

## MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

# TRABAJO FIN DE MÁSTER

## ***SUMINISTRO DE ENERGÍA EN UNA FÁBRICA DE NEUMÁTICOS MEDIANTE COGENERACIÓN***

**Alumno** *García Barcos, Alexander*  
**Director** *de la Peña Aranguren, Víctor Francisco*  
**Departamento** *Máquinas y motores térmicos*  
**Curso académico** *2018-2019*

*Bilbao, 27 de Mayo de 2019*



## Datos básicos del trabajo

- Estudiante: Alexander Garcia Barcos
- Director del trabajo: Víctor Francisco de la Peña Aranguren
- Resumen: Dimensionamiento de una planta de cogeneración destinada a generar energía eléctrica y térmica a una fábrica de neumáticos. Descripción del proceso de fabricación de neumáticos. Estudio de las diferentes alternativas de mejora de la eficiencia energética. Estudio económico de la inversión inicial, beneficio anual obtenido, tiempo de recuperación y análisis de rentabilidad. Planificación del proyecto.
- Palabras Clave: Cogeneración, dimensionamiento, neumáticos, energía.
- Laburpena: Kogenerazio planta baten dimentsionamendua, pneumatiko fabrika batean energia elektrikoa eta termikoa sortzeko. Pneumatikoak sortzeko prozesuaren azalpena. Energia-eraginkortasuna hobetzeko alternatiba desberdinen azterketa. Hasierako inbertsioaren azterketa ekonomikoa, lortutako urteko prestazioa, berreskurapen denbora eta errentagarritasunaren analisisa. Proiektuaren planifikazioa.
- Hitz garrantzitsuak: Kogenerazioa, dimentsionamendua, pneumatikoak, energia.
- Abstract: Sizing of a cogeneration plant for the generation of electric and thermal energy for a tire Factory. Description of the tire manufacturing process. Study of the different alternatives of energetic efficiency improvement. Economic study of the initial investment, annual benefit obtained recovery time and analysis of rentability. Project planning.
- Keywords: Cogeneration, sizing, tires, energy.



## Índice

1 – Introducción.....	6
2 – Objetivo .....	7
3 – Descripción del proceso .....	8
3.1 – Estructura del neumático .....	8
3.2 – Proceso de fabricación .....	9
4 – Alternativas de mejora energética .....	14
4.1 – Cogeneración .....	14
4.2 – Biomasa .....	16
4.3 – Solar térmica.....	19
4.4 – Solar fotovoltaica.....	22
4.5 – Geotermia.....	23
5 – Alternativa seleccionada.....	26
6 – Dimensionamiento de la planta de cogeneración .....	28
6.1 – Datos de partida.....	28
6.2 – Datos de diseño.....	29
6.3 – Esquema completo de la planta de cogeneración .....	30
6.4 – Cálculo de los caudales de vapor que circulan por la planta .....	30
6.5 – Dimensionamiento de la planta de cogeneración con motor alterno de combustión interna .....	32
6.6 – Dimensionamiento de la planta de cogeneración con turbina de gas.....	35
6.7 – Selección de la turbina de gas.....	37
6.8 – Calculo del rendimiento eléctrico equivalente.....	39
6.9 – Dimensionamiento de la bomba de agua de alimentación.....	40
6.10 – Cálculo del combustible a utilizar en la caldera convencional de gas natural.....	41
7 – Descripción de la planta de cogeneración .....	43
7.1 – Turbina de gas.....	45
7.2 – Caldera de recuperación.....	47
7.3 – Molde de cocción .....	51
7.4 – Desgasificador .....	52
7.5 – Bomba de agua de alimentación.....	54



8 – Estudio económico .....	56
8.1 – Inversión inicial .....	56
8.2 – Beneficio anual .....	57
8.3 – Tiempo de retorno simple .....	59
8.4 – Valor actual neto .....	60
8.5 – Tasa interna de rendimiento .....	60
8.6 – Análisis de sensibilidad .....	61
9 – Planificación del proyecto .....	64
9.1 – Paquetes de trabajo .....	64
9.2 – Diagrama de Gantt .....	66
10 – Conclusiones y recomendaciones .....	68
11 – Bibliografía .....	70
Anexos .....	72
Anexo 1 – Dimensionamiento de la planta de cogeneración con Engineering Equation Solver (EES) .....	72
Anexo 2 – Diagrama de Gantt realizado con Microsoft Project .....	76





## Índice de Ilustraciones

Ilustración 1. Estructura del neumático .....	8
Ilustración 2. Mezclado de goma .....	10
Ilustración 3. Trenzado de hilos.....	10
Ilustración 4. Forro interno, capa de carcasa, área de talón inferior y talones.....	11
Ilustración 5. Recubrimiento de talones, flancos, acercado de bordes del tambor y capa de cubierta.....	12
Ilustración 6. Capa de tapa y banda de rodadura .....	12
Ilustración 7. Cocción del neumático y vulcanización .....	13
Ilustración 8. Esquema de cogeneración con MACI .....	15
Ilustración 9. Esquema de cogeneración con TG.....	15
Ilustración 10. Esquema de generación mediante biomasa.....	18
Ilustración 11. Esquema de una instalación de energía solar térmica .....	21
Ilustración 12. Esquema de un sistema de energía solar fotovoltaica .....	22
Ilustración 13. Datos de partida y de diseño de la planta de cogeneración.....	30
Ilustración 14. Esquema de balances sobre el desgasificador .....	31
Ilustración 15. Esquema con MACI para el dimensionamiento .....	33
Ilustración 16. Esquema para el dimensionamiento de la planta con TG.....	35
Ilustración 17. Turbina de gas Siemens SGT-400.....	37
Ilustración 18. Esquema de la planta de cogeneración.....	44
Ilustración 19. Partes que componen una turbina de gas .....	45
Ilustración 20. Flujos de energía en una turbina de gas .....	46
Ilustración 21. Diagrama de temperaturas en una caldera de recuperación.....	48
Ilustración 22. Caldera de recuperación para cogeneración .....	50
Ilustración 23. Entrada del vapor al molde de cocción .....	52
Ilustración 24. Estructura de un desgasificador.....	53
Ilustración 25. Estructura de una bomba de agua de alimentación.....	54
Ilustración 26. Diagrama de Gantt.....	67

## Índice de tablas

Tabla 1. Inversión inicial.....	56
Tabla 2. Análisis de sensibilidad respecto a la inversión .....	62
Tabla 3. Análisis de sensibilidad respecto del precio del gas natural.....	62



## 1 – Introducción

Este documento tiene como objetivo principal el dimensionamiento de una planta de mejora energética como suministro de energía de una fábrica de neumáticos.

Se comienza describiendo el proceso de fabricación de los neumáticos desde los materiales básicos hasta la obtención del neumático final. Se comentan cuáles son los equipos involucrados en la producción de los neumáticos y cuáles son las necesidades de consumo energético de la fábrica.

Se realiza un estudio de cuáles son las diferentes alternativas de mejora energética para la fábrica de neumáticos indicando además de las características de cada alternativa, sus ventajas e inconvenientes. Tras esto, se exponen los motivos por los cuales se decide seleccionar una de las alternativas y por qué se desechan las demás.

Una vez seleccionada la alternativa de mejora energética, se procede a describir por un lado la planta de generación de energía en su conjunto, y por otro, se describen los equipos principales que conforman la planta.

Tras partir de unos requisitos energéticos establecidos por la fábrica de neumáticos, se lleva a cabo el dimensionamiento de los equipos principales que toman parte de la planta y se seleccionan aquellos que estén disponibles en el mercado.

Se realiza un estudio económico para conocer la inversión inicial a realizar, el beneficio anual que se puede obtener, el periodo de recuperación de la inversión y el estudio de la rentabilidad del proyecto. Así mismo, se realiza un análisis de sensibilidad para conocer cómo afecta la variación de algún parámetro concreto a la rentabilidad del proyecto.

La planificación del proyecto es programa desde una fecha inicial preestablecida y, conociendo los paquetes de trabajo que conforman el proyecto, se establece una fecha de finalización del mismo.

Para concluir con el documento, se indican las conclusiones obtenidas durante la realización del mismo y se exponen varias recomendaciones.



## 2 – Objetivo

Durante la producción de neumáticos se consume no solo una gran cantidad de electricidad, sino también una gran cantidad de vapor necesario para la cocción del neumático. Esto supone que la fábrica obtenga estas dos formas de energía de dos fuentes distintas. Por un lado, se tendrá contratada la potencia eléctrica consumida por la planta con una empresa suministradora de electricidad, lo que le supondrá un alto coste. Por otro lado, la fábrica dispondrá de una caldera convencional de gas natural para la generación del vapor requerido en el proceso de fabricación.

Esto supone que no se dispone de un sistema de mejora de la eficiencia energética. Con la implantación de la cogeneración en la fábrica, se consigue generar la energía térmica en forma de vapor necesario para ser alimentado a la fábrica, y además generar energía eléctrica para ser consumida por la propia fábrica y para ser vendida en caso de que se genere más de lo necesario.

La generación de la energía eléctrica tiene un doble beneficio. Por un lado se reducen los gastos de tener contratada la potencia eléctrica con la empresa suministradora de electricidad, y por otro se consigue obtener un beneficio económico con la venta de aquella electricidad generada y que supone un exceso respecto de los requerimientos de la propia fábrica de neumáticos.

La mejora de la eficiencia energética que es posible implantar en la fábrica es mayúscula ya que la cogeneración presenta en la actualidad el mayor rendimiento global de aprovechamiento energético considerando tanto la energía eléctrica generada como la térmica.

Esta mejora energética que supone la implantación de la cogeneración acaba suponiendo un aumento de los beneficios económicos al ser capaz de generar con un mayor rendimiento, a pesar de la alta inversión que supone una planta de estas características.

## 3 – Descripción del proceso

El proceso de fabricación de un neumático engloba el conjunto de actividades destinadas a obtener los diferentes materiales que componen el neumático, el ensamblado de cada una de las capas que lo forman y la cocción que le otorgará las características finales.

Antes de describir el proceso de fabricación del neumático, se va a explicar cuál es la estructura del mismo con objeto de poder comprender posteriormente las diferentes etapas del proceso.

### 3.1 – Estructura del neumático

En la actualidad, un neumático radial está compuesto de las siguientes capas:

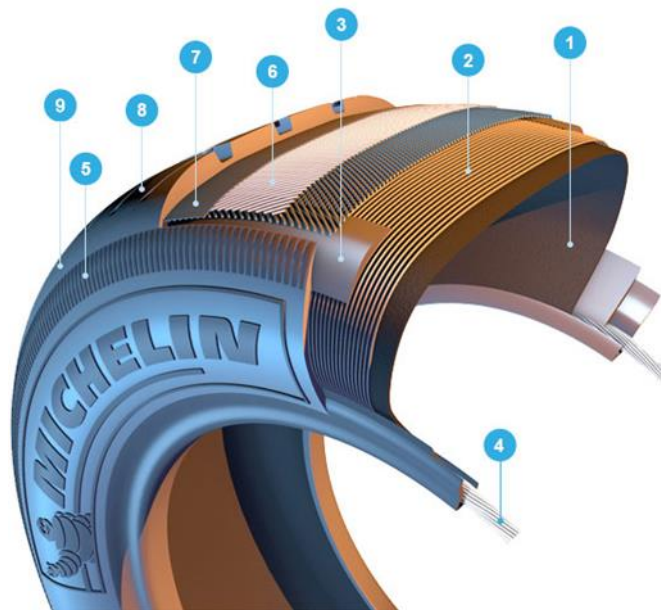


Ilustración 1. Estructura del neumático<sup>1</sup>

1. Forro interno: Capa hermética de goma sintética (caucho sintético derivado del petróleo) que actúa como el tubo interno de los neumáticos convencionales y contiene el aire que mantendrá el neumático inflado.
2. Capa de carcasa: Capa situada sobre el forro interno y que está hecha de fibra textil y goma. Está formada por cerca de 1400 cables que determinan la resistencia del neumático y ayudan a soportar la presión ya que cada cable puede resistir hasta 15 kg.

<sup>1</sup> Ilustración tomada de la estructura de un neumático Michelin



3. Área de talón inferior y bandas de goma: Zona en la cual la goma del neumático se adhiere al aro de metal junto con unas bandas de goma situadas en la parte opuesta del flanco.
4. Talones: Cables situados en ambas zonas laterales de los neumáticos capaces de resistir una carga de 1800 kg sin comprometer la estructura del neumático.
5. Flanco: Protección de los costados del neumático ante impactos que se puedan dar con el exterior. En él se sitúa gran cantidad de información del neumático como anchura de los mismos o el índice de velocidad.
6. Capa de la cubierta: Trenzado formado por hilos de acero muy finos junto con goma. Le aporta resistencia al neumático así como la capacidad de resistir tensiones en los giros y evitar que se expanda debido a rotaciones. Además aporta flexibilidad ante obstáculos de la carretera.
7. Capa de tapa: Capa de seguridad que reduce la fricción causada por el calor y ayuda a mantener la forma del neumático. Está compuesta por cables reforzados a base de nailon, incrustados en una capa de goma que evitan su estiramiento.
8. Pliegues de corona: Se trata de una base rígida para soportar la banda de rodamiento.
9. Banda de rodamiento: Capa diseñada para resistir el desgaste, la abrasión y el calor que se produce entre el neumático y el asfalto.

### 3.2 – *Proceso de fabricación*

#### **Preparación de los semiterminados**

Los productos semiterminados que componen un neumático se pueden diferenciar entre las diferentes capas de goma y los hilos y cables metálicos que se van adheridos a cada una de las chapas.

La obtención de las gomas sintéticas comienza con el denominado blocaje que consiste en mezclar materias primas obtenidas de diferentes proveedores con el objetivo de homogeneizarlos. Tras esto, se lleva a cabo la plastificación mediante la cual se añaden agentes plastificantes a 165°C para ablandar la mezcla y facilitar el mezclado posterior. EL mezclado consiste en mezclar los cauchos con cargas y agentes de protección a una temperatura de 170°C. El proceso de mezclado concluye con un enfriamiento a 100°C y la adición de azufre que, posteriormente, producirá la vulcanización durante la cocción del neumático. Finalmente se lleva a cabo un laminado mediante el cual se obtiene una banda continua a partir de la mezcla generada y se ajusta al tamaño de cada componente que forma el neumático.



Ilustración 2. Mezclado de goma<sup>2</sup>

Para la obtención de los cables metálicos se comienza con el decalaminado, que consiste en someter a los alambres de acero a flexión con el objetivo de quitar el óxido de hierro que pueda haber acumulado. Después se lleva a cabo una laminación mediante la cual se hace pasar dichos alambres por rodillos lubricados para obtener unos hilos. Tras ello, se procede a desengrasar dichos hilos con lejía de carbonato con el objetivo de quitar el aceite que contengan. Se continúa con un recocido que consiste en un tratamiento térmico a 970°C en una atmósfera inerte seguido de un enfriamiento, secado y enrollado en bobinas. Se aporta al material un revestimiento superficial en forma de tratamiento químico con ácido sulfúrico seguido de un baño electrolítico de zinc y se termina con un latonado con cobre en un horno. Se lleva a cabo un trefilado de los hilos para reducir su diámetro y se concluye con un trenzado de los mismos para la obtención de los cables.

