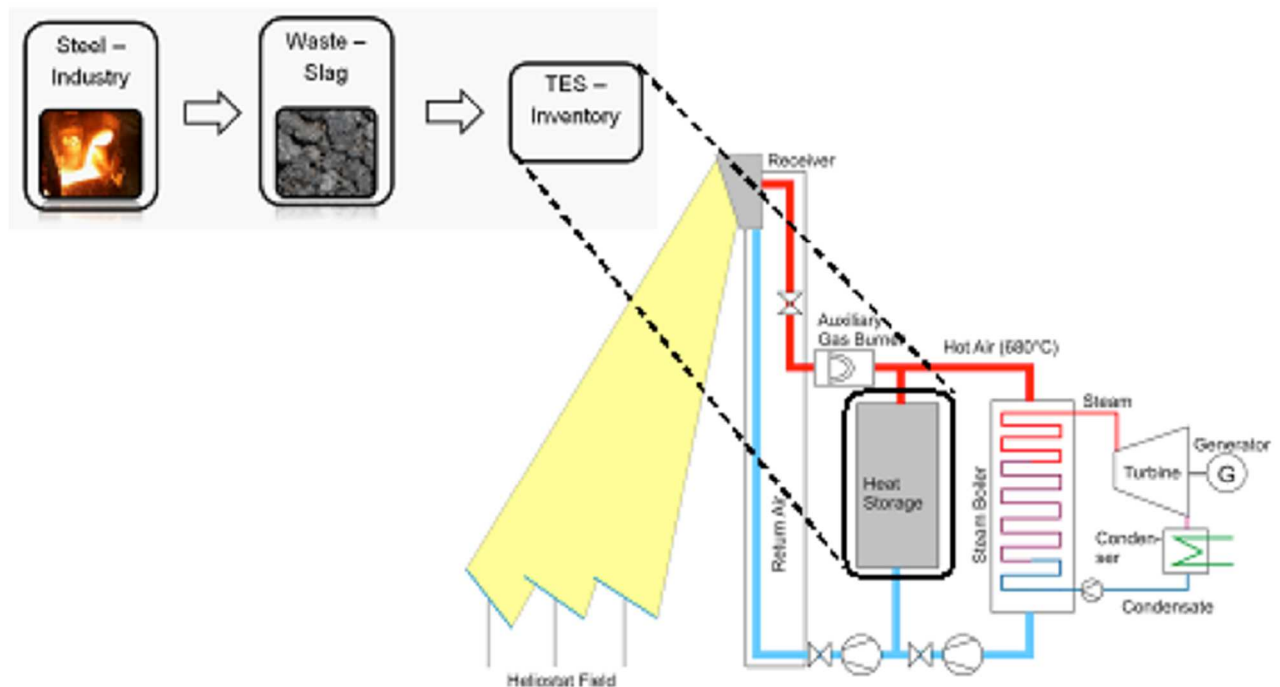


Ilustración 56. Configuración de la instalación piloto experimental Julich Solar Power [6]

Paralelamente al receptor, un sistema mono-tanque de almacenamiento de energía térmica basado en medios sólidos (escoria negra) está integrado en el ciclo de energía, el cual, se implementa como almacenamiento regenerador refrigerado por aire, como se puede apreciar en la figura anterior. [60]

El funcionamiento del conjunto es muy similar al SAT para recuperación de calor. Mientras hay radiación solar, parte del calor es dirigido a la turbina para la generación eléctrica y otra parte es dirigida a la carga del SAT. Cuando no hay radiación solar, sobre todo en las horas nocturnas, el sistema de almacenamiento térmico entra en modo descarga, suministrando calor directamente a la turbina.



Ilustración 57. Unidad experimental de almacenamiento térmico Julich Solar Tower [SOLAR PACES]

➤ **PARAMETROS OPERATIVOS Y CONDICIONES DE CONITORNO**

Como esta es la única instalación de este tipo, pero solo una planta de demostración, las cifras objetivo de los parámetros se determinaron sobre la base de los conocimientos existentes en aplicaciones de almacenamiento de energía eléctrica y se recogen en la siguiente tabla. [60]

DESCRIPCIÓN	CARACTERIZACIÓN
Potencia nominal neta de la capacidad de almacenamiento térmico de la planta ESC	150 Mwe
Capacidad del almacenamiento térmico	6,5 h (2,21 GWh)
Temperatura en la entrada del SAT durante la carga	700°C
Temperatura en la entrada del SAT durante la descarga	120°C
Máxima caída de temperatura en la salida del SAT durante la descarga	60°C
Máxima pérdida de presión a través de la salida de almacenamiento de energía térmica durante la descarga	100 mbar
Flujo másico de la descarga	780 kg/s
Flujo másico de carga máximo a través del SAT	1080 kg/s

Flujo másico de carga mínimo a través del SAT	706 kg/s
Duración de la carga	8h
Horas de sol del día de diseño*	12,2 h
Multiplo solar	2

* 12pm, March 21st, Huelva (Spain)

Tabla 21. Especificaciones de planta de ESC de aire a gran escala [60]

➤ **GEOMETRÍA Y PROPIEDADES DEL TANQUE Y LA ESCORIA**

Antes de instalar el tanque de almacenamiento de energía térmica, los investigadores del German Aerospace Center (DLR) bajo el amparo del proyecto RESLAG, verificaron diferentes diseños de sistema de almacenamiento térmico preliminares posibles y se compararon entre sí para determinar la opción más adecuada.

La siguiente ilustración muestra una descripción general de las opciones consideradas. Se diferencian por su posición y dirección de flujo, en forma axial, radial y meandro.

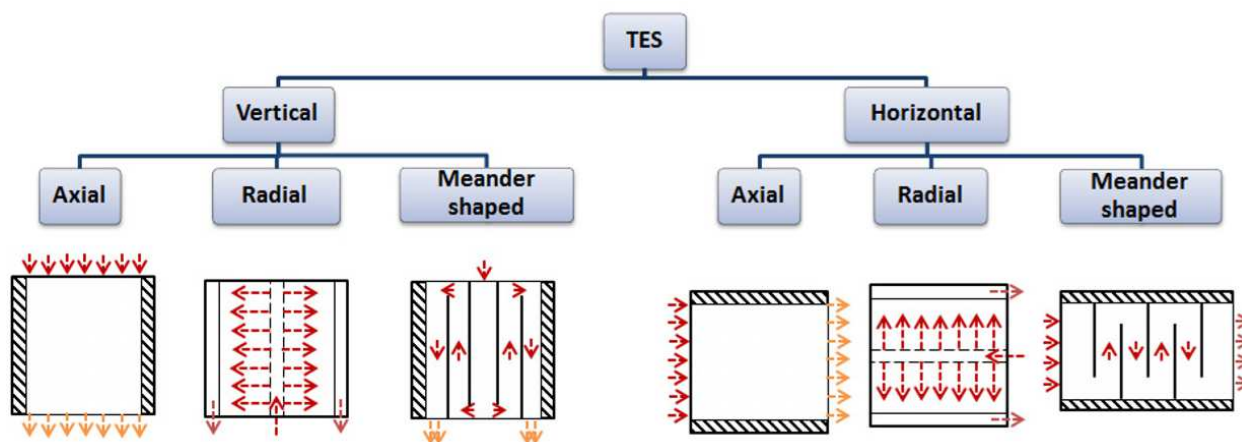


Ilustración 58. Variantes de tanques de almacenamiento térmico analizados para aplicaciones ESC [60]

Finalmente, tras realizar un análisis funcional de calidad y un modelado térmico de las variantes de tanques analizadas, se determinó que la configuración de tanque más prometedora para aplicaciones de ESC era el tanque vertical de flujo axial. [60] Este diseño de tanque de almacenamiento térmico fue el finalmente instalado en la planta de demostración Julich Solar Tower.

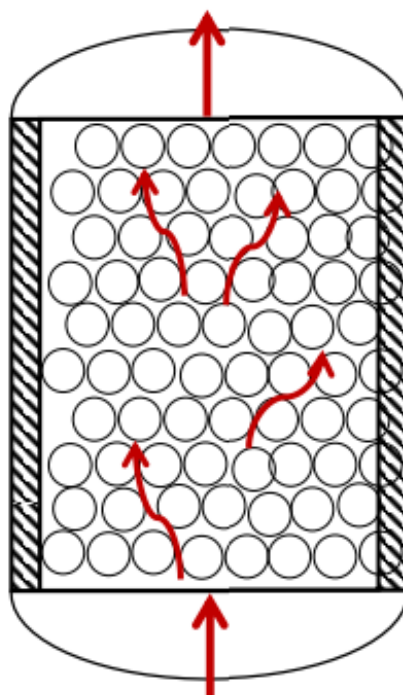


Ilustración 59. Diseño del tanque de almacenamiento térmico instalado en el Julich Solar Tower [63]

Para determinar la geometría del tanque se utilizaron modelos basados en los parámetros operativos de la tabla 21 y las propiedades de la escoria recogidas en la tabla 22, siendo estos resultados de ensayos previos realizados en el marco del proyecto RESLAG.

DESCRIPCIÓN	CARACTERIZACIÓN
Densidad (kg/m ³)	3430
Conductividad térmica (W/m K)	1,43
Capacidad de calor específico (kJ/kg K)	0,933

Tabla 22. Características de la escoria de acería [64]

Además, para llevar a cabo los cálculos de diseño térmico se asume que el sólido actúa como un medio continuo y que la transferencia de calor en el lecho es por conductividad. Se presupone también que hay una transferencia de calor radial.

Finalmente, tras realizar los cálculos termo-físicos correspondientes se diseñó un sistema mono-tanque con las siguientes dimensiones:

DESCRIPCIÓN	CARACTERIZACIÓN
Diámetro (m)	1,4
Altura (m)	1,9
Masa de aire (kg/h)	220 -700
Temperatura de carga (°C)	600 - 830
Temperatura de descarga (°C)	20 - 500

Tabla 23. Especificaciones del tanque de almacenamiento térmico de la instalación piloto [63]

Una vez diseñado y construido el tanque, se introdujeron dos tipos de escoria negra, escoria negra procedente de HAE y escoria sintética, con el objetivo de actuar como materia prima de almacenamiento de energía térmica procedente de la planta solar por concentración y con aire como fluido de transferencia de calor. En la siguiente imagen se puede comprobar la geometría de la escoria negra sintética y natural introducidas en el tanque.



Ilustración 60. Escoria negra dentro del tanque de almacenamiento térmico de la planta piloto Julich Solar Tower [63]

7.2.2.1.2 RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Como solución a la necesidad de demostrar la viabilidad de la escoria negra como materia prima para almacenamiento de energía térmica en aplicaciones de energía solar por concentración, ESC, bajo el amparo del proyecto RESLAG se propuso un sistema de almacenamiento de energía térmica mono-tanque de lecho fijo con escoria negra de acería como materia prima de almacenamiento de calor y aire como fluido caloportador.

Los resultados obtenidos tras las pruebas realizadas en la planta de demostración Solar Power Tower Julich en Alemania, demuestran, en cuanto a la geometría y diseño del tanque, que la solución de tanque vertical con flujo axial es la más prometedora. [60]

En cuanto a la escoria como material de almacenamiento térmico, se determina que el tamaño óptimo de las partículas de escoria que se introducen al SAT es de 3,2 cm. Por otro lado, los test cíclico-mecánicos realizados confirman la posibilidad de aplicación de la escoria natural de HAE y muestran que se necesitan mejoras a la hora de fabricar la escoria sintética. [63]

Además, recalcar que mediante la investigación llevada a cabo, queda confirmada la viabilidad general de la escoria como materia prima de almacenamiento térmico con aire como fluido caloportador. Y es que tras el ensayo experimental, las simulaciones y los ensayos realizados la escoria se determina como un buen material de almacenamiento térmico en comparación con las sales fundidas ya que es capaz de soportar altas temperaturas, mucho mayores que en el caso de las sales. [60] [51]

Por último, teniendo en cuenta el bajo precio de la escoria, todavía tratado como residuo de la industria siderúrgica, se determina como una solución muy prometedora, que podría abaratar considerablemente el precio de las instalaciones de ESC. [60] [51]

Por lo tanto, teniendo en cuenta todo lo anterior, se concluye en que las plantas de energía solar por concentración podrían beneficiarse de los sistemas de almacenamiento mono-tanque basados en la escoria negra de acería, ya que esta presenta mejor eficiencia térmica y un gran potencial de reducción de los costes. Como único punto negativo puede mencionarse el estrés termo mecánico que sufre la escoria, siendo necesario un mayor nivel de investigación. [60]

Entre los beneficios más destacables de la implantación del SAT basado en escorias y aire, mencionar la reducción de la cantidad de escoria depositada en vertedero, reducción de los costes de la tecnología ESC, la operabilidad a mayores temperaturas que en la actualidad, y sobre todo, la posibilidad de suministro continuo de energía eléctrica, incluso cuando no hay nubes o es de noche.

7.3 CASO PRÁCTICO. IMPLEMENTACIÓN DE SAT EN LOS HAE DE LA CAPV

7.3.1 OBJETIVO

En base a los exitosos resultados obtenidos por las investigaciones RESLAG, en el marco de SAT con escoria como MAT para la recuperación del calor residual de los hornos de arco eléctrico, [42] y teniendo en cuenta el gran número de HAE que operan en la CAPV a día de hoy [47] en los que se podría implantar sistemas de este tipo, se ha decidido cuantificar los beneficios que se tendrían tanto en la eficiencia de los HAE, como en la práctica de valorización de escoria si se implementasen SAT en todos los HAE que operan a día de hoy en la CAPV.

En el presente caso práctico, se propone que la energía recuperada gracias al almacenamiento térmico, sea reaprovechada en el proceso de fabricación del acero, lo que permitiría la sustitución de parte de la energía primaria utilizada actualmente, como la eléctrica o los quemadores de gas, por esta energía recuperada. Sin olvidar, las prácticas de valorización de escoria negra, de la propia acería, que estos sistemas traerían consigo.

Más concretamente, se pretende que una parte energía térmica recuperada por el SAT, sustituya la energía térmica aportada por los quemadores de gas, utilizados para precalentar la chatarra, y que la energía calorífica restante contenida en el fluido caloportador (aire) sea reaprovechada para la generación de energía eléctrica, mediante una turbina ORC (El ciclo orgánico de Rankine es un ciclo termodinámico que convierte calor en trabajo mecánico que a su vez es convertido en electricidad, utilizando fluido de trabajo orgánico, que permite aprovechar fuentes de calor de baja temperatura).

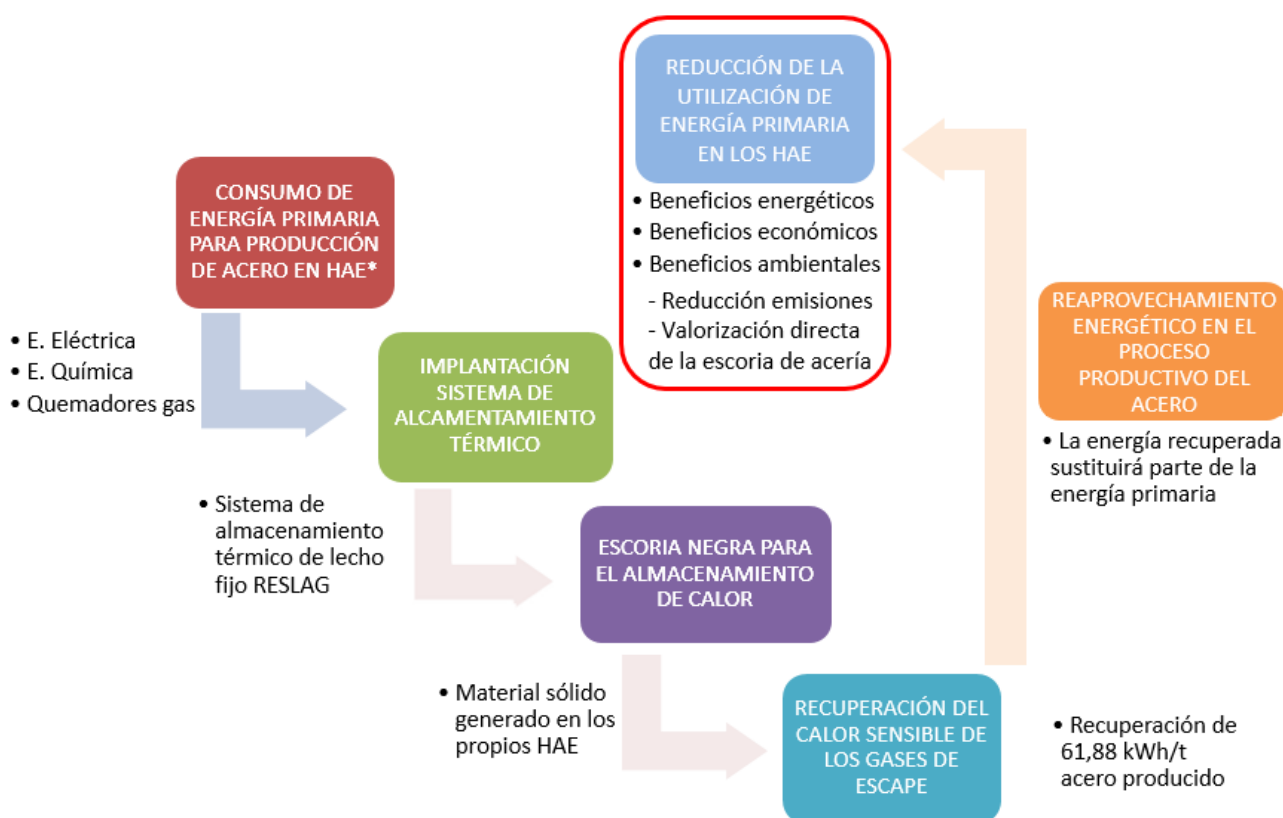


Gráfico 5. Esquema de la metodología de cálculo [Elaboración propia]

Esta práctica de recuperación conlleva un ahorro energético, económico y ambiental en la producción de los HAE, el cual se pretende cuantificar en el presente caso práctico, a fin de incentivar el uso de sistemas de almacenamiento térmico basados en escorias de acería en la CAPV, de acuerdo con las actuales políticas de economía circular.

7.3.2 BALANCE ENERGÉTICO DE UN HORNO DE ARCO ELÉCTRICO

Para producir una tonelada de acero es necesaria una cantidad de energía que depende del tipo de carga metálica, del tipo de producto, de la temperatura final, del tipo y cantidad de escoria y de otros factores. Si el horno es mal operado, con elevados tiempos de paradas, con frecuentes aperturas de la bóveda o con tiempos de afine muy dilatados, los consumos de energía por tonelada aumentan. [65]

Sin embargo, de un modo general, para producción de acero, en condiciones normales, se estima que la energía primaria consumida por un horno de arco eléctrico es aproximadamente de 722 kWh por tonelada de acero producido. [48] [66]

Esta energía primaria, se obtiene de distintas fuentes de energía, las cuales se enumeran a continuación de mayor a menor peso en el balance de energía primaria:

- Energía eléctrica alterna, para alimentar a los electrodos y generar un el arco eléctrico necesario para fundir la chatarra.
- Energía química, proveniente de la oxidación del carbono y del metal, mediante el aporte de oxígeno al proceso.
- Energía fósil en forma de gas natural, cuyo fin es precalentar la chatarra como paso previo a su introducción en el HAE.
- Otros (quema de volátiles y la quema de electrodos).

Si bien, del total de la energía primaria que se inserta en el proceso productivo del acero, alrededor del 50% se pierde como calor residual, productos de la combustión y otros, como se puede comprobar en el siguiente gráfico. [48] [66]



Gráfico 6. Balance energético de un horno de arco eléctrico [Elaboración propia]

De esta cantidad, el 15,5% está contenido en el calor sensible de los gases de escape, lo que equivale a alrededor de 112 kWh por tonelada de acero producido, para un horno que requiere 722 kWh de energía por cada tonelada producida. [48] [42]

Este calor sensible, se basa en la variación de la energía interna del material de almacenamiento, que en este caso, es la escoria negra de acería.

7.3.3 ELECCIÓN DE LA TURBINA PARA LA GENERACIÓN ELÉCTRICA

Una vez detectada la necesidad de aprovechamiento de parte del calor residual contenido en los gases de escape de los HAE para la generación eléctrica, en el presente apartado se pretende elegir la tecnología de turbina que mejor se puede adaptar a las necesidades de recuperación de calor de los hornos de arco eléctrico. Por ello, se identifican dos posibilidades claras a analizar: turbinas convencionales de ciclo Rankine o turbinas ORC, es decir, de ciclo orgánico de Rankine.

Los sistemas tradicionales de ciclo Rankine utilizan agua y vapor como fluido de trabajo, siendo la solución más común para centrales eléctricas superiores a 10 MW, con eficiencias superiores al 30% cuando se utiliza vapor sobrecalentado a alta presión o temperatura. Estas turbinas de vapor se prefieren en centrales eléctricas de gran tamaño donde el combustible es el factor de costo más importante que compensa los mayores costos de operación y mantenimiento debido al vapor a altas temperatura o presión. [67]

Por otro lado, la tecnología ORC emplea fluidos de trabajo de alto peso molecular (siloxanos, hidrocarburos y refrigerantes) que garantizan la expansión del vapor seco en todas las condiciones de funcionamiento, generalmente se prefiere para energía a menor escala sistemas de hasta 10 MW, debido a su buena eficiencia, alta flexibilidad y costos de funcionamiento mínimos (no dedicado personal necesario). [67]

La siguiente tabla muestra las principales diferencias entre el ciclo Rankine tradicional con turbina de vapor y ORC.

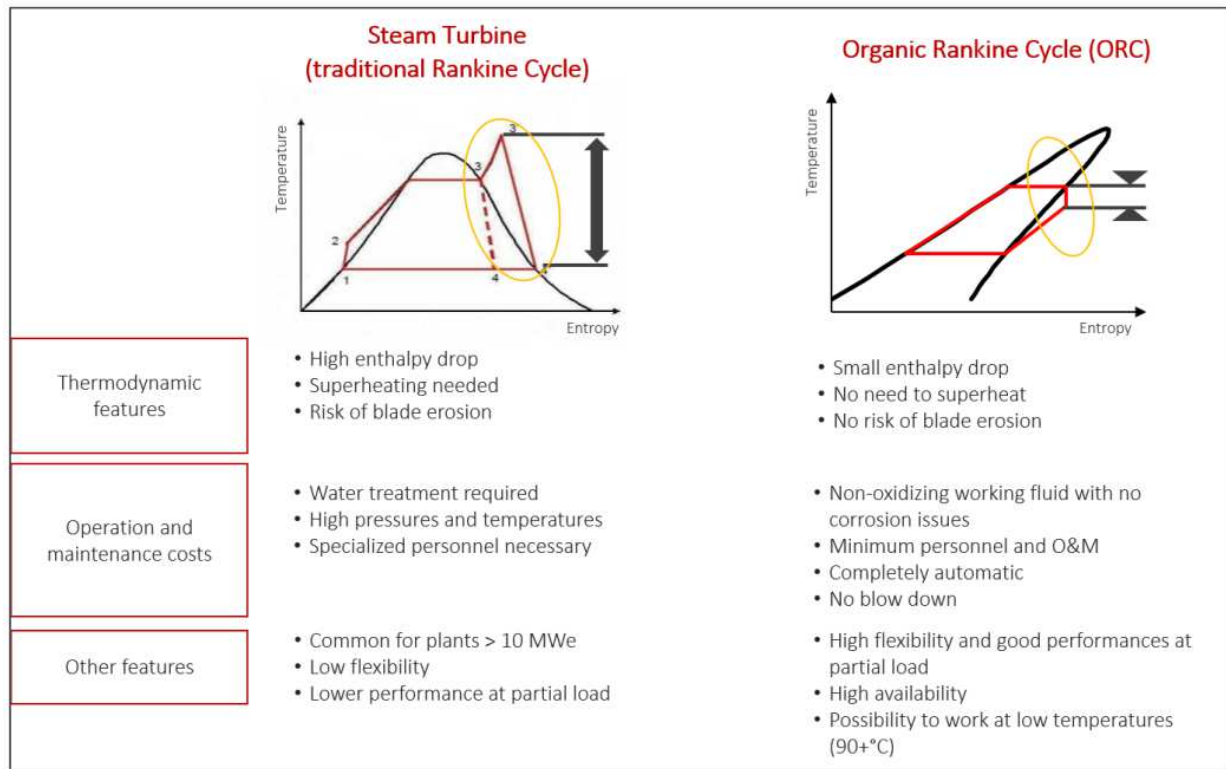


Ilustración 61. Características ORC vs turbina de gas [67]

La operación ORC simple, automática, moduladora y a prueba de fallos puede coincidir con el régimen de proceso primario real en todas las condiciones, manteniendo la confiabilidad general del sistema con un costo mínimo de operación y mantenimiento y sin personal adicional. Estas ventajas hacen del ORC la opción preferida para muchos sistemas de valorización del calor residual y probablemente la única posibilidad cuando el proceso primario es muy variable y discontinuo como en el caso de los hornos de arco eléctrico para fabricación de acero. [68]

Por lo tanto, la instalación de un turbina ORC se determina como la mejor solución para recuperar parte del calor residual de los gases de escape de los hornos de arco eléctrico. A continuación, se presenta un esquema aproximado de la secuencia de recuperación de calor y generación eléctrica mediante turbina ORC.