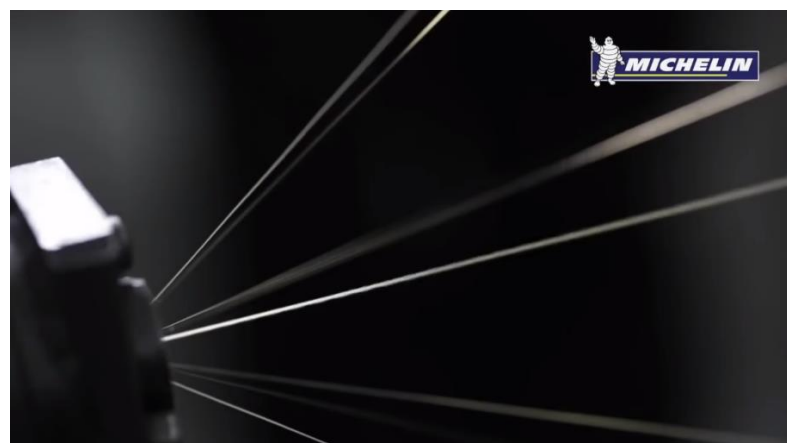


Ilustración 3. Trenzado de hilos<sup>3</sup>

<sup>2</sup> Ilustración tomada del proceso de fabricación de neumáticos de Michelin

<sup>3</sup> Ilustración tomada del proceso de fabricación de neumáticos de Michelin



La elaboración de los productos semiterminados concluye con un calandrado mediante el cual se presan cables de acero entre dos capas de goma en función de la capa que se vaya a obtener.

## Ensamblado de los semiterminados

Una vez obtenidos los diferentes productos semiterminados, se comienza la etapa de construcción del neumático de dentro hacia fuera, es decir, se comienza colocando las capas interiores del neumático y sobre ellas las exteriores. La construcción se lleva a cabo sobre un tambor giratorio sobre el cual se van adhiriendo las diferentes capas.

Se comienza aplicando sobre el tambor una lámina de goma sintética que es el forro interno. Sobre el forro interno se aplica una lámina de tejido de cables textiles que es la capa de carcasa. Una vez colocada la capa de carcasa, se añaden sobre él las áreas de talón inferior que constan de dos bandas de gomas perfiladas sobre las cuales se montarán posteriormente los talones. El siguiente paso en la construcción del neumático, es la colocación de dos aros metálicos inextensibles que son los talones.

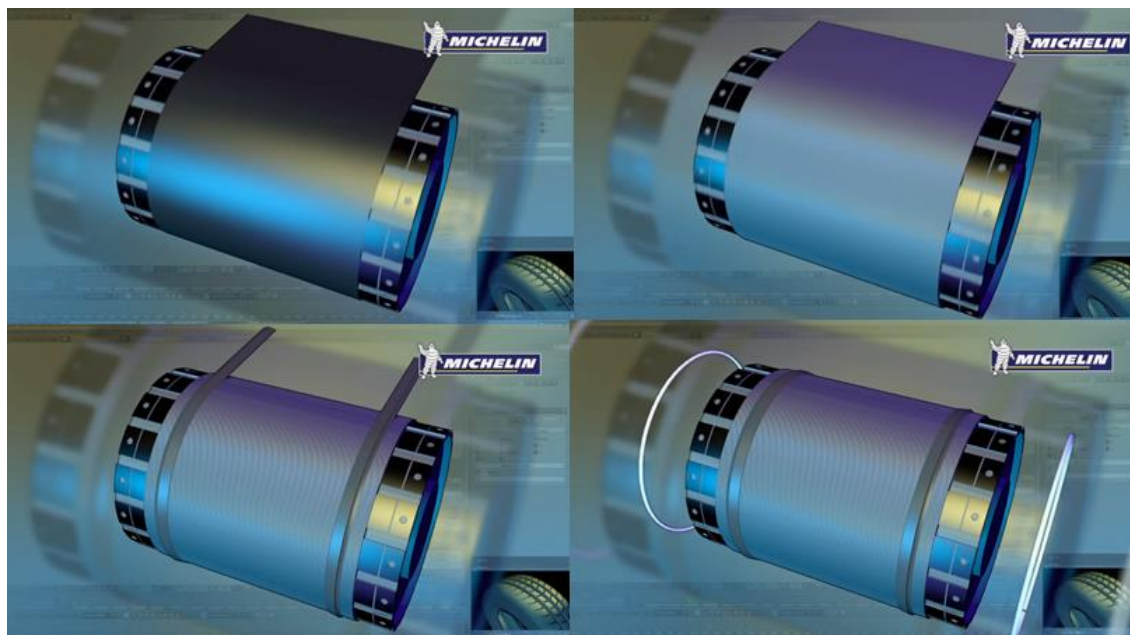


Ilustración 4. Forro interno, capa de carcasa, área de talón inferior y talones<sup>4</sup>

En este momento del proceso es cuando la capa de carcasa se dobla en sus extremos y recubre los talones. Las siguientes partes en añadirse al neumático son un par de bandas de goma y los flancos. Una vez colocados todos estos elementos, los bordes del tambor se aproximan y se infla con aire en la zona

<sup>4</sup> Ilustración tomada del proceso de fabricación de neumáticos de Michelin

central dando forma al neumático. Una vez se ha dado forma al neumático, se le añade capa de cubierta.

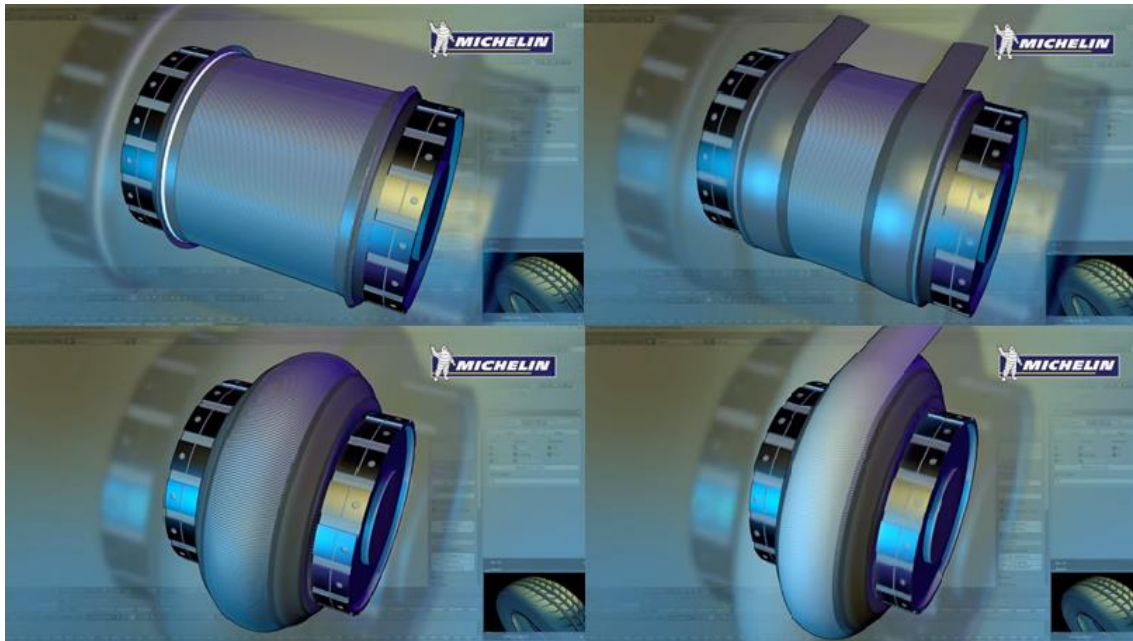


Ilustración 5. Recubrimiento de talones, flancos, acercado de bordes del tambor y capa de cubierta<sup>5</sup>

Para terminar con el proceso de construcción del neumático, se añaden las capas más externas del neumático, la capa de tapa y la banda de rodadura.



Ilustración 6. Capa de tapa y banda de rodadura

De esta forma concluye el ensamblado de los productos semiterminados en el tambor giratorio de construcción.

<sup>5</sup> Ilustración tomada del proceso de fabricación de neumáticos de Michelin



## Cocción

Una vez terminada la fase de ensamblado, el neumático se desprende del tambor. El neumático en crudo se introduce en el molde de cocción que contiene el perfil que tendrá el neumático final. Se introduce mediante una membrana agua caliente a presión que empuja al neumático aún maleable hasta el fondo del molde donde gracias al calor del agua comienza la cocción. El aumento de la temperatura produce la vulcanización donde el azufre introducido durante la elaboración de los productos semiterminados forma uniones entre las cadenas de polímeros. De esta forma el neumático pasa del estado plástico al estado elástico.

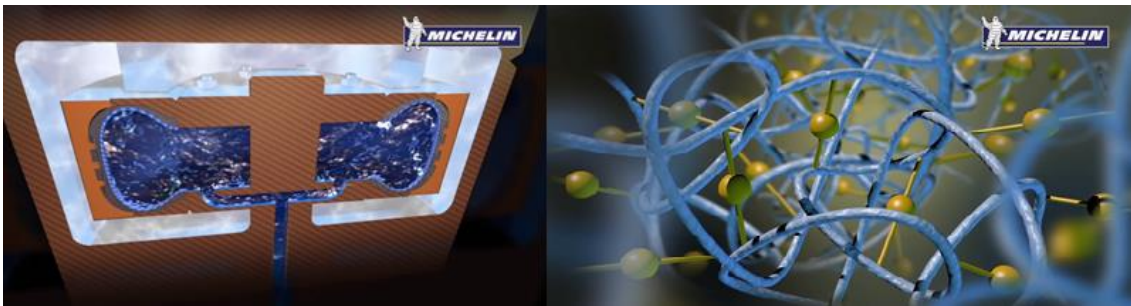


Ilustración 7. Cocción del neumático y vulcanización<sup>6</sup>

Una vez extraído del molde, el neumático adquiere sus propiedades definitivas y se da por concluido el proceso de fabricación. Ya solo quedará por llevar a cabo los correspondientes procesos de inspección de calidad, transporte, etc.

Se puede comprobar como en la fabricación de neumáticos no solo se requiere de energía eléctrica para la elaboración de los productos semiterminados y el ensamblado de los mismos, sino también de una gran cantidad de energía térmica en forma de vapor necesaria para poder llevar a cabo la cocción del neumático. La forma más convencional de obtener dicha energía es tomando electricidad de la red eléctrica bajo el contrato con una empresa suministradora, y generando el vapor mediante una caldera convencional que funcione mediante un combustible tradicional del que se pueda disponer con regularidad, a un precio relativamente barato y que, dentro de lo razonable, sea lo más respetuoso posible con el medio ambiente, como puede ser el gas natural.

---

<sup>6</sup> Ilustración tomada del proceso de fabricación de neumáticos de Michelin



## 4 – Alternativas de mejora energética

Tal y como se ha comentado anteriormente, el proceso de fabricación de neumáticos requiere no solo de la energía eléctrica consumida por los equipos encargados de llevar a cabo el mezclado, laminado, trefilado, trenzado, etc. de los productos semiterminados y de la maquinaria encargada de ensamblar el neumático crudo, sino que también se requiere una gran cantidad de energía térmica en forma de vapor para llevar a cabo la cocción del neumático.

Lo más habitual es que una fábrica de neumáticos que no dispone de un sistema de mejora energética, tenga contratado el consumo de electricidad con una compañía eléctrica que le suministra dicha energía para la producción sin que la empresa fabricante de los neumáticos genere ella misma dicha energía. Respecto a la energía térmica en forma de vapor requerida, dicha empresa de fabricación de neumáticos que no dispone de un sistema de mejora energética tendrá, por lo general, una caldera convencional para generar vapor utilizando un combustible del que pueda disponer de forma continua, a un precio razonable y que tenga el menor impacto posible sobre el medio ambiente. El combustible que mejor cuadra con estas características es el gas natural.

En este apartado se proponen varias alternativas de mejora energética con el objetivo principal de aumentar el rendimiento energético, reducir la dependencia y aumentar los beneficios.

### 4.1 – Cogeneración

La cogeneración es la producción conjunta de la energía eléctrica y térmica necesaria para el proceso de producción de neumáticos utilizando un único combustible.

La cogeneración se lleva a cabo utilizando gas natural como combustible en un motor de combustión interna o en una turbina de gas. La energía mecánica de rotación producida en uno de estos equipos se convierte en energía eléctrica mediante un alternador y es consumida por la maquinaria presente en la fábrica. En caso de que la energía eléctrica generada no sea suficiente para abastecer la demanda eléctrica del proceso productivo y de los demás consumos de la planta, se procede a obtener el resto de la electricidad de la red eléctrica. En cambio, si la energía eléctrica producida es mayor que la requerida en el proceso, se puede vender la electricidad sobrante a la red y obtener ingresos a la vez que un autoabastecimiento.

Los gases de escape producidos en el motor alterno de combustión interna o de la turbina de gas, son conducidos hasta una caldera de recuperación donde se produce el vapor en las condiciones requeridas por el proceso de fabricación de neumáticos. Una vez el vapor ha cumplido su función, es de nuevo alimentado a la caldera para reiniciar el ciclo. Finalmente los gases de escape son emitidos al

ambiente una vez han salido de la caldera de recuperación y han cumplido su misión de generar vapor.

De forma esquemática, un sistema de cogeneración con motor alternativo de combustión interna se representa de forma siguiente:

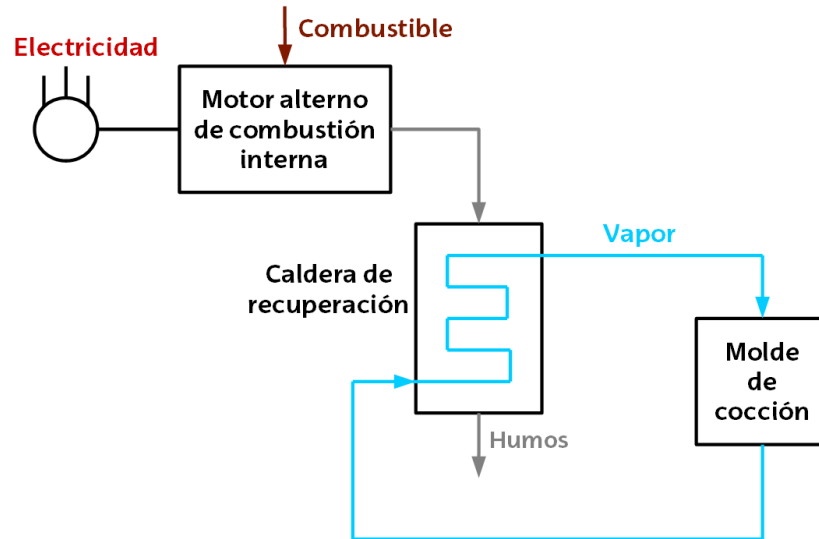


Ilustración 8. Esquema de cogeneración con MACI

De igual manera, un sistema de cogeneración con turbina de gas sigue el siguiente esquema:

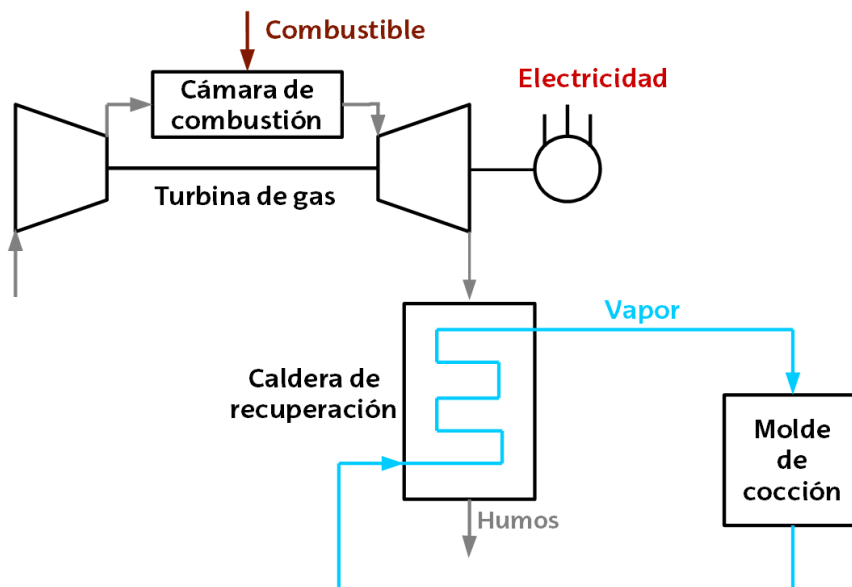


Ilustración 9. Esquema de cogeneración con TG



A continuación se comentan cuales son las ventajas e inconvenientes que presentan los sistemas de cogeneración para la producción de neumáticos.