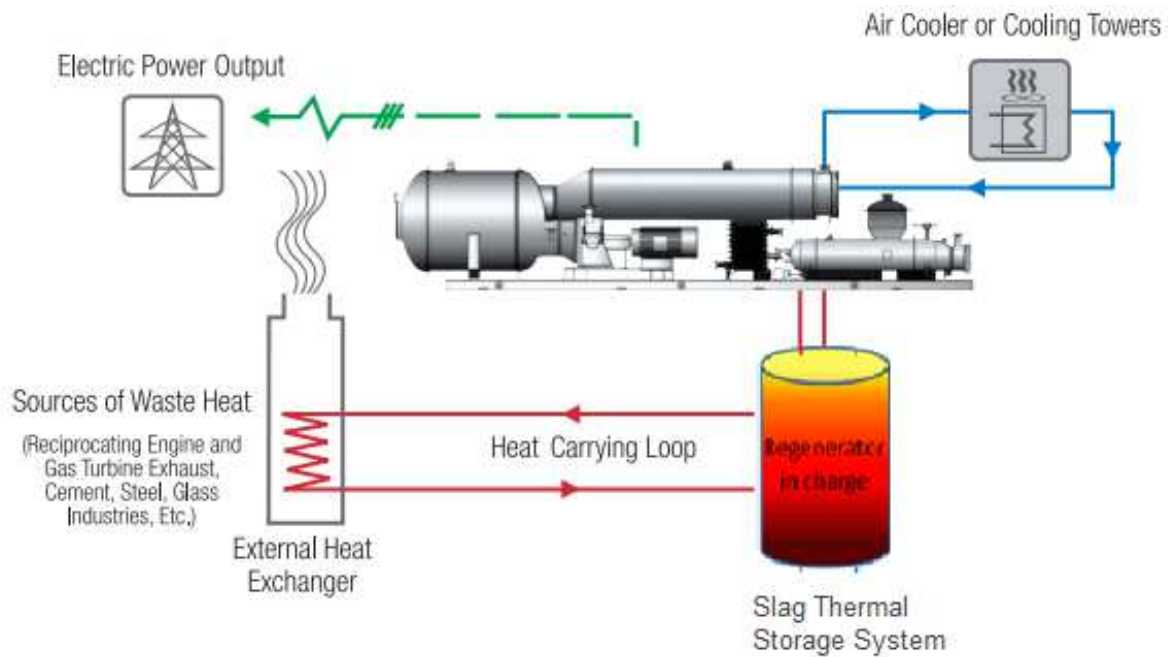


Ilustración 62. Esquema de recuperación de calor mediante SAT y turbina ORC [Elaboración Propia]

7.3.4 METODOLOGÍA DE CÁLCULO

En el presente apartado se recogen los cálculos secuenciales realizados para determinar la energía térmica que se podría recuperar y las posibilidades de reaprovechamiento, si se implantaran sistemas de almacenamiento térmico en los HAE de la CAPV, en base a los resultados prácticos de los SAT obtenidos bajo la investigación RESLAG. Además, se cuantifican los beneficios energéticos, ambientales y económicos derivados de la práctica de recuperación de calor sensible de los gases de escape.

Como ya se ha mencionado, el calor sensible perdido en los gases de escape se cuantifica como 112 kWh/t de acero producido [48]. Teniendo en cuenta la eficiencia del sistema de almacenamiento térmico probado en el HAE de ArcelorMittal, alrededor de un 65% y la eficiencia del material de almacenamiento, de un 85% [42], se ha determinado que de la totalidad de energía térmica que se puede recuperar de los gases de escape es de 61,88 kWh/t acero, un 10% de la energía requerida por tonelada de acero producida.

$$Energía\ Recuperada = 112 \frac{kWh}{t\ acero} \cdot 0,65 \cdot 0,85 = 61,88 \frac{kWh}{t\ acero}$$

Teniendo en cuenta, que en el año 2018 los HAE de la CAPV produjeron unos 7 Mt de acero [29], la energía total que hubieran ahorrado en el año 2018 si se hubiesen instalado SAT en todos ellos, sería nada menos que, 425 GWh.

$$61,88 \frac{kWh}{t\ acero} \cdot 6.873.600 \frac{t\ acero}{año\ 2018} = 425.338.368 \frac{kWh\ ahorrados}{año\ 2018}$$

Una vez identificada la gran cantidad de energía que puede recuperarse del proceso productivo del acero en HAE, es necesario identificar como se emplearan esos 62 kWh por tonelada de acero producido y que energía primaria podrían sustituir.

Considerando que para producir una tonelada de acero son necesarios 36,1 kWh térmicos procedentes de la combustión del gas natural, mediante la reinserción en el proceso de la energía térmica recuperada por el SAT, podría suplirse la totalidad de la energía procedente de la combustión de gas natural y, consecuentemente, se producirá una reducción económica de operación de los HAE y una reducción de emisión de gases de efecto invernadero.

Con la energía calorífica restante, unos 26 kWh/t acero, como se ha determinado en apartados anteriores, se llevará a cabo e reaprovechamiento de la misma para la generación eléctrica, mediante una turbina ORC. Esto recudirá la energía eléctrica que los HAE de la CAPV consumirán de la red eléctrica, con el consiguiente ahorro económico asociado y las emisiones de CO₂ asociadas a la generación eléctrica del mix energético español.

➤ **BENEFICIOS ASOCIADOS A LA NO NECESIDAD DE QUEMADORES DE GAS**

A fin de cuantificar el beneficio económico y ambiental asociado a la no necesidad del uso de gas natural en el proceso productivo de los HAE, se ha determinado el volumen de gas natural necesario por tonelada de acero producido, 3,33 m³, teniendo en cuenta el poder calorífico inferior del mismo [69].

$$\frac{36,1 \frac{kWh \text{ recuperados}}{t \text{ acero}}}{10,83 \frac{kWh}{m^3 \text{ gas natural}}} = 3,33 \frac{m^3 \text{ GN ahorrado}}{t \text{ acero}}$$

Si en el año 2018 los HAE de la CAPV produjeron unas 7 Mt de acero [29], el volumen total de gas natural que hubieran ahorrado en el año 2018 si se hubiesen instalado SAT en todos ellos, sería de 23 hm³ aproximadamente, lo que se traduce en un ahorro energético de casi 250 GWh anuales aproximadamente.

$$3,33 \frac{m^3 \text{ GN ahorrado}}{t \text{ acero}} \cdot 6.873.600 \frac{t \text{ acero producido}}{\text{año 2018}} = 22.899.088 \frac{m^3 \text{ GN ahorrado}}{\text{año 2018}}$$

$$22.899.088 \frac{m^3 \text{ GN ahorrado}}{\text{año 2018}} \cdot 10,83 \frac{kWh}{m^3 \text{ gas natural}} = 247.997.123 \frac{kWh \text{ ahorrados}}{\text{año 2018}}$$

Suponiendo que los HAE tienen un consumo superior a 100.000 kWh/año, que corresponde a la categoría T.4 de precios aplicables a los suministros de gas insulares, en el año 2018 según lo publicado en el BOE [70], los HAE pagaron 0,0354 € como término variable por cada kWh de gas natural.

Por lo tanto, los beneficios económicos asociado al ahorro de gas natural, que hubiese traído consigo la implantación de sistemas de recuperación de calor residual en los HAE de la CAPV en el año 2018 hubiese sido nada menos que 8,8 millones de €.

$$247.997.123 \frac{kWh \text{ ahorrados}}{\text{año 2018}} \cdot 0,0354 \frac{\text{€}}{kWh} = 8.779.098 \frac{\text{€}}{\text{año 2018}}$$

Por otro lado, atendiendo a los beneficios ambientales, supliendo la energía calorífica aportada por el gas natural, por la energía térmica recuperada por los SAT se evitarían las emisiones de CO₂ asociadas a la combustión del gas natural.

I.D.A.E [69] cuantifica estas emisiones en 204 g por cada kWh, lo que, teniendo en cuenta los casi 250 GWh ahorrados, supondría en el año 2018 un ahorro de emisiones de CO₂ superior a 50.000 toneladas.

$$247.997.123 \frac{kWh \text{ ahorrados}}{\text{año 2018}} \cdot 204 \frac{g \text{ CO}_2}{kWh} = 5,06 \cdot 10^{10} \frac{g \text{ CO}_2}{\text{año 2018}}$$

$$1,02 \cdot 10^{11} \frac{g \text{ CO}_2}{\text{año 2018}} \cdot \frac{1kg \text{ CO}_2}{1000 g \text{ CO}_2} = 50.591.413,1 \frac{kg \text{ CO}_2}{\text{año 2018}}$$

➤ **BENEFICIOS ASOCIADOS A LA GENERACIÓN ELÉCTRICA MEDIANTE TURBINA ORC**

De la totalidad de energía térmica recuperada por el SAT, unos 61,88 kWh/t acero, aproximadamente la mitad de esta energía sustituirá el uso de gas natural como energía primaria para el precalentamiento de la chatarra. En cuanto a la energía térmica restante, se ha decidido utilizarla para la generación de electricidad mediante una turbina ORC.

El vapor portador de calor, contenido en el SAT, transferirá la energía térmica al fluido orgánico de trabajo de la turbina ORC, que a continuación se expande en la turbina para convertir la energía térmica en energía mediante un generador eléctrico.



Ilustración 63. Turbina ORC para recuperación de calor en el HAE de ORI Martin, Brescia, Italia [TURBODEN]

La energía eléctrica generada por la turbina, puede tener un uso final variable, pudiendo ser consumida directamente por la acería, o bien, siendo vendida al operador de la red. El uso final, deberá ser determinado por la propia acería que tendrá que valorar la solución más ventajosa de acuerdo con las tarifas negociadas con el operador de la red.

En este caso, se supondrá que la energía eléctrica generada por la turbina ORC, será reinsertada al proceso y sustituirá una parte de la energía eléctrica primaria necesaria en el proceso productivo, la cual ronda los 400 kWh/t acero. [48] [66]

Teniendo en cuenta la energía térmica disponible para el ciclo orgánico de Rankine, unos 26 kWh/t acero, y la baja eficiencia de conversión térmica a eléctrica de este tipo de turbinas, un 20% aproximadamente, [71] se ha determinado que la cantidad de energía recuperable por la turbina es bastante reducida, siendo posible recuperar unos 5 kWh por tonelada de acero producido.

Si en el año 2018 los HAE de la CAPV produjeron unas 7 Mt de acero [29], la energía eléctrica generada por las turbinas ORC en el año 2018 si se hubiesen instalado SAT en todos ellos, sería de 35 GWh aproximadamente. Esta energía supondría un ahorro energético, económico y ambiental asociado a la reducción de consumo de energía eléctrica proveniente de la red.

El coste de la energía para una acería viene determinado por dos conceptos, el término fijo de potencia contratada y el término variable.

El **término potencia o término fijo** de cualquier facturación eléctrica, es el importe que se paga por la potencia contratada constituyendo una parte fija que ha de abonarse aunque no se realice ningún consumo eléctrico. Para calcular el término fijo de la facturación eléctrica, se deberán multiplicar la potencia fija contratada por el término de potencia.

En el caso de los hornos de arco eléctrico de la CAPV, la potencia fija contratada se encuentra entorno a los 60 MW. En cuanto al término de potencia, este vendrá determinado por el tipo de peaje asociado al nivel de tensión requerido por estos hornos. En el caso concreto de la CAPV, la mayor parte de la industria con hornos de arco eléctrico está conectada a líneas de 30 kV, porque son las líneas que más abundan en el País Vasco. Por lo tanto, les correspondería los peajes de acceso del Grupo 6.2, como se puede comprobar en las siguientes ilustraciones obtenidas del BOE. [72]

Nivel de tensión	Peaje
>= 1 kV y < 30 kV	6.1A
>= 30 kV y < 72,5 kV	6.2
>= 72,5 kV y < 145 kV	6.3
>= 145 kV	6.4
Conexiones internacionales	6.5

Tabla 24. Nivel de tensión para grandes consumidores [BOE]

Términos de potencia

€/KW y año

Peaje	Período 1	Período 2	Período 3	Período 4	Período 5	Período 6
6.1	39,139427	19,586654	14,334178	14,334178	14,334178	6,540177
6.2	22,158348	11,088763	8,115134	8,115134	8,115134	3,702649
6.3	18,916198	9,466286	6,927750	6,927750	6,927750	3,160887
6.4	13,706285	6,859077	5,019707	5,019707	5,019707	2,290315
6.5	13,706285	6,859077	5,019707	5,019707	5,019707	2,290315

Tabla 25. Peajes de alta tensión de 6 periodos tarifarios. [BOE]

Aclarar, que idealmente a todas les gustaría conectarse a líneas comprendidas entre 72,5 y 145 kV, para pagar peajes menores, pero las líneas de 132 kV son escasas en País Vasco, y pocas empresas tienen la posibilidad real de conectarse a ellas (generalmente hay una distancia considerable, lo cual sumado a los requisitos que pone la Distribuidora, hace que el proyecto sea inviable económicamente).

En este caso, como los hornos seguirían necesitando el mismo suministro de potencia, el ahorro económico se produciría únicamente en el **término variable**.

Considerando que la cifra de ahorro energético en el año 2018, asciende hasta los 35 GWh, y teniendo en cuenta el precio término variable de la electricidad para para grandes consumidores en el año 2018 según EUROSTAT [73] (>150 Gwh), 0,08735 €/kWh, el ahorro económico correspondiente a la reducción del consumo de electricidad de los HAE de la CAPV para el año 2018 sería de unos 3 millones de euros.

Por otro lado, teniendo en cuenta el factor de emisión medio por energía generada en España, por cada kWh de electricidad generada por una turbina ORC y no consumida de la red, se evitarían emitir 0,291 kg de CO₂ [74]. Siendo conscientes de que para el año 2018 se podrían generar 35 GWh eléctricos mediante la turbina ORC, la cantidad de emisiones de CO₂ que se evitaría verter a la atmósfera es de 10.300 toneladas aproximadamente para dicho año.

Mencionar, que en este análisis se están contabilizando únicamente los beneficios económicos brutos, sin tener en cuenta la inversión requerida, ni en el SAT ni en la turbina ORC, ya que el montante de inversión depende de distintos factores y son difíciles de cuantificar debido al bajo estado de madurez de los sistemas de almacenamiento térmico. Aun así, se ha determinado que el coste de la turbina está en torno al millón de euros. [75]

➤ **BENEFICIOS ASOCIADOS A LA VALORIZACIÓN DE LA ESCORIA EN LOS SAT**

En el presente apartado se pretende estimar la cantidad de escoria que sería valorizada como material de almacenamiento térmico si se implantasen unidades de almacenamiento de energía térmica en los HAE de la CAPV.

Partiendo de los resultados obtenidos de la instalación de almacenamiento térmico instalada en ArcelorMittal [42], se podría conocer de una manera aproximada la cantidad de escoria necesaria en cada SAT para lograr recuperar el calor residual de los gases de escape.

Lo primero es identificar el número de hornos y sus capacidades a fin de determinar la energía térmica recuperable por cada colada del horno. En este caso, se tienen un total de 8 acerías, donde una de ellas, ArcelorMittal Sestao, cuenta con dos hornos. Por lo que, la cantidad de hornos en la CAPV es de 9, teniendo estos distintas capacidades. [10]

En el caso de los hornos de ArcelorMittal Sestao y Sidenor, se ha determinado, gracias a la información facilitada por el CICEnergiGune, que son hornos de gran capacidad llegando a admitir 100 toneladas en su interior. En el caso de los otros 6 hornos restantes, no se ha

podido identificar su capacidad real pero si se sabe que son hornos de menos capacidad, por lo que se ha supuesto una capacidad teórica de 60 t.

Sabiendo, que el calor contenido en los gases de escape de los HAE es de 112kWh, y que la eficiencia del sistema de intercambio de calor de los humos al aire limpio es del 65%, se ha determinado la energía térmica recuperable por colada para cada tipo de horno, según su capacidad.

Un vez conocido este dato, y teniendo en consideración que el SAT instalado en ArcelorMittal dispone de un tanque de 3m³ mediante el cual se podrían recuperar como máximo 1,05 MWh/colada [42], se ha determinado el volumen que deberían tener los SAT para cada tipo de horno.

Acerías	Nº de hornos	Capacidad del horno* (t)	Calor generado por los gases escape (kWh/colada)	Energía Térmica recuperable (kWh/colada)	Volumen del SAT (m ³ /tanque)
ArcelorMital Sestao	2	100	11200	7280	24,47
			11200	7280	24,47
Sidenor	1	100	11200	7280	24,47
Acería Valvueda	1	60	6720	4368	14,68
Productos Tubulares	1	60	6720	4368	14,68
Corrugados Azpeitia	1	60	6720	4368	14,68
ArcelorMital Olaberria	1	60	6720	4368	14,68
ArcelorMittal Gipuzkoa	1	60	6720	4368	14,68
Acelava	1	60	6720	4368	14,68

Tabla 26. Cálculos para la determinación del volumen del SAT necesarios [Elaboración Propia]

Una vez determinado el volumen de los SAT para cada tipo de horno, y teniendo en cuenta que el volumen de huecos del SAT instalado en Arcelor es de 0,37 y que la densidad de la escoria es de 3430 kg/m³, determinada a través de los ensayos realizados bajo el marco del proyecto RESLAG, se ha obtenido la cantidad de escoria contenida en cada taque de almacenamiento térmico..

Acerías	Volumen del SAT (m3/tanque)	Volumen de escoria (m3/tanque)	Cantidad de escoria (t/tanque)	Cantidad total de escoria valorizada en la CAPV* (t)
ArcelorMital Sestao	24,47	15,42	52,88	697,93
	24,47	15,42	52,88	
Sidenor	24,47	15,42	52,88	
Acería Valvueda	14,68	9,25	31,72	
Productos Tubulares	14,68	9,25	31,72	
Corrugados Azpeitia	14,68	9,25	31,72	
ArcelorMital Olaberria	14,68	9,25	31,72	
ArcelorMittal Gipuzkoa	14,68	9,25	31,72	
Acelava	14,68	9,25	31,72	

* Si se implantasen SAT de doble tanque en los HAE de la CAPV, atendiendo a los datos productivos de 2018

Tabla 27. Cálculos para la determinación de la cantidad de escoria necesaria para los SAT [Elaboración Propia]

Como se puede comprobar en la tabla anterior, la cantidad media de escoria por tanque es aproximadamente de 40 toneladas, siendo unas 53 toneladas para los TES asociados a HAE de 100 toneladas y unas 32 toneladas para los TES asociados a los HAE de 60 toneladas.

Haciendo un cómputo general de la escoria que sería valorizada en aplicaciones energéticas si se implantasen SAT en todos los HAE de la CAPV, en el año 2018 se habrían depositado casi 700 toneladas de escoria menos en los vertederos vascos, lo que supone un claro beneficio ambiental. Todavía no se tienen datos concretos de la durabilidad de esta escoria dentro del HAE pero se estima [42], que cada 10 años habría que sustituir la escoria de los tanques de almacenamiento por nueva escoria, lo que implicaría una valorización de 70t/año.

7.3.5 CONCLUSIONES

A continuación se presentan las conclusiones obtenidas tras el análisis de los beneficios asociados a la implantación de SAT en los HAE de la CAPV, atendiendo a los beneficios percibidos por la industria metalúrgica de HAE, a los beneficios ambientales derivados de la reducción de la escoria depositada en vertedero y de las posibilidades a futuro de los SAT basados en escorias.

7.3.5.1 BENEFICIOS ASOCIADOS A LOS HORNOS DE ARCO ELÉCTRICO

Tras los cálculos realizados, queda claro que la implantación de SAT asociados a la producción del acero de los hornos de arco eléctrico en la CAPV, trae consigo notables beneficios energéticos, económicos y ambientales, tomando como referencia la producción de 2018.

La energía que los sistemas de almacenamiento térmico son capaces de recuperar, podría sustituir un 8,6% de la energía primaria consumida por un HAE por cada tonelada de acero producida, a la vez que se valoriza un residuo propio de los HAE, la escoria negra de acería.

Teniendo en cuenta la producción de acero de los HAE en el año 2018, el ahorro energético de los HAE de la CAPV proveniente de la implantación de unidades de recuperación de calor, se cuantifica en 425 GWh.

Mediante la reinserción de esta energía recuperada en el sistema, se pretende, por un lado, eliminar el uso de los quemadores de gas para el precalentamiento de la chatarra y sus emisiones de CO₂ asociadas, y por otro lado, recudir el consumo de energía eléctrica primaria de la red general.

En cuanto a los beneficios brutos asociados a la no necesidad de energía térmica proveniente de los quemadores de gas, se estima que los beneficios económicos ascenderían a nada menos que 8,8 millones de euros en el ejercicio 2018. En cuanto a los beneficios ambientales, las emisiones de CO₂ que de dejarían de emitir alcanzan las 50.000 toneladas de CO₂.

Atendiendo a los beneficios ambientales, energéticos y económicos brutos derivados de la reducción del uso de energía eléctrica primaria de la red en los HAE de la CAPV, estos se estiman en 35 GWh y 3 millones de euros aproximadamente para el año 2018, con una reducción de emisiones de 10.300 toneladas de CO₂.

Teniendo en cuenta que cada HAE tiene un consumo anual de 500GWh aproximadamente, la factura de la electricidad asciende a unos 46,6 millones de euros por HAE y año, considerando tanto el término fijo como el variable. Por lo tanto, teniendo 8 acerías como es el caso de la CAPV, el montante a desembolsar anualmente por todas las acerías es de 372,8 millones de euros, cifra muy superior al ahorro proveniente de la generación eléctrica, el cual se estima en 3 millones de euros.

7.3.5.2 BENEFICIOS AMBIENTALES ASOCIADOS A LA ESCORIA

El uso de la escoria como material de almacenamiento reduciría la cantidad de escoria depositada en vertedero, ya que permitiría valorizar una parte de dicho residuo en aplicaciones energéticas, reduciendo el volumen total de la escoria vertida, y sus consiguientes impactos ambientales.

A simple vista, las 700 toneladas de escoria valorizadas como material de almacenamiento térmico puede parecer una cifra baja frente a las 370.189 toneladas generadas por los HAE de la CAPV en el año 2018, alrededor de un 0,20 % del total.

Si atendemos solamente a las toneladas depositadas en vertederos vascos en el año 2018, alrededor de 136.968 toneladas, el balance de escoria que no hubiese sido depositada en vertedero sería de un 0,50% respecto del total de escoria vertida en 2018.

Ambas pueden parecer cifras insignificantes a simple vista, pero la realidad es que, la escoria negra está compuesta por una pequeña proporción de metales pesados que al ser depositada en vertedero, produce a contaminación del aire, agua y el suelo, además de afectar negativamente a salud humana y al crecimiento de las plantas y la vegetación, por lo que cualquier cantidad valorizada trae consigo un beneficio para el medio ambiente.

Además, se identifica positivamente desde un punto de vista ambiental y de economía circular, la posibilidad de valorizar la escoria negra de acería en la propia industria donde esta se produce, ya que es una valorización directa.

7.3.5.3 POSIBILIDADES A FUTURO

Si los HAE implementasen estos sistemas de almacenamiento térmico en sus instalaciones y posteriormente, hiciesen públicos los beneficios obtenidos, podrían motivar a otras industrias donde se pierde gran cantidad de calor residual, como vidrieras o cementeras, a instalar SAT basados en escorias, en el entorno de la CAPV y también a nivel nacional.

Esto, implicaría mayores beneficios para los HAE de la CAPV, ya que si el uso de sistemas de almacenamiento térmico se consolida y extiende a otras industrias la escoria pasará de ser un residuo por los que los HAE deben pagar para su deposición en vertedero, a ser una materia prima que los HAE podrían comercializar.

Por otro lado, la instalación de estos sistemas en de almacenamiento térmico y su puesta en marcha, ayudarán al desarrollo de la tecnología y en consecuencia, reducir el coste de las mismas, fomentando cada vez más la valorización energética de la escoria de acería, debido a su bajo coste y gran potencial térmico.

8 VALORACIÓN PERSONAL

A la vista de la información analizada en el presente documento y a los beneficios asociados al caso de práctico de valorización energética de la escoria, se hace necesario reflejar la valoración personal transversal entorno a la valorización de la escoria negra de acería.

En cuanto a la valorización de la escoria en el sector de la construcción, es un campo en el que la escoria negra tiene un gran potencial debido a su alta resistencia, durabilidad y densidad, sin olvidar que es una materia prima de bajo costo. Es por ello, que la administración vasca impulsa la valorización de la escoria negra como árido siderúrgico, lo que reducirá el uso de áridos naturales cada vez más escasos, a la vez que se da uso a un subproducto que sería depositado en vertedero.

Sin embargo, es importante mencionar que no todas las partes de la sociedad están de acuerdo con el empleo de la escoria de acería. Este es el caso de Cantabria, provincia en la que la Conserjería de Medio Ambiente ha sido denunciada ante la Comisión Europea y el Ministerio de Medio Ambiente por parte de Ecologistas en Acción cuando se aprobó el proyecto de revisión del recientemente aprobado “Decreto 100/2018, de Valorización de Escorias en la Comunidad Autónoma de Cantabria”.

Según EA, el nuevo decreto permite dar salida a los productores de estos residuos y que puedan hacerlo de una forma barata aunque ello suponga un riesgo inaceptable para el medio ambiente y sobre todo para las aguas subterráneas debido a los problemas de lixiviación de los metales pesados contenidos en la escoria.