Ventajas de la cogeneración:

- Autoabastecimiento de energía eléctrica y térmica reduciendo la dependencia respecto de la empresa comercializadora de la electricidad
- Posibilidad de obtener un beneficio económico con la energía eléctrica sobrante
- Aumento del rendimiento energético global y, por tanto, ahorro energético
- Posibilidad de disponer de un suministro fiable de combustible (gas natural) y a un precio relativamente bajo
- Capacidad para implantarse ante demandas energéticas tanto bajas como altas
- Disminución de pérdidas en el transporte eléctrico al consumirse la electricidad en la misma planta donde se genera

Inconvenientes de la cogeneración:

- Inversión inicial elevada por el alto coste del motor alterno de combustión interna y sobre todo de la turbina de gas
- Aumento del gasto de mano de obra para atender la instalación de cogeneración
- Aumento del gasto en mantenimiento de la fábrica y de materiales fungibles
- Inestabilidad legislativa a la hora de regular la cogeneración que puede hacer variar las estimaciones de rentabilidad de la instalación en el futuro

## 4.2 – Biomasa

La biomasa es la materia orgánica de origen vegetal, animal o que es generada en cualquier proceso de transformación tanto de forma natural como artificial. Entre los tipos de biomasa que se pueden considerar están: residuos forestales, purines, astillas de madera, residuos sólidos urbanos, etc.

El aprovechamiento energético de la biomasa se lleva a cabo mediante la combustión de la misma con el objetivo de calentar un fluido como es el agua que circula por un ciclo Rankine para la generación de energía eléctrica. El vapor generado en la caldera se hace pasar por una turbina de vapor cuyo movimiento es seguido por un reductor de velocidades y posteriormente por un alternador encargado de transformar la energía mecánica de rotación producida por la turbina en energía eléctrica.

Tras pasar por la turbina, el vapor es llevado a un condensador donde se enfría gracias a un caudal de agua de refrigeración tomado del exterior. Más tarde, se hace pasar esta agua por un desgasificador encargado de evacuar de la



instalación el posible aire que haya podido introducirse en el ciclo y que puede ser perjudicial para la misma pudiendo llegar a producir oxidación, ruidos o golpe de ariete. Finalmente, el agua es alimentada de nuevo a la presión de la caldera gracias a una bomba de agua de alimentación arrastrada por un motor eléctrico.

La combustión de la biomasa se lleva a cabo en instalaciones similares a las de una central térmica convencional con la diferencia de que la caldera debe ser de parrilla o de lecho fluido en función del tipo de biomasa que se vaya a emplear. Este tipo de calderas son más voluminosas y más costosas que las necesarias para quemar un combustible tradicional, además de que presentan peores rendimientos y mayores gastos de operación y mantenimiento.

La temperatura alcanzada en la combustión de la biomasa alcanza valores que son suficientemente altos como para que el vapor generado pueda ser utilizado directamente para la cocción de los neumáticos. Por lo tanto, mediante la valorización energética de biomasa, se puede obtener de forma simultánea el vapor requerido por el proceso de producción y generar energía eléctrica.

Se ha de tener en cuenta que, además de que el suministro de biomasa no es igual de fiable que el de un combustible convencional, su poder calorífico es muy inferior al de estos combustibles, como por ejemplo del gas natural. Es por ello que la cantidad de energía que es posible obtener de la biomasa es mucho menor que en el caso de que se emplee otro combustible como el ya citado gas natural.

Por lo tanto, se ha de tener en cuenta que puede darse el caso en que la energía obtenida no sea suficiente como para vender energía eléctrica y que únicamente se pueda obtener el vapor requerido por el proceso, teniendo que obtener de la red eléctrica la energía eléctrica necesaria para la planta. Puede incluso llegar a darse el caso de que la energía térmica obtenida en forma de vapor generada mediante la combustión de la biomasa no sea suficiente para satisfacer la demanda del proceso de fabricación, por lo que para poder cumplir con las exigencias, se debería seguir utilizando la caldera de gas natural convencional para generar el calor restante necesario.

Una planta de valorización energética de biomasa para generar tanto energía eléctrica como energía térmica en forma de vapor sigue el siguiente esquema:

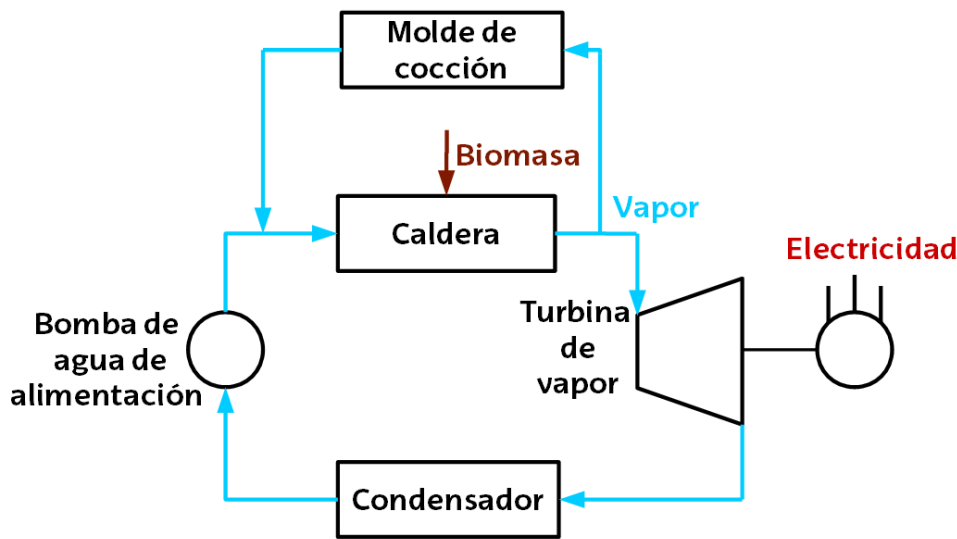


Ilustración 10. Esquema de generación mediante biomasa

A continuación se exponen cuáles son las ventajas e inconvenientes del empleo de la biomasa como alternativa de mejora energética:

Ventajas de la biomasa:

- Proceso válido para la obtención tanto de energía eléctrica como de energía térmica en forma de vapor en función de la disponibilidad de biomasa
- Posibilidad de obtener un beneficio económico con la energía eléctrica sobrante si se consigue generar más energía que la consumida
- Autoabastecimiento energético que permite reducir la dependencia respecto de la empresa comercializadora de la electricidad

Inconvenientes de la biomasa:

- Inversión inicial elevada por el alto coste de las calderas de parrilla y sobre todo de las calderas de lecho fluido
- El poder calorífico de la biomasa es muy inferior al de los combustibles convencionales pudiendo no conseguir generar toda la energía eléctrica requerida siendo necesario tomar el resto de la red eléctrica e incluso no pudiendo generar todo el vapor exigido por el proceso siendo necesario utilizar la caldera de gas natural convencional como apoyo
- Posibilidad de no disponer de un suministro fiable de la biomasa
- Aumento del gasto de mano de obra para atender la instalación correspondiente al Ciclo Rankine de generación de energía
- Aumento del gasto en mantenimiento de la fábrica





### 4.3 – Solar térmica

La mejora energética de la fábrica de neumáticos mediante energía solar térmica se lleva a cabo mediante unas instalaciones que se dividen en cuatro partes: el campo solar formado por los colectores que reciben la energía procedente del sol y donde se calienta un aceite térmico que transporta dicho calor, el generador de vapor donde se produce el intercambio de calor entre el aceite térmico caliente y el agua para producir el vapor, la isla de potencia formada por un Ciclo Rankine donde gracias al vapor generado y mediante una turbina de vapor se produce energía eléctrica y, por último, el propio molde de cocción donde se emplea el vapor generado para concluir el proceso de producción de los neumáticos.

Estas instalaciones pueden tener diversas configuraciones en función de la tecnología que se emplee. Si bien la generación de vapor, la isla de potencia y la cocción del propio neumático son procesos comunes a las diferentes tecnologías y que solo se diferencian unas de otras en cómo están configuradas, el campo solar sí que presenta grandes diferencias entre unas tecnologías y otras. Se pueden diferenciar las siguientes tecnologías de colectores a implantar en el campo solar de la instalación:

1. Colectores cilindro-parabólicos: se trata de la instalación de un gran número de colectores que reflejan el sol sobre un hilo por el cual fluye el aceite térmico. Este aceite térmico intercambia la energía contenida con el vapor de agua que circula por un ciclo Rankine. Como esta agua atraviesa todo el campo solar, se trata de una tecnología compleja y por lo tanto cara. Además, su fabricación se ve encarecida aún más debido a que la forma de los colectores, al ser cilindro-parabólicos, es compleja. Además, requiere de grandes distancias entre las diferentes filas de colectores, lo que supone que la necesidad de una gran superficie. Es la tecnología más madura de todas, que permite el almacenamiento de calor en sales y que puede ser empleada en las horas de menor incidencia solar. También presenta unos ratios de concentración elevados.
2. Espejos fresnel: esta es una tecnología menos madura y que está formada por estos colectores más sencillos de fabricar ya que son planos y por lo tanto son mucho más baratos y, además, requieren de una menor separación entre filas. Sin embargo, presentan unos ratios de concentración bajos, menores rendimientos y que no permite la posibilidad de almacenar energía. Es una tecnología que prácticamente se ha desechado.
3. Torre central: esta tecnología se basa en una gran cantidad de espejos planos, y por lo tanto baratos, situados alrededor de una torre y que reflejan el sol sobre el punto más alto de esta. Por la torre circula directamente agua de una ciclo Rankine para generar energía eléctrica, lo que significa que no se emplea aceite térmico en esta tecnología y que el agua del ciclo no atraviesa el campo solar, por lo que se simplifica la instalación. Esta tecnología presenta ratios de concentración muy elevados y permite llevar a cabo el almacenamiento de la energía en sales. Sin embargo, requieren de una gran superficie para la instalación de la



torre y de todos los espejos y su tamaño está limitado ya que los espejos situados demasiado lejos de la torre pueden no reflejar de forma correcta los rayos directamente sobre la torre al aumentarse la desviación.

4. Discos parabólicos con motor Stirling: se trata de sistemas modulares formados por discos parabólicos que reflejan el sol sobre un motor Stirling que genera energía. En estos equipos no hay fluido térmico ni vapor de agua de un ciclo Rankine, sino que es el propio motor Stirling el que genera directamente la energía. Por lo tanto, estos módulos se emplean únicamente para la generación de energía eléctrica ya que no se calienta ningún fluido en el proceso. Son módulos de poca capacidad y que por lo tanto requieren de una gran superficie para generar una gran cantidad de energía eléctrica.

Mediante el aprovechamiento de la energía solar térmica, se puede llevar a cabo un almacenamiento de energía para aquellos momentos en los cuales la irradiación del sol es muy baja o nula. Este almacenamiento se puede llevar a cabo cuando se emplea como tecnologías de captación colectores cilindro-parabólicos y torre central. Mientras que para la primera tecnología se lleva a cabo el almacenamiento de forma correcta, para la segunda aún no se implanta de forma fiable al ser una tecnología menos madura.

El almacenamiento de energía en sales funciona de tal manera que cuando la irradiación es alta, parte de la energía es transferida desde el fluido a unas sales que mantienen dicha energía para que cuando la irradiación es baja, el sistema funcione de forma inversa y sean las sales las que transfieran energía al fluido y se produzca por lo tanto energía eléctrica.

Se ha de tener en cuenta que la generación de energía térmica varía al variar la insolación del sol, tanto a lo largo del día en función de la posición del sol según van pasando las horas, como a lo largo del año en función de la época del mismo. Esto supondrá que la generación de energía, tanto eléctrica como térmica, dependerá de la presencia o no del sol, y no de los requerimientos de fabricación que se tengan en cada momento. Además, la posibilidad de obtener mayor o menor energía del sol depende también de donde se encuentre ubicada la fábrica de neumáticos. Esto supone que en horas del día en las que el sol ya no está presente o en días en los que la luz solar incide con menor intensidad, se deberá tomar de la red eléctrica la electricidad requerida por el proceso de fabricación y que no haya podido ser generada. De la misma forma, será necesario que la caldera convencional de gas natural trabaje como apoyo al sistema cuando la energía térmica en forma de vapor generada no sea suficiente.

Se puede representar de forma esquemática una instalación de mejora energética de la producción de neumáticos mediante energía solar térmica de la siguiente forma:



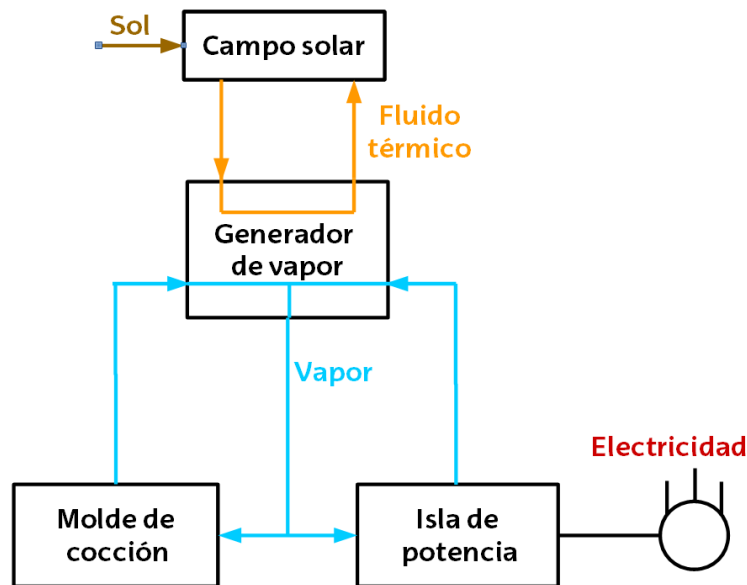


Ilustración 11. Esquema de una instalación de energía solar térmica

A continuación se detallan las ventajas e inconvenientes del empleo de la energía solar térmica en la fabricación de neumáticos:

Ventajas de la energía solar térmica:

- Generación tanto de energía eléctrica como energía térmica en forma de vapor lo que supone un autoabastecimiento energético y la reducción de la dependencia de la empresa comercializadora de la electricidad
- Posibilidad de obtener un beneficio económico con la energía eléctrica sobrante si se consigue generar más energía que la consumida
- Se reduce el gasto en combustible al recibir la energía directamente del sol
- Posibilidad de acumular energía en función de la tecnología empleada

Inconvenientes de la energía solar térmica:

- Imposibilidad para disponer de energía solar de forma constante a lo largo del día y a lo largo del año
- Solución únicamente aplicable a zonas con alta disposición de horas de incidencia solar
- Superficie requerida muy grande debido a la gran cantidad de colectores que es necesario instalarlo que dificulta su implantación en una fábrica cuya superficie está muy limitada
- Inversión inicial muy elevada debido a la necesidad de instalar una gran cantidad de colectores cuya fabricación es compleja y por lo tanto costosa
- Aumento del gasto en mantenimiento principalmente del campo solar

## 4.4 – Solar fotovoltaica

Es posible instalar un sistema de mejora energética para la producción de neumáticos mediante la obtención de energía directamente del sol debido al efecto fotovoltaico. El efecto fotovoltaico es la propiedad que tienen determinados materiales de producir una corriente eléctrica cuando incide una radiación lumínica sobre ellos.

La instalación está formada por una gran cantidad de paneles fotovoltaicos sobre los cuales incide la luz solar y que son los encargados de generar la electricidad. Esta electricidad generada mediante los paneles fotovoltaicos puede ser consumida directamente en corriente continua, mientras que para convertirla en corriente alterna, será necesario instalar un inversor. El empleo de la energía solar fotovoltaica permite la acumulación de energía en baterías durante las horas de mayor irradiación solar, permitiendo ser consumida mediante las horas en las que el sol no está presente. Es necesario instalar un regulador para evitar descargas y sobredescargas y por lo tanto alargar la vida útil de la instalación.

A pesar de ello, puede darse el caso de que la energía eléctrica generada no cubra las demandas de energía eléctrica de la fábrica debido a unas malas condiciones solares, por lo que pueda seguir siendo necesario utilizar la red eléctrica como apoyo. Además, se ha de tener en cuenta que los paneles fotovoltaicos permiten obtener energía eléctrica, pero no la energía térmica en forma de vapor requerida para la cocción de los neumáticos durante el proceso de fabricación. Es por ello que será necesario seguir utilizando la caldera convencional de gas natural para seguir produciendo el vapor.

Esquemáticamente puede representarse de la siguiente forma una instalación de aprovechamiento de energía solar fotovoltaica para la obtención de energía eléctrica de la siguiente forma:

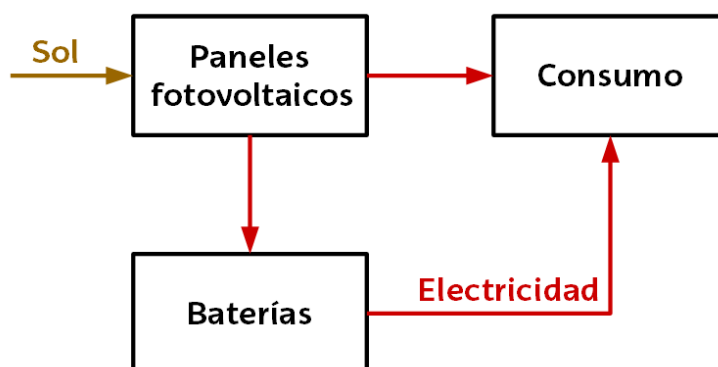


Ilustración 12. Esquema de un sistema de energía solar fotovoltaica

A continuación se describen cuáles son las ventajas e inconvenientes que presenta la implementación de una instalación de aprovechamiento de energía solar fotovoltaica en una fábrica de neumáticos:



#### Ventajas de la energía solar fotovoltaica:

- Generación de energía eléctrica que supone un autoabastecimiento eléctrico y, por tanto, una reducción de la dependencia de la empresa comercializadora de la electricidad
- Posibilidad de acumular energía eléctrica mediante baterías

#### Inconvenientes de la energía solar fotovoltaica:

- Únicamente se puede generar electricidad y no vapor, necesiéndose de forma obligatoria mantener la caldera convencional
- Imposibilidad para disponer de energía solar de forma constante a lo largo del día y a lo largo del año
- Solución únicamente aplicable a zonas con alta disposición de horas de incidencia solar
- Superficie requerida muy grande debido a la gran cantidad de paneles fotovoltaicos que es necesario instalar para cubrir la demanda energética lo que imposibilita su implantación en una fábrica cuya superficie está muy limitada
- Inversión inicial elevada debido a la necesidad de instalar una gran cantidad de paneles fotovoltaicos

## 4.5 – Geotermia

La energía geotérmica es la energía en forma de calor contenida bajo la superficie de la tierra. Tan solo los primeros metros de suelo se ven afectados por las variaciones de temperatura de la atmósfera, mientras que a una profundidad de unos 20 metros, la temperatura se estabiliza y comienza a aumentar según se sigue descendiendo. Esto permite que se pueda aprovechar esta energía en forma de calor que se mantiene constante a lo largo del día y del año.

Para considerar que temperaturas se pueden obtener la energía del suelo y con qué finalidades se puede emplear dicha energía, se describe a continuación una clasificación de los yacimientos geotérmicos en función de la temperatura de los mismos:

1. Yacimientos de muy baja temperatura: se encuentran en cualquier punto de la superficie terrestre a pocos metros de profundidad. Hasta unos 20 metros, se pueden encontrar temperaturas de hasta 15°C. Para obtener temperaturas más altas, es necesario descender hasta los 500 metros para obtener una temperatura de unos 30°C. Estos yacimientos presentes en cualquier zona, son útiles para ser utilizados como acondicionamiento de locales mediante bombas de calor geotérmicas.
2. Yacimientos de baja temperatura: pueden encontrarse a profundidades de 1500-2000 metros pudiendo llegar a temperaturas de hasta 70°C. Estos yacimientos ya no se encuentran en todo el planeta sino en zonas más concretas.



3. Yacimientos de media temperatura: se encuentran temperaturas que no llegan a los 150°C a profundidades de entre 2.000-4.000 metros. Estos yacimientos son escasos y están formados por discontinuidades y fallas. Estos tipos de yacimientos pueden emplearse para la instalación de pequeñas centrales geotérmicas para la generación de energía eléctrica.
4. Yacimientos de alta temperatura: en estos yacimientos pueden obtenerse temperaturas superiores a 150°C a profundidades de 1.500-3.000 metros pero en zonas muy específicas como pueden ser zonas con una actividad sísmica elevada, formación de cordilleras en épocas recientes, actividades volcánicas, etc. Estos yacimientos permiten la instalación de centrales más grandes de generación de energía eléctrica.

Para la producción de energía eléctrica, y también para la obtención del vapor requerido para la cocción de los neumáticos, no basta con tomar energía de los yacimientos de muy baja temperatura que se encuentran a unas decenas de metros de profundidad, ya que es necesario encontrar yacimientos de alta temperatura que permitan que el proceso de generación se pueda llevar a cabo. Para ello es necesario encontrar agua o vapor a temperaturas superiores a 200-300°C, para lo cual es necesario descender más de 1.500 metros. Además, no es posible disponer de estos yacimientos donde se desee, sino que únicamente se encuentran en zonas muy concretas como las ya indicadas anteriormente.

Por lo tanto, la dificultad para realizar un pozo hasta las profundidades indicadas sumado a que solo se pueda disponer de dichos yacimientos en lugares muy concretos y no allá donde se encuentra la fábrica de neumáticos, hacen que sea inviable como sistema de mejora energética para una fábrica de neumáticos, el aprovechamiento de la energía geotérmica para la producción de electricidad y de energía térmica en forma de vapor.

Sin embargo, la energía contenida en el suelo si puede utilizarse y de forma eficiente para el acondicionamiento de la propia fábrica ya que puede ser empleada como climatización de las oficinas, calentamiento de agua caliente sanitaria, etc. mediante el empleo de bombas de calor geotérmicas cuyos equipos únicamente se introducen unos pocos metros en el suelo aprovechando la energía contenida en los yacimientos de muy baja temperatura que se encuentran en toda la superficie del planeta. Dado que únicamente se está considerando la generación de energía eléctrica del proceso y el requerimiento de vapor, no se tendrá en cuenta la climatización de los locales de la fábrica.

A continuación se enumeran las ventajas e inconvenientes que presenta el empleo de la geotermia en la fabricación de neumáticos:

Ventajas de la geotermia:

- Posibilidad de empleo para climatización de la fábrica y calentamiento de agua caliente sanitaria



### Inconvenientes de la geotermia:

- Necesidad de realizar pozos a profundidades no viables para su implantación en una fábrica
- Escasa existencia de yacimientos de alta temperatura que se encuentran en localizaciones muy concretas



## 5 – Alternativa seleccionada

En el apartado anterior ya se ha comentado cuales son las ventajas e inconvenientes, para su implantación como mejora energética en el proceso de producción de neumáticos, de las siguientes formas de generación de energía: biomasa, energía solar térmica, energía solar fotovoltaica, geotermia y cogeneración. Es por lo tanto necesario, explicar los motivos por los cuales se descartan algunas de dichas alternativas en detrimento de otra.

La instalación de la valorización energética de biomasa como alternativa, acarrea una inversión muy alta debido principalmente a los altos costes de la caldera. Además, la dificultad para obtener un suministro fiable de biomasa sumado a la baja cantidad de energía que podemos obtener de la misma debido a su bajo poder calorífico comparado con el de un combustible tradicional, hace que esta alternativa no sea la más adecuada desde el punto de vista económico y de fiabilidad, por lo que no será la alternativa a llevar a cabo.

A pesar de que con la energía solar térmica nos ahorramos los costes de combustible al obtener la energía directamente del sol, la imposibilidad de obtener una irradiación del sol de forma constante a lo largo del día y año, hacen que esta alternativa no se adapte a la demanda productiva de la fábrica, sino que tenga que ser la fábrica la que se adapte a las horas de mayor incidencia del sol, no pudiendo por lo tanto amoldarse a variaciones en la demanda de producción de neumáticos. Se ha de tener en cuenta que la irradiación no es la misma en todas las localizaciones, por lo que en zonas del norte peninsular, esta es una opción poco viable. Además, la superficie requerida para la colocación de un número de colectores solares suficientes para la generación de una cantidad de energía suficiente, es demasiado grande comparada con la disponible en una fábrica. Por lo tanto, se descarta la opción de implantar un sistema de mejora energética mediante energía solar térmica.

Con la energía fotovoltaica sucede algo similar que con la energía solar térmica. La cantidad de energía solar de la que se dispone varía a lo largo del día, del año y del lugar en el que se encuentre ubicada la fábrica, haciendo que esta alternativa no se amolde de forma correcta a zonas poco soleadas. De la misma forma, la superficie necesaria para producir energía eléctrica suficiente como para abastecer a la fábrica es demasiado grande en comparación con la superficie de la que se dispone en una fábrica. Un aspecto a tener en cuenta es que mediante esta fuente, únicamente sería posible generar electricidad y energía térmica en forma de vapor, por lo que seguiría siendo necesario depender de la caldera convencional de gas natural para la producción del mismo. De esta forma, se concluye que la energía solar fotovoltaica no es la opción más viable a implantar.

Tal y como se ha comentado anteriormente, el uso de la energía geotérmica a una escala como la que demanda la fábrica, requiere de yacimientos que se encuentran a más de mil metros de profundidad y ubicados en zonas muy concretas del planeta, por lo que únicamente tendría sentido su empleo para la



climatización. Dado que este no es el objeto de este trabajo, no se tendrá en cuenta la geotermia como una alternativa viable.

Por último, la cogeneración permite la obtención conjunta de electricidad y del vapor requerido para la cocción de los neumáticos, permitiendo obtener un beneficio económico con el exceso de energía eléctrica generada. Además se obtiene un rendimiento global de la instalación mucho más alto que el que presenta cualquier otra fuente de generación de energía existente actualmente. Todo esto con el empleo de un combustible del que se puede disponer de forma fiable y a un precio relativamente bajo que permite a la fábrica funcionar según la demanda que tenga sin depender de variables externas. Pese a que las instalaciones de cogeneración requieren de una inversión inicial alta, este deja de ser un inconveniente al tener en cuenta que las demás alternativas analizadas también requieren de inversiones muy elevadas con la diferencia de que la cantidad de energía obtenida y la posibilidad de obtener un beneficio económico adicional, hacen que la recuperación de la inversión sea mucho más rápida. Estas variables hacen de la cogeneración la alternativa más adecuada para ser implantada.

Por lo tanto se concluye que de las alternativas analizadas en el apartado anterior, se ha decidido implantar la cogeneración como mejora energética para la fabricación de neumáticos.



## 6 – Dimensionamiento de la planta de cogeneración

El dimensionamiento de la planta de cogeneración tiene como objetivo la obtención de los caudales y consumos más significativos y de la selección de los equipos principales atendiendo a la disponibilidad existente de los mismos en el mercado actual.

### 6.1 – Datos de partida

Los datos de partida son los datos requeridos por la fábrica de neumáticos a partir de los cuales se llevara a cabo el dimensionamiento de la planta de cogeneración.

- Cantidad de vapor: Caudal másico de vapor requerido por el molde de cocción de neumáticos

$$m_{vapor}^{molde} = 35 \frac{toneladas}{hora} = 9,72 \frac{kg}{s}$$

- Presión del vapor: Presión del vapor requerida para la cocción de los neumáticos que es a la que tiene que ser generada en la caldera de recuperación

$$P_{vapor} = 15 \text{ bar}$$

- Estado del vapor: El vapor se ha de generar en forma de vapor saturado, ya que la obtención de vapor sobrecalentado supone un coste mucho más elevado y solo tendría sentido en caso de que su destino fuese una turbina de vapor
- Poder calorífico del combustible: Cantidad de energía que es posible obtener de él durante su combustión. El combustible empleado en la caldera convencional y en la planta de cogeneración es el gas natural

$$PCI_{combustible} = 37.000 \frac{kJ}{Nm^3}$$

- Potencia eléctrica contratada: Potencia eléctrica que tiene la fábrica de neumáticos actualmente contratada con la empresa suministradora de electricidad antes de la implantación de la planta de cogeneración

$$W_{electrica}^{contratada} = 10.000 \text{ kW}$$





## 6.2 – Datos de diseño

Los datos de diseño son aquellos datos concernientes a equipos o a estados del vapor que se establecen de ante mano con objeto de calcular el resto.

- Temperatura en el desgasificador: Temperatura a la que se lleva a cabo el proceso de eliminación del aire y que tiene por tanto el vapor a la salida del desgasificador y a la entrada a la bomba de agua de alimentación

$$T_{desgasificador} = 105 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

- Presión en el desgasificador: Presión a la que se lleva a cabo el proceso de eliminación del aire y que tiene por tanto el vapor a la salida del desgasificador y a la entrada a la bomba de agua de alimentación

$$P_{desgasificador} = 3 \text{ bar}$$

- Temperatura de los condensados: Temperatura a la que se recuperan los condensados una vez han salido del molde de cocción, o lo que es lo mismo, a la entrada al desgasificador

$$T_{condensados} = 90 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

- Presión de los condensados: Presión a la que se recuperan los condensados una vez han salido del molde de cocción, o lo que es lo mismo, a la entrada al desgasificador. La recuperación de los condensados se realiza a presión ambiental para no tener que presurizar tuberías y equipos

$$P_{condensados} = 1 \text{ bar}$$

- Temperatura de los humos a la salida de la caldera de recuperación: se establece para evitar que los humos condensen

$$T'_{gases} = 120 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

- Rendimiento de la bomba de agua de alimentación: Rendimiento que tiene la bomba de agua de alimentación de la energía aportada al agua respecto a la suministrada por el motor eléctrico acoplado a la bomba

$$\eta_{bomba} = 65 \%$$

- Rendimiento de la caldera convencional: Rendimiento que tiene la caldera convencional de gas natural de la energía transmitida al vapor respecto de la contenida en el combustible

$$\eta_{caldera}^{gas\ natural} = 90 \%$$

### 6.3 – Esquema completo de la planta de cogeneración

En el siguiente esquema se puede ver un esquema de la planta de cogeneración con algunos de los datos de partida y de diseño necesario para poder llevar a cabo el dimensionamiento de la planta de cogeneración.