Asimismo, denuncia que el proceso de revisión del decreto se soporta en estudios encargados y sufragados por las industrias generadoras por un lado y las canteras por otro, con conclusiones, como mínimo, bastantes dispares, al igual que los intereses de sus promotores. Aun así, la justicia falló a favor de la Conserjería de Medio Ambiente y el decreto fue finalmente publicado en el Boletín Oficial de Cantabria en 20 de diciembre del 2018.

Desde mi propio punto de vista, la mayor parte de las aplicaciones que se mencionan en el Decreto 64/2019 ponen condicionantes al uso de la escoria para evitar la lixiviación. Un claro ejemplo son las aplicaciones ligadas (escenario1), en las que debido al uso de un conglomerante la escoria queda encapsulada en una matriz evitando su exposición al medio, o las aplicaciones no ligadas a las que se les exige el uso de coberturas que garanticen una alta impermeabilización (escenario3).

En el caso de las aplicaciones no ligadas bajo cobertura no totalmente impermeable (escenario 2), es cierto que son aplicaciones en la escoria está en contacto directo con el suelo y a las que no se les exige una impermeabilización, lo que puede suscitar dudas en cuanto al impacto ambiental que estas pueden generar por lixiviación al suelo y a las aguas subterráneas de sustancias contaminantes.

Por otro lado, analizando la valorización de la escoria en aplicaciones energéticas de recuperación de calor, se determina como una potencial solución que permitiría, además de valorizar la escoria, desarrollar sistemas que permitan recuperar la gran cantidad de energía térmica en forma de calor residual que se desperdicia anualmente en la industria vasca.

Aun así, es cierto que es una aplicación que necesita ser probada y analizada de una manera más específica mediante prototipos reales, para que su implementación pueda ser generalizada, lo que reduciría los costes de inversión y la incertidumbre de algunas industrias acerca de sus beneficios.

En este estudio se han analizado de forma generalizada los beneficios económicos, energéticos y ambientales brutos que traería consigo la implementación de sistemas de almacenamiento térmico con escoria como material de almacenamiento térmico. Aunque, en ningún momento se han mencionado los beneficios netos, es decir, los beneficios una vez descontados los gastos de inversión, ya que, esta aplicación no es rentable a día de hoy pero puede serlo en un futuro.

Un ejemplo podría ser el beneficio económico asociado a la reducción del consumo de electricidad, suplido por la energía generada por la turbina ORC, estimado en torno a 3 millones de euros para el año 2018 para todos los HAE de la CAPV. La verdad es que, solamente las 8 turbinas ORC que deberían ser instaladas en las 8 acerías de HAE de la CAPV suponen una inversión inicial de 8 millones de euros. Además, a esta cifra habría que sumarle los gastos de otros componentes necesarios como conducciones, intercambiadores de calor, tanques metálicos para la escoria, etc. Lo que hace que los periodos de retorno de la inversión sean muy dilatados.

Otro ejemplo crítico, podría ser la baja rentabilidad valorizadora que supone la cantidad de escoria valorizada, como material de almacenamiento térmico para la recuperación de calor de los HAE, alrededor de 700 toneladas cada 10 años según los cálculos realizados, cuando los hornos producen alrededor de 10% de la capacidad del horno de escoria por cada colada. Esto, en el caso de los grandes hornos como el de Arcelor o Sidenor supone una producción de 10 toneladas de escoria por colada, es decir, 240 toneladas de escoria diaria, y 87.600 toneladas al año por cada horno.

Aun así, se pretende que este análisis de posibilidades de valorización constituya un primer paso para la concienciación de las administraciones y del sector privado ante las ventajas y beneficios derivados del empleo de subproductos y materiales reciclados, sobre todo en sectores estratégicos como es el sector de la energía.

Además, se pretende abrir un abanico de posibilidades de valorización entorno a las escorias de acería, residuo más voluminoso del País Vasco, y cuantificar los beneficios brutos que la posibilidad más innovadora de todas ellas puede aportar a la sociedad vasca, la escoria como materia prima para almacenamiento térmico.

Está claro, que para que estas prácticas de valorización se lleven a delante, sobre todo las que se engloban en el sector de la energía y que tienen un menor grado de desarrollo, es necesario que la administración pública vasca se involucre, fomentando iniciativas de investigación de la escoria en aplicaciones energéticas (ya que son procesos muy costosos para empresas privadas) mediante programas de financiación pública, que fomenten las políticas de economía circular.

Por lo tanto, teniendo en cuenta todo lo mencionado en el presente análisis, me posiciono en la postura de impulsar la valorización de la escoria, siempre desde un marco ambiental estricto que asegure la integridad ambiental y de la sociedad vasca, siendo las aplicaciones energéticas las que mejor encajan con los retos de la sociedad vasca en materia de innovación y economía circular, y por tanto, las que deberían ser fomentadas en mayor grado.

9 BENEFICIOS DE LA VALORIZACIÓN DE LA ESCORIA

Una vez analizados, de un modo específico los beneficios que traería consigo, en el sector de la construcción y el de la energía, la valorización de la escoria negra, es importante recoger los beneficios generales derivados de la valorización de la misma, en los 4 pilares básicos para una transición hacia un desarrollo sostenible: medio ambiente, administración, sector privado y ciudadanía.

➤ MEDIO AMBIENTE

- Reducción del consumo de materias primas naturales, aumentando la vida útil de estos recursos.
- Reducción de emisiones en el proceso de extracción y preparación de esas materias primas.
- Reducción de emisiones de CO₂.
- Reducción del impacto visual, edáfico y biótico que traen consigo los vertederos.

- Reducción de la distorsión paisajística por presencia de canteras y vertederos.
- Beneficio espacial al mantener los vertederos sin ocupar, no depositando estos residuos en vertedero.

➤ **ADMINISTRACIÓN**

- Incrementa la transparencia y eficiencia de la administración.
- Genera una base de conocimiento necesaria.
- Permite lograr metas ambientales asumidas por el Gobierno Vasco en materia de economía circular y reducción de impactos ambientales.
- Fomenta el ahorro económico al considerar los costes de ciclo de vida.
- Mejora la imagen pública y es ejemplo de buenas prácticas para el sector privado.
- Reducción de costes en vertederos y control de su utilización.

➤ **SECTOR PRIVADO**

- Ofrece incentivos a la industria para innovar y ser más competitiva.
- Refuerza la economía local y establece estándares ambientales para productos y servicios.
- Impulsar la investigación de nuevos productos y servicios.
- Fomenta nuevas líneas de negocio.
- Permite utilizar una nueva materia prima de bajos coste y altas prestaciones en diversos sectores como es sector energético, construcción, cementeras, etc.

➤ **SOCIEDAD**

- Reduce el precio de productos y tecnologías ambientales.
- Mejorar la calidad de vida al reducir impactos ambientales, sobre todo en el entorno de los vertederos.
- Establece un nexo de emprendimiento y ejemplo, incrementando la concienciación sobre temas ambientales.
- Fomenta las prácticas de economía circular, donde los residuos son reutilizados en otras aplicaciones.
- Permite la generación de nuevos empleos.



Ilustración 64. Los 4 pilares básicos para una transición hacia un desarrollo sostenible. [Elaboración Propia]

10 CONCLUSIONES

El presente análisis se ha centrado en la detección de las posibilidades de valorización de la escoria negra, en dos sectores estratégicos de la CAPV, el sector de la construcción y el sector de la energía.

Primeramente, mencionar, que analizados diversos ensayos, pruebas y análisis realizados por diversos laboratorios y centros de investigación, como el CEDEX o CICEnergyGune, se ha determinado que la escoria es una materia prima con excelentes propiedades tanto físicas y térmicas, como de durabilidad.

Por otro lado, dada la creciente motivación de la administración pública vasca por alinear las políticas locales con las políticas europeas de economía circular y gestión de residuos, en los últimos años se han publicado numerosas normativas, planes, guías y estrategias, cuyo fin es fomentar la valorización de la escoria negra de acería.

Más concretamente, en el sector de la construcción se ha publicado el pasado año 2019, el Decreto 64/2019 [15], el cual amplía las unidades de obra en las que se permite utilizar el árido siderúrgico respecto al decreto anterior [14] y define las condiciones que este debe cumplir, en materia de expansividad, granulometría, lixiviación, etc.

Esta normativa abre un gran abanico de posibilidades de utilización de la escoria en el sector de la construcción facilitando su uso, ya que, a través de un marco normativo claro, disipa la gran incertidumbre que se percibía en el sector en torno a las condiciones que el árido debe cumplir, así como, al comportamiento del árido con el paso del tiempo.

Aun así, tras el análisis realizado, se ha identificado un bajo grado de empleo de árido siderúrgico por parte de las empresas privadas de construcción, siendo las administraciones públicas las que fomentan en mayor grado el uso del mismo, a través de la inclusión obligatoria de su uso en los Pliegos Técnicos relativos a los contratos públicos. Un claro ejemplo de buenas prácticas, siendo a día de hoy el mayor valorizador de escorias negras de HAE de la CAPV, es el Departamento de Obras y Construcción de la Autoridad Portuaria de Bilbao, con José Luis García-Mochales como jefe de departamento, gran conocedor de las propiedades del árido siderúrgico y principal precursor del empleo del mismo en obras civiles y portuarias de carácter público desarrolladas por la APB.

En cuanto a las posibilidades de valorización de la escoria en materia energética, siguiendo las indicaciones de investigar nuevas líneas de aplicación de las escorias, recogidas en el plan de “Economía Circular y Gestión de Residuos en Euskadi” [22] se ha identificado una potencial aplicación como material de almacenamiento térmico aún en fase experimental. Esta aplicación, no se ha llevado a la práctica comercial, pero si se identifican ciertas prácticas experimentales en la CAPV, de la mano del CICEnergiGune, colaborador principal del proyecto RESLAG, y de la siderúrgica ArcelorMittal, recogidas en el presente análisis.

Las aplicaciones de la escoria como material de almacenamiento térmico son diversas, ya que, puede beneficiar a numerosos sectores estratégicos, como las energías renovables, la industria metalúrgica, cementeras, vidrieras y en definitiva, cualquier aplicación que necesite del almacenamiento de energía o recuperación de calor residual.

Así mismo, se ha analizado de una manera más específica el uso de la escoria como material de almacenamiento térmico para la recuperación del calor residual de los gases de escape del horno de arco eléctrico, por varios motivos, entre los que destacan el gran número de HAE que se ubican en la CAPV y la gran cantidad de energía que estos pierden en forma de calor.

Tras la realización de un análisis cuantitativo de los beneficios derivados de la implantación de sistemas de almacenamiento térmico en los HAE de la CAPV, se ha determinado como una potencial posibilidad de valorización de la escoria que traería consigo notables beneficios económicos, energéticos y ambientales a la CAPV, pero debe ser investigada en mayor grado.

Es por ello que mediante el presente análisis, se ha pretendido identificar todas las posibilidades de valorización de la escoria, en ambos sectores de referencia, realizando un análisis más detallado y que refleje de manera numérica los potenciales beneficios que traería consigo la valorización de la escoria negra en el emergente sector del almacenamiento de energía térmica, a fin de impulsar a todos los sectores de la sociedad hacia una economía más circular y sostenible.