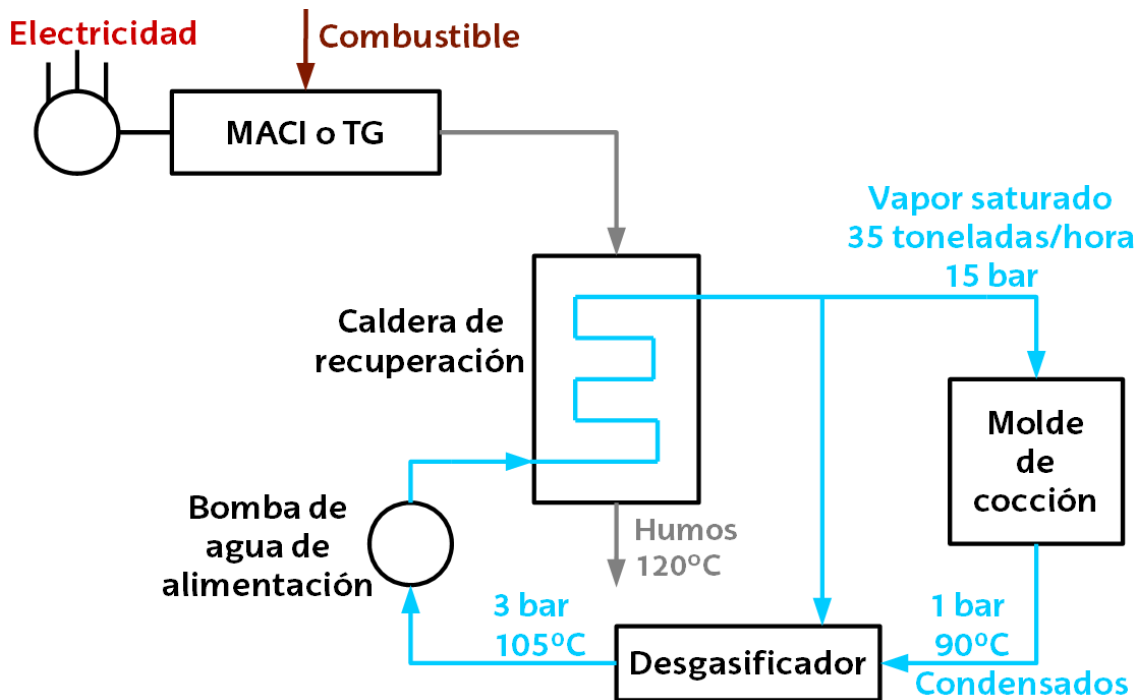


Ilustración 13. Datos de partida y de diseño de la planta de cogeneración

### 6.4 – Cálculo de los caudales de vapor que circulan por la planta

Si bien el caudal de vapor que llega hasta el molde de cocción es el requerido por la propia fábrica, en la caldera de recuperación se debe generar una cantidad algo mayor de vapor ya que una pequeña fracción del mismo se desviará directamente hacia el desgasificador para llevar a cabo la eliminación del aire presente en el torrente de agua.

Por ello es necesario llevar a cabo tanto un balance másico como un balance energético sobre el desgasificador para poder obtener el caudal másico de vapor que se dirige directamente desde la caldera al desgasificador sin pasar por el molde de cocción, y el caudal másico de agua total que se lleva a la caldera para producir vapor.

En la siguiente imagen se ilustra el desgasificador sobre el cual se va a realizar tanto el balance másico como energético. En él están presentes tres caudales: el vapor que es dirigido directamente desde la caldera de recuperación, los condensados que se corresponden con la cantidad de vapor requerido por el molde para la cocción y la suma de los dos anteriores que se corresponde con el caudal total que llegará a la caldera.

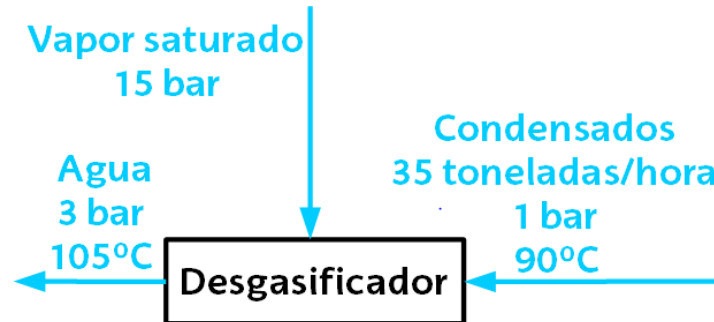


Ilustración 14. Esquema de balances sobre el desgasificador

Antes de llevar a cabo los balances, es necesario obtener las entalpías de cada uno de los tres estados que están presentes en dichos balances. La obtención de las entalpías de todos los estados es inmediata al conocer al menos dos parámetros de cada uno: presión y título y presión y temperatura.

- Entalpía del vapor saturado

$$h_{vapor} = 2792 \frac{kJ}{kg} \begin{cases} P_{vapor} = 15 \text{ bar} \\ x_{vapor} = 1 \end{cases}$$

- Entalpía de los condensados

$$h_{condensados} = 377 \frac{kJ}{kg} \begin{cases} P_{condensados} = 1 \text{ bar} \\ T_{condensados} = 90 \text{ °C} \end{cases}$$

- Entalpía del agua a la salida del desgasificador

$$h_{desgasificador} = 440,3 \frac{kJ}{kg} \begin{cases} P_{desgasificador} = 3 \text{ bar} \\ T_{desgasificador} = 105 \text{ °C} \end{cases}$$

Una vez conocidas estas entalpías ya se puede realizar el balance másico y el balance energético sobre el desgasificador.

- Balance de masa

$$m_{vapor}^{total} = m_{vapor}^{molde} + m_{vapor}^{desgasificador}$$

$$m_{vapor}^{total} = 9,72 + m_{vapor}^{desgasificador}$$



- Balance de energía

$$m_{vapor}^{total} \cdot h_{desgasificador} = m_{vapor}^{molde} \cdot h_{condensados} + m_{vapor}^{desgasificador} \cdot h_{vapor}$$

$$m_{vapor}^{total} \cdot 440,3 = 9,72 \cdot 377 + m_{vapor}^{desgasificador} \cdot 2792$$

De los dos balances realizados se obtiene un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas de las cuales pueden obtenerse los dos caudales desconocidos:

- Caudal másico de vapor que se dirige directamente al desgasificador sin pasar por el molde de cocción

$$m_{vapor}^{desgasificador} = 0,26 \frac{kg}{s} = 0,94 \frac{toneladas}{hora}$$

- Caudal másico de agua total que se dirige a la bomba de agua de alimentación y que por lo tanto llega a la caldera de recuperación para la producción del vapor

$$m_{vapor}^{total} = 9,98 \frac{kg}{s} = 35,94 \frac{toneladas}{hora}$$

## 6.5 – Dimensionamiento de la planta de cogeneración con motor alterno de combustión interna

A pesar de que debido a la gran cantidad de vapor que hay que generar, lo más probable es que se necesite una turbina de gas, se va a comenzar el dimensionamiento con un motor alterno de combustión interna ya que estos equipos presentan rendimientos mucho mayores que las turbinas de gas y la inversión requerida para su instalación es menor.

En la siguiente imagen puede comprobarse el esquema sobre el cual se va a llevar a cabo el dimensionamiento.

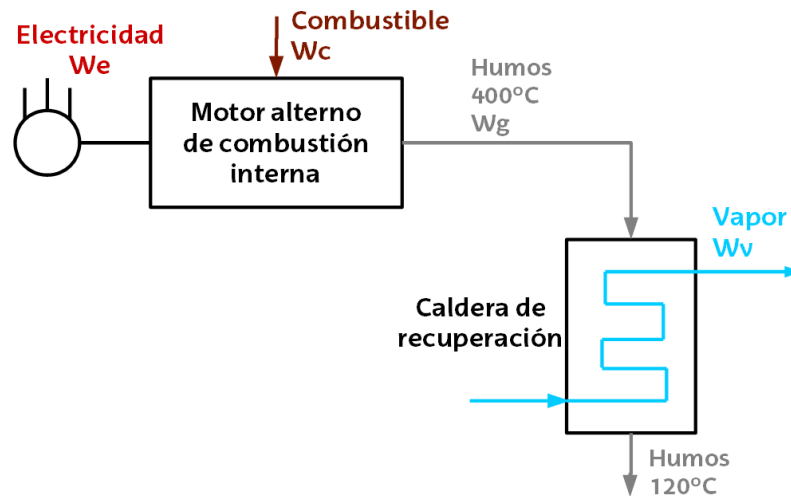


Ilustración 15. Esquema con MACI para el dimensionamiento

- Temperatura de los humos a la salida del motor alternativo de combustión interna: puede variar de algunos motores a otros, pero por lo general ronda los 400°C

$$T_{gases} = 400 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

- Entalpía del agua a la entrada a la caldera de recuperación: su temperatura será la misma que a la salida del desgasificador ya que la bomba aumentará su presión pero la temperatura se mantendrá prácticamente constante

$$h_{agua} = 441,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \begin{cases} P_{caldera} = 15 \text{ bar} \\ T_{agua} = 105 \text{ }^{\circ}\text{C} \end{cases}$$

- Rendimiento en gases del motor alternativo de combustión interna: rendimiento de la potencia transferida a los humos en el motor respecto de la contenida en el combustible, los motores existentes actualmente en el mercado presentan rendimientos de en torno al 20 – 22 %

$$\eta_{gases} \approx 22 \%$$

- Rendimiento eléctrico del motor alternativo de combustión interna: rendimiento de la potencia eléctrica generada por el motor respecto de la contenida en el combustible, los motores existentes actualmente en el mercado presentan rendimientos de en torno al 42 – 47 %

$$\eta_{el\acute{e}ctrico} \approx 45 \%$$

Con estos datos ya se puede calcular la potencia contenida en el vapor que debe ser generado en la caldera de recuperación.



$$W_{vapor} = m_{vapor}^{total} \cdot (h_{vapor} - h_{agua}) = 9,98 \cdot (2792 - 441,2)$$

$$W_{vapor} = 23.466 \text{ kW}$$

Realizando un balance energético sobre la caldera de recuperación, es inmediata la obtención de la potencia contenida en los gases.

$$W_{vapor} = W_{gases}$$

$$W_{gases} = 23.466 \text{ kW}$$

Dado que se ha establecido un rendimiento en humos aproximado de entre los valores que presentan los motores existentes en el mercado, se puede obtener la potencia contenida en el combustible a introducir en el motor.

$$\eta_{gases} = \frac{W_{gases}}{W_{combustible}} \approx 0,22$$

$$W_{combustible} = 106.663 \text{ kW}$$

Como también se ha establecido un rendimiento eléctrico aproximado de entre los valores que presentan los motores existentes en el mercado, se puede obtener la potencia eléctrica producida por el motor.

$$\eta_{eléctrica} = \frac{W_{eléctrica}}{W_{combustible}} \approx 0,45$$

$$W_{eléctrica} = 47.998 \text{ kW}$$

La potencia eléctrica a generar mediante el motor alterno de combustión interna es de 48 MW. Dado que los motores más grandes que se pueden encontrar en el mercado actualmente únicamente alcanzan los 8 MW, sería necesario instalar seis motores. Esto supone no solo una inversión muy alta, sino la necesidad de disponer de una superficie lo suficientemente grande como para poder instalar seis motores de ese tamaño en la fábrica.

El principal motivo por el que es inviable el diseño de la planta de cogeneración con motor alterno de combustión interna es que la cantidad de vapor requerido para la fabricación de los neumáticos es muy alta.

Por ello, se va a proceder a realizar el dimensionamiento de la planta de cogeneración con una turbina de gas, ya que en el mercado pueden encontrarse turbinas de potencias mayores a las obtenidas.

## 6.6 – Dimensionamiento de la planta de cogeneración con turbina de gas

Para comenzar con el dimensionamiento de la planta de cogeneración con turbina de gas, en la siguiente imagen puede comprobarse el esquema sobre el cual se va a llevar a cabo el dimensionamiento.

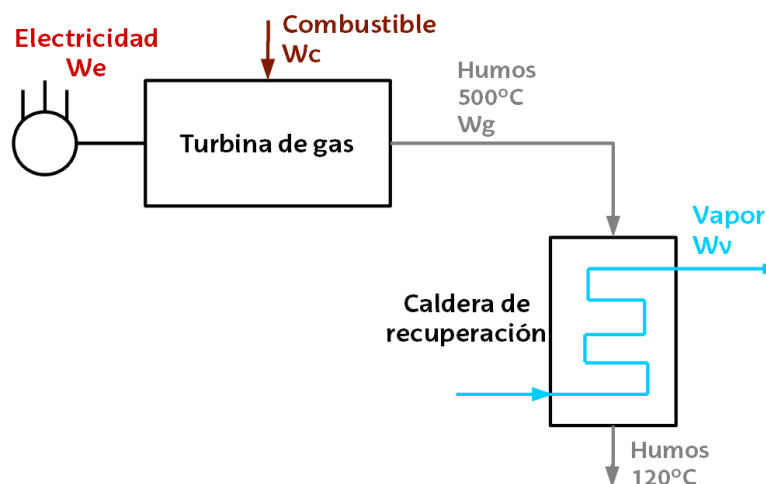


Ilustración 16. Esquema para el dimensionamiento de la planta con TG

- Temperatura de los humos a la salida de la turbina de gas: puede variar de algunas turbinas a otras, pero por lo general ronda los 500°C

$$T_{gases} = 500 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Rendimiento en gases de la turbina de gas: rendimiento de la potencia transferida a los humos en la turbina respecto de la contenida en el combustible, las turbinas existentes actualmente en el mercado presentan rendimientos de en torno al 50 – 55 %

$$\eta_{gases} \approx 55 \%$$

- Rendimiento eléctrico de la turbina de gas: rendimiento de la potencia eléctrica generada por la turbina respecto de la contenida en el combustible, las turbinas existentes actualmente en el mercado presentan rendimientos de en torno al 30 – 35 %

$$\eta_{eléctrico} \approx 30 \%$$

Debido a que la potencia contenida en los humos que es necesario generar, que como ya se ha comentado es igual que la potencia contenida en el vapor de agua, debe ser la misma tanto si el proceso se lleva a cabo con un motor alterno de



combustión interna como con una turbina de gas, ésta ya ha sido calculada anteriormente.

$$W_{gases} = W_{vapor} = 23.466 \text{ kW}$$

Calculada la potencia contenida en los gases de escape de la turbina y conociendo las temperaturas de dichos gases tanto a la entrada como a la salida de la caldera de recuperación, es posible calcular el caudal de gases que saldrá de la turbina.

$$W_{gases} = m_{gases} \cdot \rho_{gases} \cdot (T_{gases} - T'_{gases}) = m_{gases} \cdot 1,1 \cdot (500 - 120) = 23.466$$

$$m_{gases} = 56,14 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Dado que se ha establecido un rendimiento en gases aproximado de entre los valores que presentan las turbinas existentes en el mercado, se puede obtener la potencia contenida en el combustible a introducir en el motor.

$$\eta_{gases} = \frac{W_{gases}}{W_{combustible}} \approx 0,55$$

$$W_{combustible} = 42.665 \text{ kW}$$

Conociendo la potencia contenida en el combustible necesaria, se puede calcular la cantidad de combustible a introducir en la turbina de gas ya que del combustible sabemos que es gas natural y cuál es su poder calorífico inferior.

$$W_{combustible} = m_{combustible} \cdot PCI_{combustible} = m_{combustible} \cdot 37.000 = 42.655$$

$$m_{combustible} = 1,15 \frac{\text{Nm}^3}{\text{s}}$$

Como también se ha establecido un rendimiento eléctrico aproximado de entre los valores que presentan las turbinas existentes en el mercado, se puede obtener la potencia contenida eléctrica producida por el motor.

$$\eta_{eléctrica} = \frac{W_{eléctrica}}{W_{combustible}} \approx 0,30$$

$$W_{eléctrica} = 12.800 \text{ kW}$$

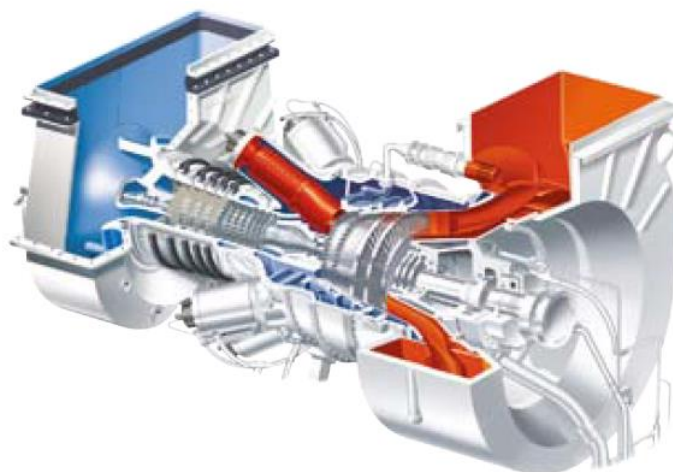
El valor de potencia eléctrica a instalar en la planta se encuentra entre los rangos posibles de turbinas de gas existentes en el mercado ya que actualmente se fabrican turbinas de gas desde potencias de 5 MW. Por lo tanto, el siguiente paso en el dimensionamiento de la planta de cogeneración es la selección de la turbina de gas.



## 6.7 – Selección de la turbina de gas

El siguiente paso en el dimensionamiento de la planta de cogeneración es la selección de una la turbina de gas existente en el mercado que mejor se ajuste a los valores calculados para después obtener valores reales en función de la turbina seleccionada.

Dado que la potencia eléctrica a instalar calculada en el apartado anterior es de 12,8 MW, la turbina de gas más apropiada para ser instalada es una turbina Siemens. Más concretamente la turbina Siemens SGT-400 de 12,9 MW cuyas características se muestran a continuación:



### SGT-400

Generación de energía	<b>12,90 MW(e)</b>
• Combustible:	gas natural
• Frecuencia:	50/60Hz
• Eficiencia eléctrica:	34,8%
• Consumo específico:	10.355 kJ/kWh (9.815 Btu/kWh)
• Velocidad de la turbina:	9.500 rpm
• Relación de compresión:	16,8:1
• Caudal de gases de escape:	39,4 kg/s (86,8 lb/s)
• Temperatura gases escape:	555 °C (1.031 °F)
• Emisiones de NO <sub>x</sub> (con DLE, corregidas al 15% de O <sub>2</sub> seco):	≤ 15 ppmV

**Ilustración 17. Turbina de gas Siemens SGT-400<sup>7</sup>**

<sup>7</sup> Ilustración tomada del catálogo de Siemens



De las características de la turbina SGT-400 sacadas del catálogo de Siemens, ya se pueden establecer como fijos algunos valores que al inicio del dimensionamiento habían sido supuestos.

- Potencia eléctrica de la turbina de gas (con las hipótesis planteadas se había obtenido un valor de 12.800 kW)

$$W_{el\acute{e}ctrica}^{real} = 12.900 \text{ kW}$$

- Rendimiento eléctrico de la turbina de gas (se utilizó como hipótesis un rendimiento del 30 %)

$$\eta_{el\acute{e}ctrico}^{real} = 34,8 \%$$

- Caudal másico de gases de escape de la turbina de gas (durante el dimensionamiento se obtuvo un valor de 56,14 kg/s)

$$m_{gases}^{real} = 39,4 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

- Temperatura de los gases de escape a la salida de la turbina de gas (para llevar a cabo el dimensionamiento se supuso que los gases saldrían de la turbina a 500 °C)

$$T_{gases} = 555 \text{ }^\circ\text{C}$$

Como ya se conoce la temperatura de los gases a la salida de la turbina, puede calcularse directamente la potencia real contenida en los humos a su paso por la caldera de recuperación y por tanto la potencia que será transmitida al vapor.

$$W_{gases}^{real} = m_{gases}^{real} \cdot \rho_{gases} \cdot (T_{gases}^{real} - T'_{gases}) = 39,4 \cdot 1,1 \cdot (555 - 120)$$

$$W_{gases}^{real} = 18.853 \text{ kW}$$

Como puede comprobarse, este valor es inferior al calculado en el apartado anterior que es el realmente necesario para poder la producción del vapor necesario y en las condiciones requeridas para la producción de los neumáticos. Es por ello que la diferencia entre ambos valores deberá ser producido por la caldera convencional de gas natural. Este valor será calculado más adelante.

Como el catálogo de Siemens también nos indica el rendimiento eléctrico de la turbina y conocemos la potencia eléctrica, ya se puede obtener cual es la potencia real contenida en el combustible.



$$\eta_{eléctrico}^{real} = \frac{W_{eléctrica}^{real}}{W_{combustible}^{real}} = \frac{12.900}{W_{combustible}^{real}}$$

$$W_{combustible}^{real} = 37.069 \text{ k W}$$

Calculado este valor, se puede obtener directamente el caudal másico real de combustible a introducir en la turbina de gas dado que conocemos el poder calorífico inferior del gas natural.

$$W_{combustible}^{real} = m_{combustible}^{real} \cdot PCI_{combustible} = m \cdot 37.069$$

$$m_{combustible}^{real} = 1 \frac{Nm^3}{s}$$

Tal y como ya se ha comentado anteriormente, será necesario utilizar la caldera convencional de gas natural para producir cierta parte del vapor, por lo que también será necesario realizar el cálculo del combustible necesario en dicha caldera. Este cálculo se realizará más adelante.

## 6.8 – Calculo del rendimiento eléctrico equivalente

Para conocer cuál es el rendimiento global de la planta de cogeneración, es interesante realizar el cálculo del rendimiento eléctrico equivalente que permite evaluar tanto la energía térmica como la eléctrica generada en función de la energía contenida en el combustible introducida en la turbina de gas.

El cálculo del rendimiento eléctrico equivalente viene determinado por la siguiente expresión:

$$R_{EE} = \frac{E}{Q - \frac{V}{0,9}}$$

Dónde:

- Energía eléctrica generada anualmente, E: se calcula como el producto de la potencia eléctrica de la turbina de gas multiplicada por la disponibilidad de la planta

$$E = W_{eléctrica}^{real} \cdot t$$

- Energía consumida en forma de combustible anualmente, Q: se calcula como el producto de la potencia contenida en el combustible consumida por la turbina de gas multiplicada por la disponibilidad de la planta

$$Q = W_{combustible}^{real} \cdot t$$



- Energía térmica aprovechada anualmente,  $V$ : se calcula como el producto de la potencia térmica aprovechada la salida de la turbina de gas multiplicada por la disponibilidad de la planta

$$V = W_{gases}^{real} \cdot t$$

Se considera que la disponibilidad de la planta de cogeneración es la misma que la de la fábrica de neumáticos, que es de 8.000 horas al año. De esta forma, ya puede calcularse el rendimiento de la planta.

$$R_{EE} = \frac{12.900 \cdot 8.000}{37.069 \cdot 8.000 - \frac{18.853 \cdot 8.000}{0,9}} = 0,8002$$

$$\boxed{R_{EE} = 80 \%}$$

Se obtiene, por lo tanto, un rendimiento eléctrico equivalente del 80 %. Lo que supone un aprovechamiento energético muy alto del combustible empleado en la planta de cogeneración.

## 6.9 – Dimensionamiento de la bomba de agua de alimentación

Para obtener la potencia que deberá tener el motor de la bomba de agua de alimentación, primero es necesario calcular cual es la potencia teórica de la bomba para trabajar entre la presión de la caldera (15 bar) y la presión del desgasificador (3 bar).

$$W_{bomba}^{teórica} = m_{vapor}^{total} \cdot v_{agua} \cdot (P_{vapor} - P_{desgasificador}) = 9,98 \cdot 0,001 \cdot (15 - 3) \cdot 100 = 11,98 \text{ kW}$$

Sabiendo que el rendimiento eléctrico de la bomba de agua de alimentación es del 65 %, ya se puede obtener la potencia eléctrica real del motor de la bomba de agua de alimentación.

$$\eta_{bomba} = \frac{W_{bomba}^{real}}{W_{bomba}^{teórico}} = \frac{W_{bomba}^{real}}{11,98} = 0,65$$

$$\boxed{W_{bomba}^{real} = 18,43 \text{ kW}}$$

De esta forma queda dimensionada la bomba de agua de alimentación.



## 6.10 – Cálculo del combustible a utilizar en la caldera convencional de gas natural

Tal y como se ha comentado anteriormente, con la turbina de gas seleccionada no es posible generar todo el vapor requerido por la caldera de recuperación, por lo que una parte del vapor deberá ser generado por la caldera convencional de gas natural de la que dispone la fábrica. Por lo tanto, se tendrá que seguir utilizando cierta cantidad de gas natural en esta caldera.

Para obtener cuánto, lo primero que hay que saber es la cantidad de potencia contenida en gases, o lo que es lo mismo en el vapor, que no se debe ser producida en la caldera.

$$W_{gases}^{caldera} = W_{gases} - W_{gases}^{real} = 23.466 - 18.853$$

$$W_{gases}^{caldera} = 4.613 \text{ kW}$$

Como conocemos el rendimiento de la caldera convencional disponible en la fábrica, se puede calcular la potencia contenida en el combustible que será necesaria introducir a la caldera.

$$\eta_{caldera} = \frac{W_{gases}^{caldera}}{W_{combustible}^{caldera}} = \frac{4.613}{W_{combustible}^{caldera}} = 0,90$$

$$W_{combustible}^{caldera} = 5.126 \text{ kW}$$

Siguiendo el mismo procedimiento empleado en apartados anteriores, es posible calcular el caudal másico de combustible a introducir en la caldera convencional de gas natural ya que se conoce el poder calorífico inferior del combustible.

$$W_{combustible}^{caldera} = m_{combustible}^{caldera} \cdot PCI_{combustible} = m_{combustible}^{caldera} \cdot 37.069 = 5.126$$

$$m_{combustible}^{caldera} = 0,14 \frac{\text{Nm}^3}{\text{s}}$$

De cara a realizar un estudio económico de la planta de cogeneración más adelante es interesante realizar ciertos cálculos. El primero es la potencia eléctrica que la planta podrá vender por haber generado más de lo que consume. Este parámetro es la diferencia entre la potencia eléctrica instalada en la planta y la que la empresa tenía contratada con la empresa suministradora de electricidad.

$$W_{eléctrica}^{venta} = W_{eléctrica}^{real} - W_{eléctrica}^{contratada} = 12.900 - 10.000$$

$$W_{eléctrica}^{venta} = 2.900 \text{ kW}$$



También es interesante conocer la potencia contenida en el combustible de la caldera convencional de gas natural de la fábrica de neumáticos que ahorramos al instalar la planta de cogeneración ya que supondrá un ahorro económico. Para obtener este valor, primero es necesario conocer la potencia del combustible que se utilizaba en la caldera de gas natural para la producción de neumáticos antes de instalar la cogeneración. Este cálculo se puede llevar a cabo ya que conocemos el requerimiento energético del proceso y también el rendimiento de la caldera.

$$\eta_{caldera} = \frac{W_{gases}}{W_{combustible}^{antes}} = \frac{23.466}{W_{combustible}^{antes}} = 0,90$$

$$W_{combustible}^{antes} = 26.073 \text{ kW}$$

Sabiendo lo que se consumía en la caldera antes de la instalación de la planta de cogeneración y habiendo calculado lo que se consume en ella tras la instalación, se puede calcular cual es la potencia del combustible ahorrada en la caldera convencional.

$$W_{combustible}^{ahorro} = W_{combustible}^{antes} - W_{combustible}^{caldera} = 26.073 - 5.126$$

$$W_{caldera}^{ahorro} = 20.948 \text{ kW}$$

De esta forma queda dimensionada la planta de cogeneración para la fábrica de neumáticos.

En el Anexo 1 introducido al final del documento puede comprobarse el código empleado en el software Engineering Equation Solver (EES) para llevar a cabo el dimensionamiento.



## 7 – Descripción de la planta de cogeneración

La planta de cogeneración está compuesta por los equipos necesarios para obtener la energía eléctrica y la energía térmica en forma de vapor requerida por el proceso de fabricación de los neumáticos. A continuación se describe el proceso de generación de dichas energías en la planta de cogeneración de forma general y después se realizará una explicación más detallada de los equipos principales que conforma la planta.

El proceso comienza aportando combustible al equipo generador de electricidad que es una turbina de gas ya que para la producción de neumáticos se necesita una gran cantidad de vapor y, por lo tanto, puede no ser suficiente con un motor alterno de combustión interna. El combustible ideal que consume este equipo es gas natural. Éste equipo produce un movimiento rotativo que después es convertido en electricidad mediante un alternador. La electricidad puede ser suministrada directamente a la fábrica para ser consumida por los diferentes equipos por lo que será necesario disponer de un transformador de baja tensión para que la electricidad generada pueda ser consumida. También será necesario disponer de un transformador de alta tensión para acondicionar la electricidad generada a las condiciones de la red eléctrica a la cual se va a descargar la energía generada sobrante. Esta conexión a la red eléctrica puede realizarse en la subestación más cercana, pero puede darse el caso de que la compañía eléctrica pida realizar la conexión incluso a varias decenas de kilómetros de distancia.

Al producirse la combustión se generan unos humos que salen a gran temperatura como para emitirlos directamente a la atmosfera. Es por ello que son dirigidos a una caldera de recuperación donde intercambian energía con agua para generar vapor. Una vez que los humos han cedido energía y por lo tanto su temperatura ha disminuido, son emitidos al exterior después de pasar por una serie de equipos y filtros que retienen la mayor cantidad de contaminantes evitando que éstos lleguen a la atmosfera.

El vapor generado en la caldera de recuperación en unas condiciones de temperatura y presión determinadas, es llevado al molde de cocción donde da forma al neumático crudo con el objetivo de que éste obtenga sus cualidades finales. Dado que del vapor, únicamente se requiere su energía para el proceso y no el propio agua en sí, se lleva a cabo una recuperación del vapor de agua ya condensado que permite no solo un ahorro energético ya que este se encuentra a una temperatura mayor que el agua de alimentación fresca lo que disminuye el gasto en combustible, sino que además se reduce el gasto de tratamiento de agua fresca de alimentación que debe de estar debidamente tratada para no dañar a los diferentes equipos.

La recuperación de los condensados se lleva a cabo mediante un depósito a presión atmosférica ya que el coste de presurizar todos los equipos a la presión de la caldera sería demasiado alto. Sin embargo, no es posible recuperar todo el



vapor que ha sido generado, por lo que una pequeña parte de los condensados se perderá. Esto supone que será necesario introducir esa misma cantidad mediante agua fresca de alimentación. Lo más habitual es conseguir recuperar en torno al 95% del vapor condensado, siendo necesario por lo tanto que el resto sea compensado con el agua fresca de alimentación

Dado que por las válvulas, juntas, etc. puede llegar a introducirse aire en el circuito de vapor de agua, es necesario instalar un desgasificador para eliminar este aire presente en el ciclo que puede causar problemas en la instalación. Para poder llevar a cabo el proceso de expulsión del aire presente en el agua, será necesario introducir cierta cantidad de vapor directamente al desgasificador. Para concluir el ciclo de vapor, es necesaria la introducción de una bomba de agua de alimentación accionada mediante un motor eléctrico y que tiene la función de elevar la presión del agua hasta el valor requerido por la caldera de recuperación.