11 REFERENCIAS

- [1] EIA, ENERGY INTERNATIONAL AGENCY. (2018). “World Energy Outlook 2018”. Web: <https://www.iea.org/news/preview-of-world-energy-outlook-2018>
- [2] DEPARTAMENTO DE MEDIO AMBIENTE, PLANIFICACIÓN TERRITORIAL Y VIVIENDA DEL GOBIERNO VASCO. (2019, Septiembre). Estrategia de Economía Circular de Euskadi 2030. Web: <https://www.ihobe.eus/publicaciones/estrategia-economia-circular-euskadi-2030-2>
- [3] IHOBE, SOCIEDAD PÚBLICA DE GESTIÓN AMBIENTAL Y DEPARTAMENTO DE MEDIO AMBIENTE Y POLÍTICA TERRITORIAL Y VIVIENDA DEL GOBIERNO VASCO. (2018, Abril). *Diagnóstico de Economía Circular en la Industria del País Vasco*. Web: https://www.euskadi.eus/contenidos/informacion/economia_circular/es_def/adjuntos/diagnostico.pdf
- [4] IHOBE, SOCIEDAD PÚBLICA DE GESTIÓN AMBIENTAL Y DEPARTAMENTO DE MEDIO AMBIENTE Y POLÍTICA TERRITORIAL DEL GOBIERNO VASCO (2015, Marzo). *Plan de Prevención y Gestión de Residuos 2020 del Gobierno Vasco*. Web: <https://www.euskadi.eus/gobierno-vasco/-/documentacion/2015/plan-de-prevencion-y-gestion-de-residuos-2020/>
- [5] EUROSLAG. *Asociación europea de productores y gestores de escorias metalúrgicas*. Web: <http://www.euroslag.com/>
- [6] RESLAG - Home. (2019). RESLAG. Web: <http://www.reslag.eu/>
- [7] GOBIERNO DE ALEMANIA. (2017). *Ordenanza sobre la introducción de un reglamento sustitutivo de materiales de construcción*. Web: <https://www.bundesrat.de/SharedDocs/beratungsvorgaenge/2017/0501-0600/0566-17.html>
- [8] GOBIERNO DEL REINO UNIDO. (2016, Mayo). *Protocolo de Calidad de agregado de escorias de acería*. Web: <https://www.gov.uk/government/publications/aggregate-fromwaste-steel-slag-quality-protocol>
- [9] BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO. *Real Decreto 1247/2008, de 18 de julio, por el que se aprueba la instrucción de hormigón estructural (EHE-08)*. Web: <https://www.boe.es/eli/es/rd/2008/07/18/1247>
- [10] UNESID. (2020). *Unión de Empresas Siderúrgicas*. <http://www.unesid.org/>

[11] CEDEX. (2013, Diciembre). *Escorias de Acería de Horno de Arco Eléctrico*. http://www.cedexmateriales.es/upload/docs/es_ESCORIASDEACERIADEHORNODEARCOELETRICODIC2013.pdf

[12] MINISTERIO DE FOMENTO. (Vigente). *Pliego General de Prescripciones Técnicas para Obras de Carreteras y Puentes PG-3*. Web: <https://www.mitma.gob.es/carreteras/normativa-tecnica/17-pliegos-de-prescripciones-tecnicas-generales>

[13] DEPARTAMENTO DE MEDIO AMBIENTE, PLANIFICACION TERRITORIAL Y VIVIENDA DEL GOBIERNO VASCO. *Memoria económica del proyecto de decreto por el que se regula la valorización de escorias negras procedentes de la fabricación de acero en hornos de arco eléctrico y su posterior utilización como árido siderúrgico*. Web: https://www.legegunea.euskadi.eus/contenidos/tramita_decreto/dncg_dec_853_18_05/es_def/adjuntos/memoria%20economica%20decreto%20de%20escorias%20v3.pdf

[14] BOLETÍN OFICIAL DEL PAÍS VASCO. (2003, Febrero). *Decreto 34/2003, de 18 de febrero, por el que se regula la valorización y posterior utilización de escorias procedentes de la fabricación de acero en hornos de arco eléctrico, en el ámbito de la Comunidad Autónoma del País Vasco*. Web: https://www.legegunea.euskadi.eus/x59-preview/es/contenidos/decreto/bopv200301186/es_def/index.shtml

[15] BOLETÍN OFICIAL DEL PAÍS VASCO. (2019, Abril). *Decreto 64/2019, de 9 de abril, del régimen jurídico aplicable a las actividades de valorización de escorias negras procedentes de la fabricación de acero en hornos de arco eléctrico*. Web: https://opendata.euskadi.eus/catalogo/contenidos/decreto/bopv201902045/es_def/index.shtml

[16] DEPARTAMENTO DE TRANSPORTES Y OBRAS PÚBLICAS. (2012). *Norma de dimensionamiento de firmes del País Vasco. Anejo 3: Áridos siderúrgicos de horno eléctrico para mezclas bituminosas*. Web: http://www.carreteros.org/normativa/firmes/pdfs/ccaa_pdf/pv2.pdf

[17] DEPARTAMENTO DE MEDIO AMBIENTE Y POLÍTICA TERRITORIAL DEL GOBIERNO VASCO. (2014, Diciembre). *Programa Marco Ambiental 2020*. Web: https://www.irekia.euskadi.eus/uploads/attachments/5724/Programa_Marco_Ambiental_CAPV_2020.pdf?1422951795

[18] DEPARTAMENTO DE MEDIO AMBIENTE Y POLÍTICA TERRITORIAL DEL GOBIERNO VASCO. (2019, Abril). *Guía de aplicación del decreto de actividades de valorización de escorias negras*

de fabricación de acero en hornos de arco eléctrico y su utilización como árido siderúrgico.

Web: <http://www.bibliotekak.euskadi.eus/WebOpac>

[19] DEPARTAMENTO DE MEDIO AMBIENTE Y POLÍTICA TERRITORIAL GOBIERNO VASCO. (2016, Septiembre) *Programa de Compra y Contratación Pública Verde del País Vasco 2020.*

Web: https://www.ogasun.ejgv.euskadi.eus/r51catpub/eu/k75aWebPublicacionesWar/k75aObtenerPublicacionDigitalServlet?R01HNoPortal=true&N_LIBR=051972&N_EDIC=0001&C_DIOM=es&FORMATO=.pdf

[20] IHOBE, SOCIEDAD PÚBLICA DE GESTIÓN AMBIENTAL, Y DEPARTAMENTO DE MEDIO AMBIENTE Y POLÍTICA TERRITORIAL DEL GOBIERNO VASCO. (2019, Enero). *Economía circular en el sector de la construcción. Buenas prácticas en el uso de materiales reciclados en obra civil en el País Vasco.*

Web: <https://federacionrcd.org/wp-content/uploads/Buenas-pr%C3%A1cticas-en-el-uso-de-materiales-reciclados-en-obra-civil-en-el-Pa%C3%ADs-Vasco-IHOBE-Febr.19.pdf>

[21] DEPARTAMENTO DE MEDIO AMBIENTE, PLANIFICACIÓN TERRITORIAL Y VIVIENDA DEL GOBIERNO VASCO. (2019, Septiembre). *Estrategia de Economía Circular de Euskadi 2030.*

Web: <https://www.ihobe.eus/publicaciones/estrategia-economia-circular-euskadi-2030-2>

[22] IHOBE, SOCIEDAD PÚBLICA DE GESTIÓN AMBIENTAL Y DEPARTAMENTO DE MEDIO AMBIENTE Y POLÍTICA TERRITORIAL Y VIVIENDA DEL GOBIERNO VASCO. (2019, Marzo). *Informe de Economía Circular y Gestión de Residuos en Euskadi.*

Web: <https://www.ihobe.eus/publicaciones/economia-circular-y-gestion-residuos-en-euskadi-2>

[23] DEPARTAMENTO DE MEDIO AMBIENTE, PLANIFICACIÓN TERRITORIAL Y VIVIENDA DEL GOBIERNO VASCO. (2020, 10 Marzo). *Escorias de acería - Residuos - Euskadi.eus.*

Web: <https://www.euskadi.eus/escorias-de-aceria/web01-a2inghon/es/>

[24] WORLDSTEEL ASSOCIATION. (2019, Noviembre). *Steel Statistical Yearbook 2019.*

Worldsteel. Web: <https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:7aa2a95d-448d-4c56-b62b-b2457f067cd9/SSY19%2520concise%2520version.pdf>

[25] ENRÍQUEZ BERCIANO, J. L.; TREMP GUERRA, E.; DE ELÍO DE BENGY, S.; FERNÁNDEZ SEGOVIA, D. (2009, noviembre). *Tecnología del Acero. Parte I. Acería Eléctrica. Universidad Politécnica de Madrid.*

Web: http://oa.upm.es/1929/1/Aceria_electrica_MONO_2009.pdf

[26] MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO. (2019, Octubre). *Sistema Español de Inventario de Emisiones Metodologías de estimación de emisiones - Hornos Eléctricos de las acerías.*

Web: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y>

[evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/040207-hornos-electr-acerias_tcm30-502317.pdf](https://www.euskadi.eus/web01-a2inghon/es/contenidos/estadistica/amb_res_nopel_2018/es_def/index.shtml)

[27] IHOBE, S.A., DEPARTAMENTO DE ORDENACIÓN DEL TERRITORIO, VIVIENDA Y MEDIO AMBIENTE DEL GOBIERNO VASCO. (1999, Febrero). *Libro Blanco para la Minimización de Residuos y Emisiones de Escorias de Acería*.

[28] BRANCA, T.A., COLLA, V. Y VALENTINI. (2009). *Ironmaking and Steelmaking. A way to reduce environmental impact of ladle furnace slag. Vol. 36*.

[29] DEPARTAMENTO DE MEDIO AMBIENTE, PLANIFICACIÓN TERRITORIAL Y VIVIENDA DEL PAIS VASCO (2020, 13 Enero). *Estadística de Residuos no Peligrosos de la C.A. del País Vasco. 2018*. Web: https://www.euskadi.eus/web01-a2inghon/es/contenidos/estadistica/amb_res_nopel_2018/es_def/index.shtml

[30] MANSO, J.M.; GONZÁLEZ, J.J.; POLANCO, J.A. (2004, Diciembre). *Electric Arc Furnace Slag in Concrete. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol 16, No. 6*.

[31] ETXEBARRIA, M.; PACHECO, C.; MENESES, J.M.; BERRIDI, I. (2010) *Properties of Concrete using Metallurgical Industrial By-products as Aggregate. Construction and Building Materials. Vol. 4. pp 1594-1600*.

[32] RUBIO, M.D.; CONTRERAS, F.; PARRÓN, M.A.; RUBIO, F. (2011, Octubre). *Resistencia Mecánica de Hormigones con Sustitución de un Porcentaje de Cemento por Polvos de Humo y Escoria de Horno de Arco Eléctrico*. Congreso ACHE.

[33] PRIETO, M.I.; COBO, A.; RODRÍGUEZ, A.; MANSO, J.M. (2011, Octubre). *Estudio de la corrosión de armaduras embebidas en morteros fabricados con sustitución parcial y total de áridos por escorias blancas de horno de cuchara*. V Congreso de la Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural.

[34] ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. (2010). *Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos*. UNE. Web: <https://www.une.org>

[35] AENOR. (2002, Septiembre). Norma UNE-EN-12457-4 de Caracterización de Residuos. Web: file:///C:/Users/patricia/Downloads/EXT_NDzNkiCoazqjybp29gNt.pdf

[36] U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. (2019). *“International Energy Outlook 2019”*. Web: <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/ieo2019.pdf>

- [37] BRITISH PETROLEUM (BP). (2018). *“BP Statistical Review of World Energy”*
- [38] PARFOMAK, P. (2012). *Energy storage for power grids and electric transportation: A technology assessment*. (Congressional Research Service)
- [39] ENTE VASCO DE LA ENERGÍA. (2015). Área de Estudios y Planificación. *Euskadi energía: Datos energéticos 2014*.
- [40] RAINER SCHULZE. (2012). *Siemens installs heat recovery pilot plant at Stahlwerk Thüringen GmbH*. Web: <https://www.siemens.com/press/pi/IMT201205194e>
- [41] PACHECO, J.; SHOWALTER, S.; KOLB, J. (2002). *Development of a molten-salt thermocline thermal energy storage system for parabolic trough plants*. Journal of Solar Energy Engineering, vol. 124, pp. 153-159.
- [42] ORTEGA, I., Y RODRIGUEZ, J. (2019). Thermal energy storage for waste heat recovery in the steelworks: The case study of the REslag project. SCIENCE DIRECT. Web: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261919300078?via%3Dihub>
- [43] AILIGHT ENERGY. Ait Baha CSP Pilot-Plant. Web: <http://www.airlightenergy.com/ait-baha-csp-pilot-plant/>
- [44] CORDIS - EUROPEAN COMMISSION. (2019, 19 Marzo). Web: <https://cordis.europa.eu/project/id/642067>
- [45] RESLAG - *Tríptico programa RESLAG*. (2014, Julio). Web: <http://www.reslag.eu/wp-content/uploads/2018/07/Reslag-leaflet-ES.pdf>
- [46] FERNÁNDEZ, A.; BARRENECHE, C.; MIRÓ, L.; BRUNCKNER, S.; CABEZA, L.; (2015). *Thermal energy storage (TES) systems using heat from waste*. *Advances in Thermal Energy Storage Systems*, pp 479 – 92. Web: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781782420880500195>
- [47] [EUROFER (The European Steel Association). (2020). *European Steel in Figures, 2020*. Web: <https://www.eurofer.eu/news/european-steel-in-figures-2020-released/>
- [48] EIRES Project. (2013-2016). Environmental impact evaluation and effective management of resources in the EAF steelmaking (RFSR-CT-2013-00030).