El siguiente esquema representativo de la planta de cogeneración muestra el proceso que se acaba de describir:

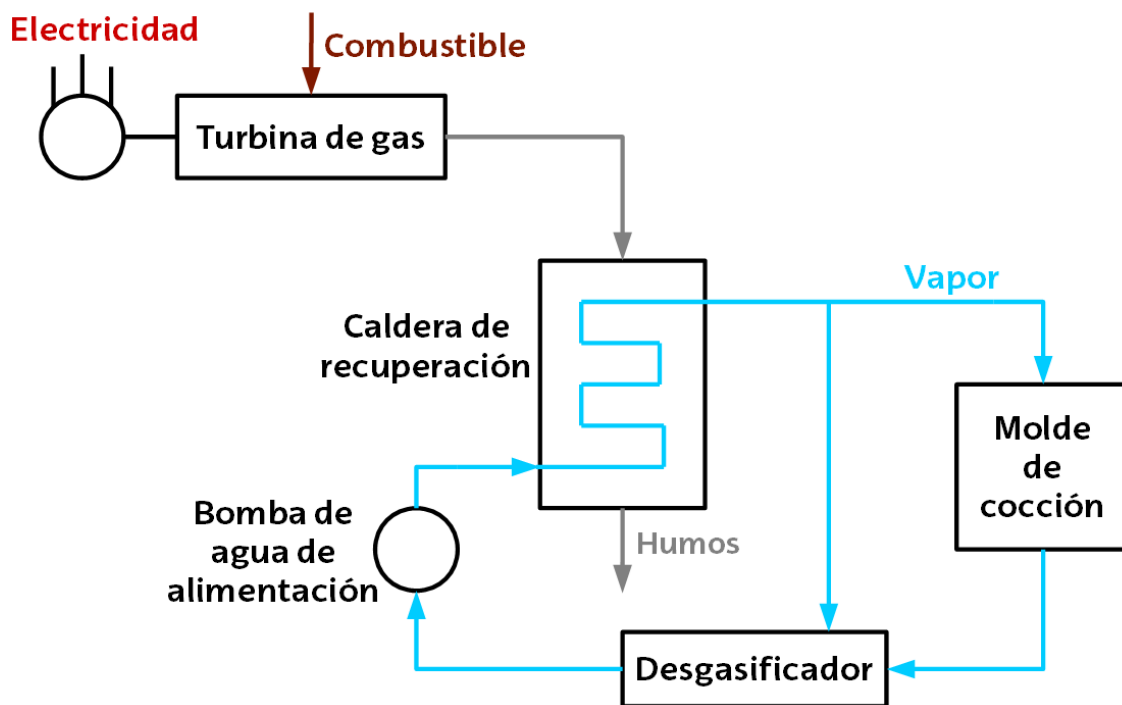


Ilustración 18. Esquema de la planta de cogeneración

A continuación se describen los equipos principales que conforma la planta de cogeneración.

## 7.1 – Turbina de gas

Una turbina de gas es una turbomáquina que, tomando aire del exterior y consumiendo un combustible, genera energía mecánica de rotación que es transformada en energía eléctrica al tener acoplado un alternador. Además, como los humos expulsados por la turbina de gas están a una alta temperatura y contienen aún una gran cantidad de energía, pueden seguir siendo útiles para la producción de energía ya que su expulsión directa al exterior supone una pérdida cuantitativa de energía.

Una turbina de gas está compuesta principalmente por tres partes: el compresor, la cámara de combustión y la turbina. A la turbina de gas entra aire tomado del exterior y es comprimido por el compresor hasta llegar a la cámara de combustión donde se inyecta el combustible, que para el caso que estamos tratando será gas natural. Tras realizarse la mezcla de combustible y aire, se lleva a cabo la combustión. Dicha combustión produce un aumento de temperatura y presión brusco que provoca que los gases productos de la combustión salgan por la turbina haciéndola girar y generando por lo tanto el movimiento de rotación que a posteriori será el que permita obtener electricidad gracias al alternador.

El trabajo necesario para mover el compresor es aportado por la propia turbina, por lo tanto, la cantidad de energía efectiva que se puede obtener de la turbina de gas es la diferencia entre la energía generada por la turbina y la consumida por el compresor. Una vez los gases salen de la turbina de gas, son dirigidos a la caldera de recuperación para llevar a cabo la producción de energía térmica en forma de vapor.

En la siguiente figura se muestra un esquema de las partes que conforma una turbina de gas:

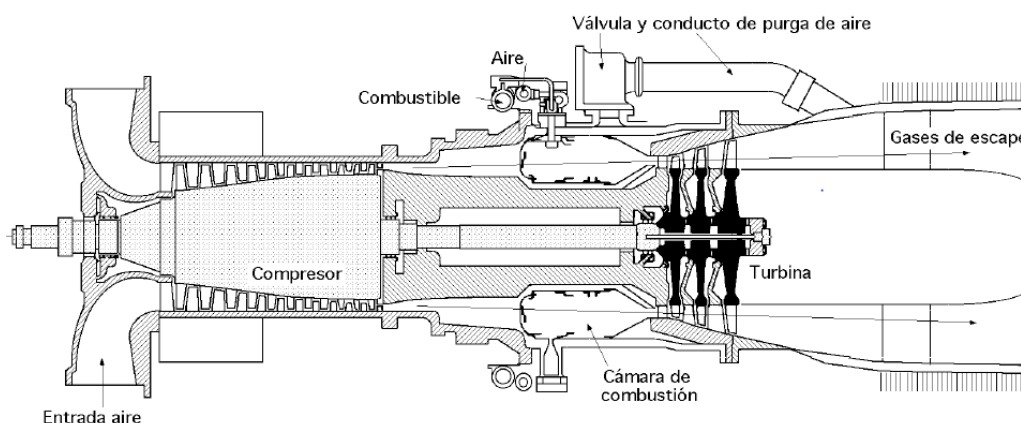


Ilustración 19. Partes que componen una turbina de gas

De cara a explicar cuáles son los diferentes flujos de energía presentes en una turbina de gas empleada en una planta de cogeneración se partirá del siguiente esquema:

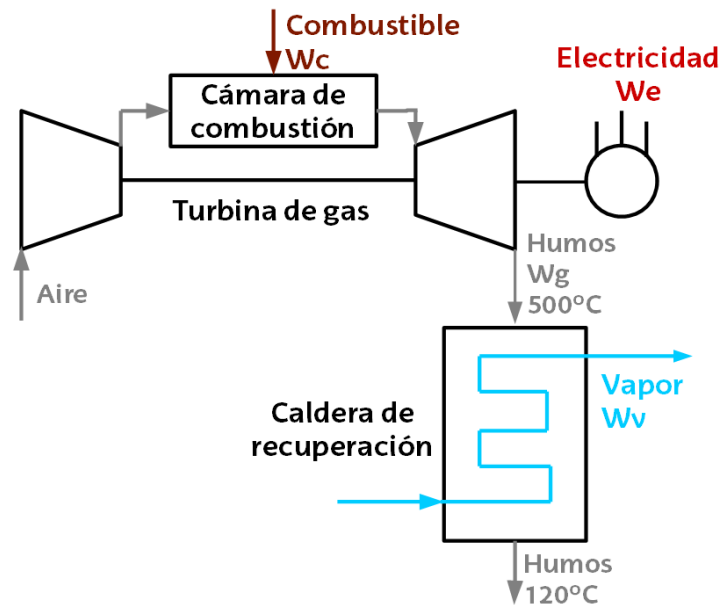


Ilustración 20. Flujos de energía en una turbina de gas

Los flujos energéticos presentes en el esquema anterior son los siguientes:

- Energía contenida en el combustible ( $W_c$ ): es la energía introducida a la cámara de combustión de la turbina de gas en forma de combustible.
- Energía eléctrica ( $W_e$ ): es la electricidad producida por la turbina de gas.
- Energía contenida en los humos de escape ( $W_g$ ): es la energía que llevan los humos a la salida de la turbina de gas y por lo tanto, la energía que llega a la caldera de recuperación para la producción de vapor.

Con objeto de llevar a cabo el dimensionamiento de la planta de cogeneración en apartados posteriores, es necesario conocer que cantidad de energía de la introducida en el turbina de gas con el combustible es convertida en energía eléctrica y cuanta en vapor, por ello se muestran a continuación valores típicos sobre los cuales se encuentran los rendimientos energéticos de las turbinas de gas presentes en el mercado actualmente:

- Rendimiento eléctrico:  $\eta_e = \frac{W_e}{W_c} \approx 30 - 35\%$
- Rendimiento de los gases:  $\eta_g = \frac{W_g}{W_c} \approx 50 - 55\%$
- El resto de energía no aprovechable es cedida al exterior en forma de calor y se consideran por lo tanto como pérdidas
- El rendimiento de la caldera de recuperación se considera igual a la unidad al tratarse de un intercambiador de calor del que suponemos que no existen pérdidas y por lo tanto toda la energía contenida en los gases es transferida al vapor:  $W_g = W_v$



El rendimiento eléctrico de las turbinas de gas es mucho menor que el que presenta los motores alternos de combustión interna, por lo que antes la posibilidad de instalar uno de los dos equipos, es más interesante optar por un motor. Sin embargo, para producciones demasiado grandes, en los que es necesario instalar más de un motor (actualmente se fabrica motores de no más de 8 MW) no quedará más remedio que instalar una turbina de gas. Este aspecto se tratará más adelante durante el dimensionamiento de la planta de cogeneración.

Para asegurar una vida útil larga de la planta de cogeneración es necesario llevar a cabo un mantenimiento adecuado de la turbina de gas. Una técnica adecuada a emplear en estos equipos es la inspección endoscópica, que permite observar las piezas internas de la turbina de gas. Los puntos más importantes a observar son la cámara de combustión, los inyectores de combustible, los álabes del compresor y los álabes de la turbina.

De forma diaria se debe llevar a cabo un mantenimiento de la turbina de gas en funcionamiento que consista en comprobar la potencia generada, la temperatura de los gases a la salida, vibraciones, rendimiento, etc. cuyos valores fuera de lo habitual pueden indicar un funcionamiento erróneo de la turbina y además permite dar información de que es lo que produce dicho funcionamiento erróneo. Además se debe llevar a cabo revisiones programadas cada cierto tiempo con la turbina parada como puede ser limpieza o sustitución de los filtros de aire, inspección de los elementos de combustión e incluso puede llegar a ser necesario abrir la turbina y llevar a cabo una inspección general.

## 7.2 – Caldera de recuperación

Una caldera de recuperación es una caldera sin quemador en la cual la energía a aportar al vapor procede de los gases calientes de escape de una turbina de gas. Las calderas de recuperación funcionan esencialmente como un intercambiador de calor en el cual un fluido caliente (los humos de escape de la turbina) transfiere su energía a un fluido frío (el agua del proceso de fabricación que se quiere vaporizar).

El intercambio de calor que se produce entre los humos y el vapor puede representarse según la siguiente gráfica:

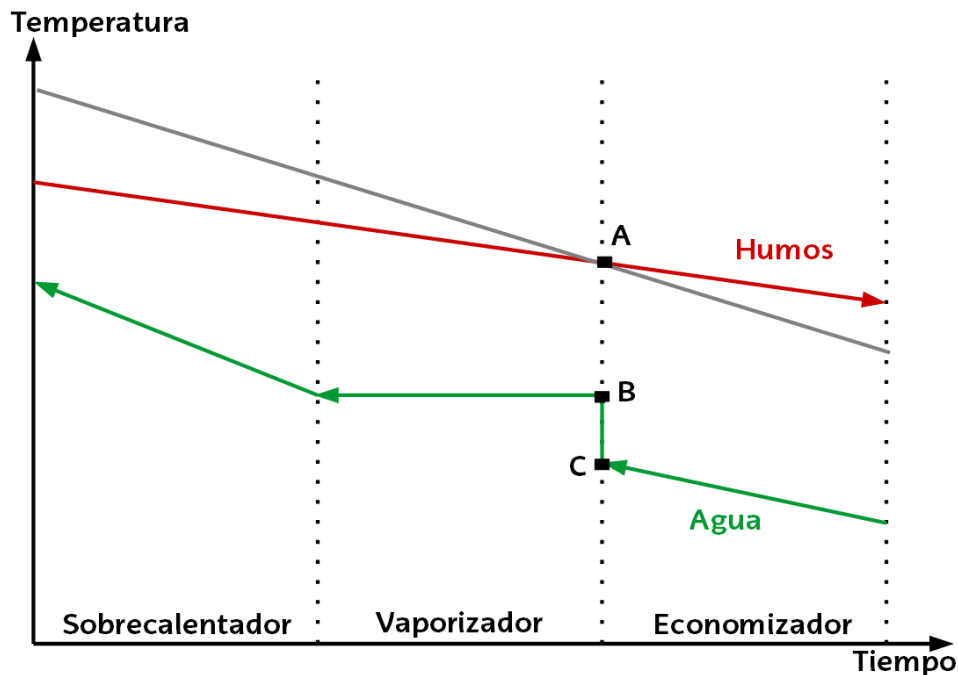


Ilustración 21. Diagrama de temperaturas en una caldera de recuperación

En la gráfica anterior puede comprobarse como la caldera de recuperación está dividida en tres zonas: el economizador, el vaporizador y el sobrecalentador. Mientras que la disminución de temperaturas de los humos es lineal, con el agua no sucede lo mismo. El agua entra en la caldera de recuperación y su temperatura va aumentando pero sin producirse el cambio de fase. Después, esta agua ya calentada, pasa al vaporizador donde el agua cambia a fase vapor, proceso que se produce a temperatura constante, siendo esta temperatura, la temperatura de saturación a la presión de la caldera o temperatura de vaporización. Por último, el vapor generado, que es vapor saturado, pasa al sobrecalentador donde ve su temperatura aumentada para la obtención de vapor sobrecalentado.

Se puede comprobar en dicha gráfica que el agua debe entrar al economizador a una temperatura inferior a la de saturación para evitar que el vapor comience a generarse en el economizar. La diferencia entre esas dos temperaturas (distancia entre B y C) es, por lo tanto, un margen de seguridad y se denomina Approach.

De la misma forma, la diferencia entre la temperatura de los humos a la salida del vaporizador y la temperatura de saturación del vapor a la presión de la caldera (distancia entre los puntos A y B) se denomina Pinch y determina el tamaño de la caldera. Si el Pinch es pequeño, la diferencia de temperaturas también lo es y por lo tanto se necesitará una caldera de gran tamaño. Por el contrario, para valores de Pinch altos, la transferencia de calor también lo será y por lo tanto el tamaño de la caldera será de menor.

Dado que para la fabricación de los neumáticos, únicamente se necesita vapor saturado, ya que la obtención de vapor sobrecalentado es mucho más costosa y



únicamente tendría sentido su obtención con objeto de turbinarlo para obtener energía eléctrica, la caldera de recuperación a implantar en la planta no necesitará de un sobrecalentador, siendo necesario únicamente el economizador y el vaporizador.

Un aspecto a destacar de la gráfica anterior respecto a la distribución de temperaturas de los humos en la caldera de recuperación es que siempre se pivota sobre el Pinch. Es decir, que cuanto mayor sea la temperatura de los humos a la entrada de la caldera de recuperación, menor será la temperatura de los mismos a la salida de la caldera y, por lo tanto, mayor será el rendimiento.

Sin embargo, la disminución de la temperatura de los humos a la salida de la caldera tiene un límite. Esto es así ya que los humos arrastran vapor de agua producida durante la combustión. Si la temperatura de los humos desciende demasiado, este vapor de agua condensa a la temperatura de rocío y retorna por el economizador enfriando todo aquello que se estaba calentando anteriormente. Por lo tanto, los gases no deben salir de la caldera a una temperatura menor a 120°C, que es algo superior a la temperatura de rocío.

Este efecto es aún más importante cuando el combustible contiene azufre, ya que el vapor condensado puede arrastrar el azufre presente en el combustible y retornar en forma de ácido sulfúrico con las catastróficas consecuencias que ello supondría para la planta, sin embargo, como se ha decidido emplear gas natural como combustible y como éste no contiene azufre, no se tendrá en cuenta ésta problemática.