- [49] MIRÓ L, BRUECKNER S, MCKENNA R, CABEZA L. (2016). *Methodologies to estimate industrial waste heat potential by transferring key figures: A case study for Spain*. SCIENCE DIRECT. Web: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261916302409>
- [50] ZHANG Q, ZHAO X, LU H, NI T, LI Y. (2017). *Waste energy recovery and energy efficiency improvement in China's iron and steel industry*. SCIENCE DIRECT. Web: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261917300909>
- [51] ORTEGA, I. (2017, 21 Julio). *PhD - High temperature packed bed thermal energy storage systems based on low cost materials*.
- [52] ORTEGA, I. (2019, 19–20 Junio). *Slag as thermal energy storage (TES) feedstock for heat recovery applications*. [Turning waste from steel industry into valuable low cost feedstock for energy intensive industry]. RESLAG Workshop 2019, Rabat, Morocco.
- [53] ORTEGA, I., WANG, Y., DURÁN, M., UNAMUNZAGA, L., & BIELSA, D. (2019, 26 Julio). Experimental validation of steel slag as thermal energy storage material in a 400 kWh prototype. SCIENCE DIRECT. Web: <https://doi.org/10.1063/1.5117741>
- [54] ABBOTT, D. (2010). Keeping the energy debate clean: how do we supply the world's energy needs?, pp 42–66. Web: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2009.2035162>
- [55] TRIEB, F.; SCHILLINGS, C.; O'SULLIVAN, M.; PREGGER, T.; HOYER-KLICK, C. (2009). *Global Potential of Concentrating Solar Power*. 15th Solar Paces Conference in Berlin, Germany.
- [56] FERRI, R.; CAMMI, A.; MAZZEI, D. (2008). *Molten salt mixture properties in RELAP5 code for thermodynamic solar applications. Vol 47, pp 1676–1687*. SCIENCE DIRECT. Web: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1290072908000197?via%3Dihub>
- [57] GIL, A.; MEDRANO, M.; MARTORELL, I.; LÁZARO, A.; DOLADO, P.; ZALBA, B.; CABEZA, L.F. (2010). *State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1 — Concepts, materials and modelization*, pp 31–55. Web: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.035>
- [58] KELLY, B.D. (2010). *Advanced Thermal Storage for Central Receivers with Supercritical Coolants. Golden, CO (UnitedStates)*. DOI: 10.2172/981926.
- [59] GIL, A.; GRANGE, B.; PEREZ, V.G.; TETREAUULT-FRIEND, M.; CODD, D.S.; CALVET, N.; SLOCUM, A.S. (2017). *CSPonD demonstrative project: start-up process of a 25kW prototype*.

AIP Conference Proceedings. AIP PUBLISHING LLC, pp 110003. Web: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4984477>

[60] KRUGER, M.; HAUNSTETTER, J.; ZUNFT, S. (2018, 08 Noviembre). Concentrated solar tower power plant using slag as inventory material for a thermal energy storage (TES). *AIP Conference Proceedings*. AIP PUBLISHING LLC. Web: <https://doi.org/10.1063/1.5067112>

[61] Koll, G. (2009, Septiembre). *The solar tower Jülich – a research and demonstration plant for central receiver systems*. 15th Solar Paces Conference in Berlin, Germany.

[62] NREL - The National Renewable Energy Laboratory. U.S. Department of Energy. Web: <https://solarpaces.nrel.gov/julich-solar-tower>

[63] (2019, 19–20 Junio). *Slag as heat storage material for concentrated solar power plants (CSP) using air as heat transfer fluid (HTF)*. [Turning waste from steel industry into valuable low cost feedstock for energy intensive industry]. RESLAG Workshop 2019, Rabat, Morocco.

[64] ORTEGA, I.; CALVET, N.; GIL, A.; RODRÍGUEZ, J.; FAIK, A.; D`AGUANNO, B. (2015). *Thermophysical characterization of a by-product from the steel industry to be used as a sustainable and low-cost thermal energy storage material*. SCIENCE DIRECT. Web: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544215007823?via%3Dihub>

[65] SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT. (2014). *Inserto de un quemador para un horno de arco eléctrico*. PATENTADOS. Web: <https://patentados.com/2014/inserto-de-quemador-para-un-horno>

[66] MADIAS, J. (2014, Diciembre). *Electric Furnace Steelmaking*. RESEARCH GATE. Web: <https://www.researchgate.net/publication/285175113>

[67] A, FORESTI Y D, ARCHETTI. (2017). *Electric steelmaking with orc heat recovery in europe and beyond*. Web: <https://www.tasio-h2020.eu/wp-content/uploads/2018/02/Electric-Steelmaking-with-ORC-Heat-Recovery-in-Europe-and-beyond.pdf>

[68] TURBODEN. (2016). *TURBODEN H REII Heat Recovery in Energy Intensive Industries 2016*. Web: https://web.archive.org/web/20161021195434/http://www.hreii.eu/demo/public/Layman_report_MR.pdf

[69] I.D.A.E. y ATECYR. (2010, Junio). Guía Técnica. Diseño de Centrales de Calor Eficientes. Web: https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_11_Guia_tecnica_d_e_diseno_de_centrales_de_calor_eficientes_e53f312e.pdf

[70] BOE, BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO. (2018, Abril). Resolución de 22 de marzo de 2018, de la Dirección General de Política Energética y Minas, por la que se publica la tarifa de último recurso de gas natural. Web: <https://boe.es/boe/dias/2018/03/31/pdfs/BOE-A-2018-4437.pdf>

[71] G, BONVICINI. (2014). *Waste Heat Recovery for Power Valorisation with Organic Rankine Cycle Technology in Energy Intensive Industries*. Web: <https://www.tasio-h2020.eu/wp-content/uploads/2018/02/D2.2-Heat-recovery-potentials-in-the-most-demanding-processes.pdf>

[72] JORGE MONTES. (2020). *Gestión de Energía y Mercados*.

[73] EUROSTAT. (2018). Electricity prices for non-household consumers on 2018. Web: https://ec.europa.eu/eurostat/cache/infographs/energy_prices/enprices.html?products=60%2000&consumer=N%20HOUSEHOLD&consoms=4162907&unit=KWH&taxs=X%20TAX,X%20VAT,I%20TAX,N%20ORG%20SUP,NETC,TAX%20FEE%20LEV%20CHRG,VAT,TAX%20RNW,TAX%20CAP,TAX%20ENV,OTH,TAX%20NUC,TAX%20L%20EV%20X%20VAT&nrg_prc=NRG%20SUP,NETC,TAX%20FEE%20LEV%20CHRG,VAT,TAX%20RNW,TAX%20CAP,TAX%20EN%20V,OTH,TAX%20NUC¤cy=EUR&year=2019S2&language=EN&detail=0&component=0&ord%20er=DESC&dumy=0&bar=0

[74] MINISTERIO DE INDUSTRIA, ENERGÍA Y TURISMO DEL GOBIERNO DE ESPAÑA. (2016). *Factores de emisión de CO2 y coeficientes de paso a energía primaria de diferentes fuentes de energía final consumidas en el sector de edificios en España*. Web: https://energia.gob.es/desarrollo/EficienciaEnergetica/RITE/Reconocidos/Reconocidos/Otros%20documentos/Factores_emision_CO2.pdf

[75] TURBODEN. Coste de una turbina ORC. Web: <https://www.turboden.com/products/2463/orc-system>

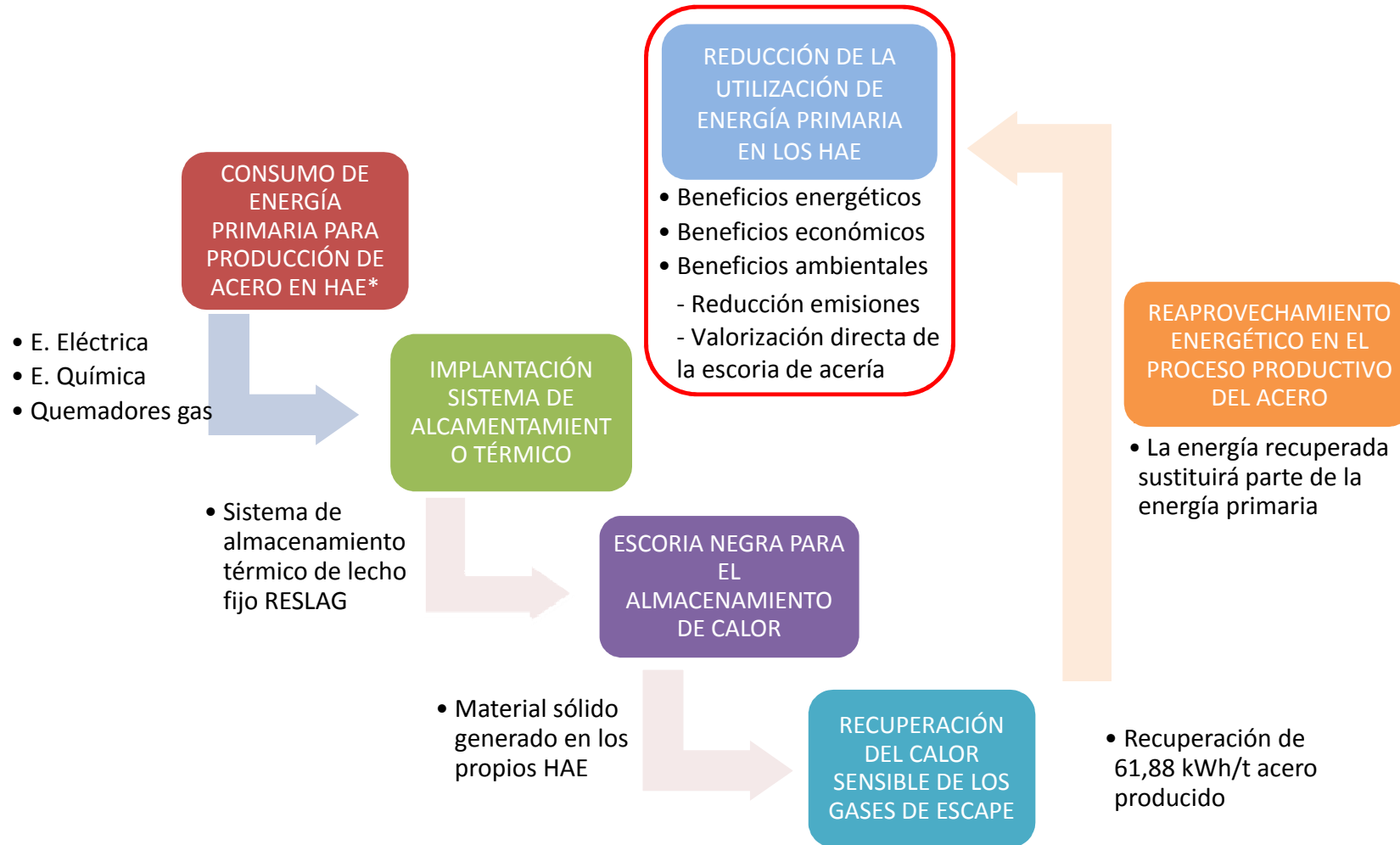
**MÁSTER UNIVERSITARIO EN
INGENIERÍA ENERGÉTICA SOSTENIBLE**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

***ANÁLISIS DE LAS POSIBILIDADES DE
VALORIZACIÓN DE LA ESCORIA NEGRA
DE HORNO DE ARCO ELÉCTRICO EN LA
COMUNIDAD AUTÓNOMA DEL PAÍS
VASCO***

***ANEXO 1. ESQUEMA DE LA METODOLOGÍA DE
CÁLCULO***

ESQUEMA DE LA METODOLOGÍA DE CÁLCULO



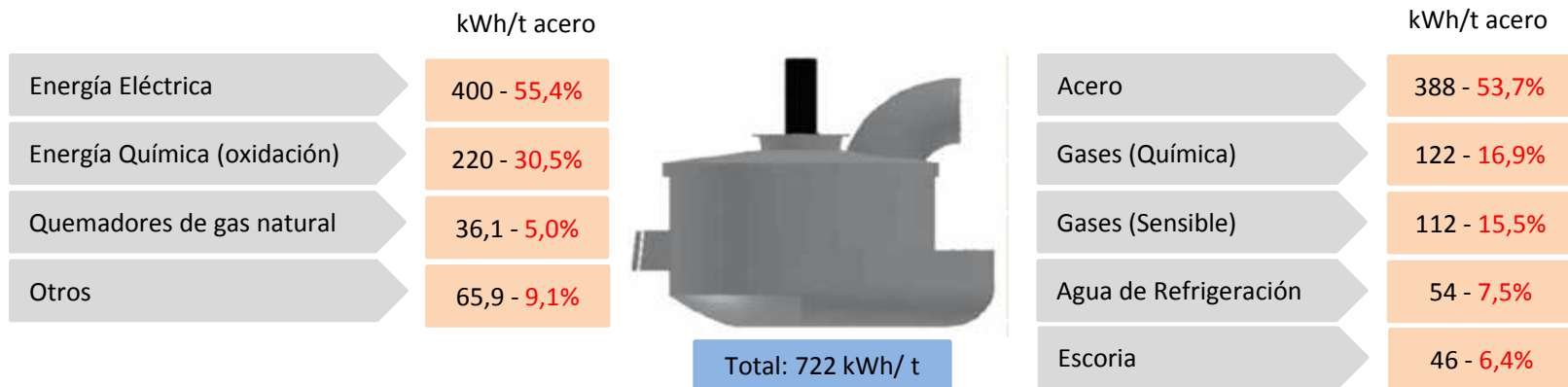
**MÁSTER UNIVERSITARIO EN
INGENIERÍA ENERGÉTICA SOSTENIBLE**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

***ANÁLISIS DE LAS POSIBILIDADES DE
VALORIZACIÓN DE LA ESCORIA NEGRA
DE HORNO DE ARCO ELÉCTRICO EN LA
COMUNIDAD AUTÓNOMA DEL PAÍS
VASCO***

***ANEXO 2. BALANCE ENERGÉTICO DEL HORNO DE
ARCO ELÉCTRICO***

BALANCE ENERGÉTICO DEL HORNO DE ARCO ELÉCTRICO



**MÁSTER UNIVERSITARIO EN
INGENIERÍA ENERGÉTICA SOSTENIBLE**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

***ANÁLISIS DE LAS POSIBILIDADES DE
VALORIZACIÓN DE LA ESCORIA NEGRA
DE HORNO DE ARCO ELÉCTRICO EN LA
COMUNIDAD AUTÓNOMA DEL PAÍS
VASCO***

***ANEXO 3. CÁLCULOS ENERGÉTICOS DEL CASO
PRÁCTICO***

CÁLCULO DE LA ENERGÍA RECUPERABLE Y SUS APLICACIONES

DATOS DE PARTIDA		
Fuente	Dato	Valor
RESLAG [5X]	Eficiencia el MAT	85%
RESLAG [5X]	Eficiencia del SAT	65%
RESLAG [5X]	Energía térmica de los gases de escape	112 kWh/t acero producido
Departamento de Medio Ambiente G.V.[19]	Producción de acero CAPV (año 2018)	6.873.600 t

1) Energía recuperada por el Sistema de Almacenamiento Térmico de lecho fijo con escorias de acería. Proyecto RESLAG

Energía Recuperada = Calor sensible de los gases de escape · Eficiencia SAT

$$Energía Recuperada = 112 \frac{kWh}{t \text{ acero}} \cdot 0,65 \cdot 0,85 = 61,88 \frac{kWh}{t \text{ acero}}$$

2) Energía total ahorrada en los HAE de la CAPV en el año 2018 tras implantación de SAT

$$Ahoros energético (2018) = 61,88 \frac{kWh}{t \text{ acero}} \cdot 6.873.600 \frac{t \text{ acero}}{\text{año 2018}} = 425.338.368 \frac{kWh \text{ ahorrados}}{\text{año 2018}}$$

3) Futuro uso de la energía

$$61,88 \frac{kWh \text{ recuperados}}{t \text{ acero}} \begin{cases} \rightarrow 36,1 \frac{kWh \text{ recuperados}}{t \text{ acero}} \text{ para sustitución quemadores de gas} \\ \rightarrow 61,88 \frac{kWh \text{ recuperados}}{t \text{ acero}} - 36,1 \frac{kWh \text{ gas}}{t \text{ acero}} = 25,78 \frac{kWh \text{ recuperados}}{t \text{ acero}} \text{ para sustitución energía eléctrica} \end{cases}$$

CÁLCULO DEL BENEFICIO DE NO NECESIDAD DE QUEMADORES DE GAS

DATOS DE PARTIDA		
Fuente	Dato	Valor
I.D.A.E.[67]	Emisiones CO2 por quema de GN (PCI)	204 g/kWh
I.D.A.E.[67]	PCI Gas Natural	10,83 kWh/m ³
BOE [68]	Precio del kWh de GN	0,0354 €/kWh
Departamento de Medio Ambiente G.V.[19]	Producción de acero CAPV (año 2018)	6.873.600 t

1) Cálculo del gas natural ahorrado tras la implementación del SAT

$$\text{Gas Natural ahorrado} = \frac{36,1 \frac{\text{kWh recuperados}}{\text{t acero}}}{10,83 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3 \text{ gas natural}}} = 3,33 \frac{\text{m}^3 \text{ GN ahorrado}}{\text{t acero}}$$

2) Cálculo del gas natural ahorrado en el año 2018 en los HAE de la CAPV tras la implementación del SAT

$$\text{GN ahorrado HAE CAPV (2018)} = 3,33 \frac{\text{m}^3 \text{ GN ahorrado}}{\text{t acero}} \cdot 6.873.600 \frac{\text{t acero producido}}{\text{año 2018}} = 22.899.088 \frac{\text{m}^3 \text{ GN ahorrado}}{\text{año 2018}}$$

3) Cálculo de la energía térmica asociada al uso gas ahorrada en el año 2018 en los HAE de la CAPV tras la implementación del SAT

$$\text{Energía ahorrada HAE CAPV (2018)} = 22.899.088 \frac{\text{m}^3 \text{ GN ahorrado}}{\text{año 2018}} \cdot 10,83 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3 \text{ gas natural}} = 247.997.123 \frac{\text{kWh ahorrados}}{\text{año 2018}}$$

4) Ahorro económico relativo al ahorro del gas del año 2018 en los HAE de la CAPV

$$\text{Ahorro económico HAE CAPV (2018)} = 247.997.123 \frac{\text{kWh ahorrados}}{\text{año 2018}} \cdot 0,0354 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 8.779.098 \frac{\text{€}}{\text{año 2018}}$$

5) Ahorro ambiental-emisiones del año 2018 en los HAE de la CAPV

$$\text{Ahorro económico HAE CAPV (2018)} = 247.997.123 \frac{\text{kWh ahorrados}}{\text{año 2018}} \cdot 204 \frac{\text{g CO2}}{\text{kWh}} = 5,06 \cdot 10^{10} \frac{\text{g CO2}}{\text{año 2018}} \cdot \frac{1 \text{ t CO2}}{10^6 \text{g CO2}} = 50.591,1 \frac{\text{t CO2}}{\text{año 2018}}$$

CÁLCULO DEL BENEFICIO DE LA GENERACIÓN ELÉCTRICA I

DATOS DE PARTIDA		
Fuente	Dato	Valor
[57]	Eficiencia turbina ORC	0,2
EUROSTAT [70]	Precio del kWh electrico consumos > 150 Gwh	0,08735 €/kWh
Departamento de Medio Ambiente G.V.[19]	Producción de acero CAPV (año 2018)	6.873.600 t
[72]	Nivel de Tensión HAE	30 Kv
[72]	Término de Potencia/Peaje	6.2
[72]	Consumo energético de un HAE	500 GWh/año

1) Cálculo de energía recuperada por la turbina OCR

$$\text{Energía Recuperada OCR} = 25,78 \frac{\text{kWh recuperados}}{\text{t acero producido}} \cdot 0,20 = 5,16 \frac{\text{kWh recuperados}}{\text{t acero producido}}$$

2) Cálculo de energía recuperada por las turbinas OCR en el año 2018 en los HAE de la CAPV

$$\text{Energía Recuperada HAE CAPV (2018)} = 5,16 \frac{\text{kWh recuperados}}{\text{t acero producido}} \cdot 6.873.600 \frac{\text{t acero producido}}{\text{año 2018}} = 35.467.776 \frac{\text{kWh recuperados}}{\text{año 2018}}$$

3) Cálculo del precio del termino fijo para un horno de arco eléctrico

Nivel de tensión	Peaje
>= 1 kV y < 30 kV	6.1A
>= 30 kV y < 72,5 kV	6.2
>= 72,5 kV y < 145 kV	6.3
>= 145 kV	6.4
Conexiones internacionales	6.5

2. Peajes de alta tensión de 6 periodos tarifarios (6.):

Términos de potencia

€/KW y año

Peaje	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5	Periodo 6
6.1	39,139427	19,586654	14,334178	14,334178	14,334178	6,540177
6.2	22,158348	11,088763	8,115134	8,115134	8,115134	3,702649
6.3	18,916198	9,466286	6,927750	6,927750	6,927750	3,160887
6.4	13,706285	6,859077	5,019707	5,019707	5,019707	2,290315
6.5	13,706285	6,859077	5,019707	5,019707	5,019707	2,290315

	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Potencia fija contratada (kW)	60000	60000	60000	60000	60000	60000
Término de potencia [€/kW año]	22,158348	11,088763	8,115143	8,115134	8,115134	3,702649
Coste término fijo (€/año)	1329500,88	665325,78	486906,858	486908,04	486908,04	222158,94
Total (€/año)	3.677.708,54 €					

CÁLCULO DEL BENEFICIO DE LA GENERACIÓN ELÉCTRICA II

DATOS DE PARTIDA		
Fuente	Dato	Valor
[57]	Eficiencia turbina ORC	0,2
EUROSTAT [70]	Precio del kWh electrico consumos > 150 Gwh	0,08735 €/kWh
Departamento de Medio Ambiente G.V.[19]	Producción de acero CAPV (año 2018)	6.873.600 t
[72]	Nivel de Tensión HAE	30 Kv
[72]	Término de Potencia/Peaje	6.2
[72]	Consumo energético de un HAE	500 GWh/año

4) Cálculo del precio del término variable para un horno de arco eléctrico

$$\text{Precio del término variable de la electricidad para un HAE} = 500 \frac{\text{GWh consumidos}}{\text{año 2018}} \cdot 87,35 \frac{\text{€}}{\text{GWh}} = 43.000.000 \frac{\text{€}}{\text{año 2018}}$$

5) Ahorro económico del termino variable para los HAE de la CAPV en 2018

$$\text{Ahorro económico HAE CAPV (2018)} = 35.467.776 \frac{\text{kWh ahorrados}}{\text{año 2018}} \cdot 0,08735 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 3.098.110 \frac{\text{€}}{\text{año 2018}}$$

6) Ahorro ambiental-emisiones del año 2018 en los HAE de la CAPV

$$\text{Ahorro económico HAE CAPV (2018)} = 35.467.776 \frac{\text{kWh recuperados}}{\text{año 2018}} \cdot 0,291 \frac{\text{kg CO2}}{\text{kWh}} = 1,032 \cdot 10^7 \frac{\text{kg CO2}}{\text{año 2018}} \cdot \frac{1 \text{ t CO2}}{10^3 \text{kg CO2}} = 10.321,12 \frac{\text{t CO2}}{\text{año 2018}}$$

CÁLCULO DEL BENEFICIO DE LA VALORIZACIÓN DE LA ESCORIA I

1) Dimensionamiento de los SAT para los HAE de la CAPV

Acerías	Localización	Nº de hornos	Capacidad del horno* (t)	Calor generado por los gases escape (kWh/colada)	Energía Térmica recuperable (kWh/colada)	Volumen del SAT (m3/tanque)
ArcelorMital Sestao	Sestao	2	100	11200	7280	24,47
				11200	7280	24,47
Sidenor	Basauri	1	100	11200	7280	24,47
Acería Valvueda	Loiu	1	60	6720	4368	14,68
Productos Tubulares	Trapaga	1	60	6720	4368	14,68
Corrugados Azpeitia	Azpeitia	1	60	6720	4368	14,68
ArcelorMital Olaberria	Olaberria	1	60	6720	4368	14,68
ArcelorMittal Gipuzkoa	Zumarraga	1	60	6720	4368	14,68
Acelava	Amurrio	1	60	6720	4368	14,68

* Excepto las capacidades de los HAE de Arcelor y Sidenor, que han sido confirmados, el resto de capacidades son orientativas

Eficiencia de la escoria como MAT	0,85
Eficiencia del sistema SAT	0,65
Energía térmica de los gases de escape (kWh/t acero)	112
Volumen del SAT de Arcelor (m3)	3
Capacidad máxima del SAT de Arcelor (kWh/t acero)	1.050
Energía térmica recuperable SAT de Arcelor (kWh/t acero)	893

CÁLCULO DEL BENEFICIO DE LA VALORIZACIÓN DE LA ESCORIA II

2) Cantidad de escoria posiblemente valorizada como material de almacenamiento térmico

Acerías	Volumen del SAT (m3/tanque)	Volumen de escoria (m3/tanque)	Cantidad de escoria (t/tanque)	Cantidad total de escoria valorizada en la CAPV* (t)
ArcelorMital Sestao	24,47	15,42	52,88	697,93
	24,47	15,42	52,88	
Sidenor	24,47	15,42	52,88	
Acería Valvueda	14,68	9,25	31,72	
Productos Tubulares	14,68	9,25	31,72	
Corrugados Azpeitia	14,68	9,25	31,72	
ArcelorMital Olaberria	14,68	9,25	31,72	
ArcelorMittal Gipuzkoa	14,68	9,25	31,72	
Acelava	14,68	9,25	31,72	

* Si se impantasen SAT de doble tanque en los HAE de la CAPV, atendiendo a los datos productivos de 2018

Volumen de huecos en SAT	0,37
Densidad Escoria (kg/m3)	3430

3) Porcentaje de escoria valorizada en el sector de la energía sobre la escoria generada o vertida en la CAPV (año 2018)

$$\text{Escoria valorizada sobre la cantidad generada en CAPV (2018)} = \frac{697,93t \text{ escoria valorizada}}{370.189 t \text{ escoria generada}} \cdot 100 = 0,19\%$$

$$\text{Escoria valorizada sobre la cantidad depositada en vertederos de la CAPV (2018)} = \frac{697,93t \text{ escoria valorizada}}{136.968t \text{ escoria vertida}} \cdot 100 = 0,51\%$$