El agua introducida en la caldera, y que después circula por el resto de la planta, no puede ser tomado directamente de la red, ya que éste agua contiene una gran cantidad de sales que perjudican el funcionamiento de la caldera y reducen su vida útil. Por ello es necesario que, previamente, el agua empleada sea debidamente tratada. Aun así, no es posible obtener un agua completamente destilada, por lo que se tendrá un agua con una pequeña cantidad de sales. Estas sales se irán acumulando en la caldera ya que el vapor no arrastra dichas sales. Esto obliga a tener que realizar de forma periódica una purga del agua de la caldera.

En la siguiente imagen se puede observar la estructura de una caldera de recuperación:





Ilustración 22. Caldera de recuperación para cogeneración<sup>8</sup>

La purga del agua de la caldera no es un procedimiento energéticamente eficiente, pero es necesaria para asegurar una larga vida útil de la caldera. Aun y todo, esta agua de purgas puede ser aprovechada parcialmente cuando se necesita vapor en una parte de la fábrica a una presión menor que la de la caldera. De esta forma se procede a reducir la presión del agua de purgas mediante un equipo de expansión de forma que se obtiene espontáneamente una cierta cantidad de vapor que no arrastra sales. Este vapor obtenido se denomina vapor flash. El resto de agua no vaporizada, no podrá ser recuperada y deberá tratarse de forma pertinente dirigiéndola a una estación depuradora de aguas residuales.

Los humos, una vez salen de la caldera, deben ser expulsados al exterior mediante una chimenea de forma que la inmisión (concentración a cota cero) sea lo menor posible, pero deben ser correctamente tratados antes de ser emitidos a la atmosfera. En caso de que se emitan partículas, es necesaria la instalación de equipos que retengan dichas partículas como son los multiciclones, los filtros de mangas, los electrofiltros o los lavadores de gases o scrubbers. Sin embargo, como el combustible empleado para la cogeneración no es un combustible sólido que genere partículas, sino un combustible gaseoso como el gas natural, no será necesaria la instalación de equipos de retención de partículas.

Para el mantenimiento de la caldera, de forma diaria se deben tomar datos de presiones, temperaturas, etc. comprobar fugas, vigilar la temperatura de los gases en la chimenea, comprobar la posible contaminación del agua de condensados, comprobar los niveles de contaminación de los humos, purgar las sales del agua de la caldera, etc.

<sup>8</sup> Ilustración tomada de un modelo de ATTSU





De forma semanal se deben limpiar los filtros de aire, comprobar el correcto funcionamiento de termómetros, manómetros y demás equipos de medida y comprobar el correcto funcionamiento de las válvulas abriéndolas y cerrándolas,

Mensualmente se deben llevar a cabo pruebas de paro en los niveles de seguridad de la caldera, del correcto funcionamiento del interruptor de parada de emergencia, de las bombas de circulación y de alimentación de agua a la caldera, y también se debe comprobar el estado de los equipos de reserva.

Para continuar con el mantenimiento de la caldera, anualmente se debe inspeccionar la caldera estando ésta parada tanto desde el lado de agua como desde el lado de gases comprobando y llevando a cabo la limpieza de posibles corrosiones, incrustaciones, sedimentos y hollines.

### 7.3 – Molde de cocción

El molde de cocción es el lugar donde se aprovecha la energía térmica en forma de vapor generada en la planta de cogeneración para concluir el proceso de fabricación de los neumáticos.

Este molde tiene grabado el dibujo final del neumático e información relevante del mismo como sus características o el logo del fabricante. En él se introduce el neumático en crudo que se ha ido generando durante las diferentes fases de ensamblado y después se sella el molde herméticamente para evitar que se puedan producir fugas cuando se introduzca el vapor.

Una vez cerrado, se introduce el vapor a presión por una membrana situada en el centro del molde. Según el vapor va llenando el molde, va empujando el neumático aun maleable sobre el molde y, por lo tanto, va grabando sobre el neumático el dibujo contenido en el molde. Debido a la alta temperatura del vapor y, gracias al azufre introducido en los materiales durante la elaboración de los materiales semiterminados que conforman el neumático, se produce la vulcanización.

La vulcanización es un proceso mediante el cual las partículas de azufre forman uniones con las cadenas de polímeros permitiendo al neumático pasar del estado plástico al elástico.

A continuación se muestra una ilustración del momento en el que el vapor entra al molde de cocción por la membrana central y comienza a empujar al neumático crudo sobre las paredes del molde:

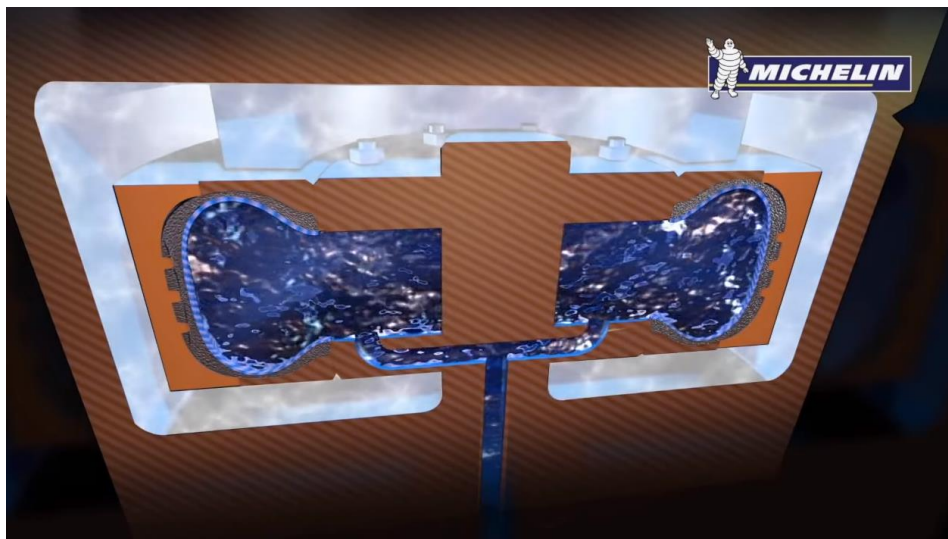


Ilustración 23. Entrada del vapor al molde de cocción<sup>9</sup>

Cuando se ha terminado la cocción del neumático, el vapor sale del molde y es devuelto al circuito de agua para que retorne de nuevo a la caldera de recuperación y se reinicie el ciclo. Una vez evacuado el vapor de agua, el molde se abre y se extrae el neumático ya cocido. De forma inevitable, durante la apertura del molde de cocción y la extracción del neumático, se pierde una pequeña cantidad de vapor, por lo tanto, no todo el vapor generado regresará al ciclo, sino que lo hará aproximadamente el 95% del vapor.

Para asegurar el correcto funcionamiento del molde se deben llevar a cabo revisiones periódicas en las que se compruebe la presión en el interior del molde para comprobar que no se producen fugas, se debe llevar a cabo una limpieza del molde en caso de que se produzcan sedimentos o de que se adhiera a las paredes del molde partes del neumático debido a fallos en la producción, etc.

#### 7.4 – Desgasificador

El desgasificador es un equipo que tiene como objetivo eliminar el aire que pueda estar presente en el ciclo de vapor. Puede darse el caso de que por válvulas, juntas y demás uniones, se valla introduciendo aire en las tuberías y que puede acabar dañando a los diferentes equipos que conforman la planta. Por ello es preciso disponer de un desgasificador para eliminar dicho aire.

Los principales problemas que ocasiona la presencia de aire en el circuito de vapor son los siguientes:

<sup>9</sup> Ilustración tomada del proceso de fabricación de neumáticos de Michelin

- **Corrosión:** la presencia del oxígeno contenido en el aire junto con el agua que circula por la planta, puede llegar a producir corrosión no solo en las tuberías sino también en el resto de equipos. Esto supone un deterioro de la instalación, pudiendo incluso llegar a producir grietas, que acortan en gran medida su vital útil obligando a sustituir las zonas afectadas por la corrosión.
- **Cavitación:** la presencia de pequeñas burbujas formadas por el aire en el torrente de agua produce que en zonas de sección reducida, como puede ser la bomba de agua de alimentación, se produzca cavitación destruyendo sus alabes y obligando, por tanto, a la sustitución de la bomba.
- **Golpe de ariete:** el aire puede ir acumulándose en válvulas o codos de la instalación llegando un punto en el que obturen el paso del agua. Esto desencadena en un brusco empuje del aire por parte del agua que supone un golpe del agua sobre el propio codo o válvula que además acarrea vibraciones perjudiciales para los equipos.
- **Ruido:** la presencia de aire en el torrente de agua puede ocasionar ruido debido a la alta presión a la que circula por las tuberías y equipos.

En la siguiente ilustración se puede observar un esquema de un desgasificador para la eliminación del aire presente en el cilo de vapor:

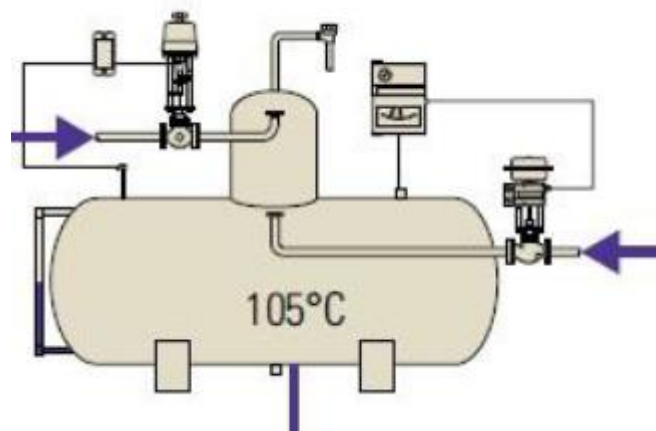


Ilustración 24. Estructura de un desgasificador

Para evitar que este aire se acumule dentro de la instalación se lleva a cabo la desgasificación térmica. La desgasificación térmica se basa en aumentar la temperatura del flujo de agua debido a que a medida que se aumenta la temperatura, la diferencia de densidad del aire y el agua aumenta disminuyendo por tanto la solubilidad del aire en el agua y facilitando su extracción.

Como la solubilidad de los gases en el agua es prácticamente nula a 100°C, se procede a elevar el flujo de agua hasta 105°C de forma que el aire deje de estar disuelto en el agua y pueda ser extraído por una válvula ubicada en la zona superior del desgasificador. Para evitar que a esa temperatura el agua se evapore



y sea también evacuado, la operación se realiza a cierta presión, aproximadamente a 3 bares.

Para llevar a cabo el aumento de temperatura del flujo de agua, se mezcla con una pequeña porción del vapor de agua que ha sido producido. Como para llevar a cabo la desgasificación térmica se aumenta la temperatura del agua antes de su paso por la bomba de agua de alimentación y, por tanto, de ser introducida en la caldera, el desgasificador también cumple la función de precalentamiento del agua de alimentación.

### 7.5 – Bomba de agua de alimentación

La bomba de agua de alimentación es el equipo encargado de generar la presión a la cual se va a producir el vapor en la caldera, es decir, es el equipo encargado de llevar al flujo de agua desde la baja presión a la que se produce la desgasificación hasta la alta presión a la cual opera la caldera de recuperación.

Para llevar a cabo este proceso, la bomba de agua de alimentación es accionada mediante un motor eléctrico. Esto supone que la primera conversión de energía es de energía eléctrica a energía mecánica de rotación en el motor eléctrico y después es la bomba la que transforma esa energía mecánica de rotación en energía de presión para aumentar la presión del flujo de agua hasta el valor requerido por la caldera.

En la siguiente ilustración se muestra un esquema constructivo de una bomba de agua de alimentación arrastrada por un motor eléctrico:

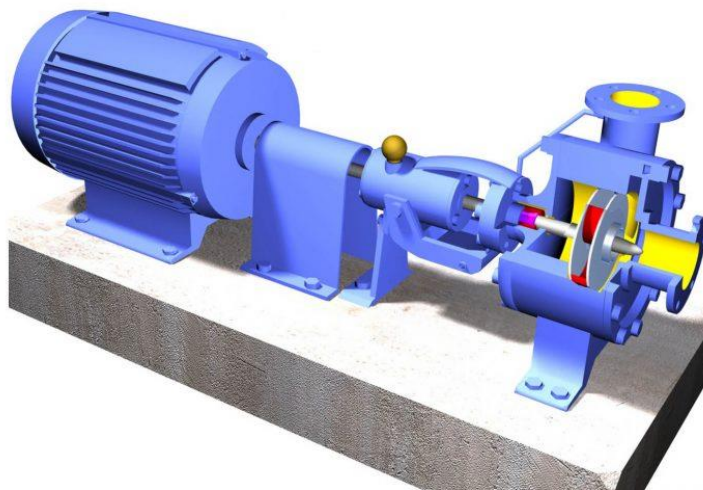


Ilustración 25. Estructura de una bomba de agua de alimentación

La bomba de agua de alimentación es un equipo fundamental para cualquier instalación formada por un ciclo de vapor, por lo que es imprescindible que se



instalen por duplicado, es decir, que siempre haya una en operación y otra en reserva por si la primera deja de funcionar.

Para alargar la vida útil de estos equipos, se ha de tener en cuenta que las bombas de agua de alimentación, como todos los equipos rotativos, no trabajan bien en regímenes transitorios como son el arranque y la parada, por ello, se ha de tener mucho cuidado en cómo se llevan a cabo estas dos operaciones. Durante el arranque se debe comprobar que la bomba está llena de agua. Tanto en el arranque como en la parada, la apertura o cierre de las válvulas se debe hacer lentamente y no de forma brusca.

Para saber si la bomba está funcionando de forma correcta, se debe comprobar el consumo del motor de la bomba, no se debe hacer trabajar al equipo en caudales límites y se deben comprobar las presiones de aspiración e impulsión. Además, se debe realizar una inspección auditiva para comprobar si se produce ruido que pueda indicar la existencia de cavitación y, por lo tanto, la destrucción de los alabes de la bomba.



## 8 – Estudio económico

A continuación se va a llevar a cabo un estudio económico que permita conocer cuál es la inversión que supone la planta de cogeneración, el tiempo en que se tarda en recuperar la inversión y la rentabilidad de la misma.

### 8.1 – Inversión inicial

Antes de analizar el coste que supone toda la instalación, se van a detallar cuales son las partidas que entran dentro de la inversión inicial de la planta.

- Turbinas de gas: coste de la turbina seleccionada que es la Siemens SGT-400 de 12,9 MW
- Generador eléctrico: coste del propio generador
- Caldera de recuperación: coste de la propia caldera de recuperación
- Equipos auxiliares: engloba los costes de la bomba de agua de alimentación, el desgasificador, las tuberías, valvulería, etc.
- Instrumentación y control: coste de la instrumentación y de los sistemas de control
- Obra civil: coste de la realización de la obra civil de la planta
- Montaje mecánico: coste de realizar el montaje en la planta de los diferentes equipos mecánicos
- Montaje eléctrico y de instrumentación: coste del montaje de los diferentes equipos eléctricos y de la instrumentación

A continuación se detalla el coste que supone cada una de las partidas que se ven involucradas en la construcción de la planta de cogeneración para la fábrica de neumáticos.

Tabla 1. Inversión inicial

Concepto	Importe
Turbina de gas	4.700.000 €
Generador eléctrico	430.000 €
Caldera de recuperación	1.150.000 €
Equipos auxiliares	2.850.000 €
Instrumentación y control	780.000 €
Obra civil	950.000 €
Montaje mecánico	1.040.000 €
Montaje eléctrico y de instrumentación	1.400.000 €
<b>Total</b>	<b>13.300.000 €</b>

La planta de cogeneración de 12,9 MW dimensionada requiere, por lo tanto, de una inversión inicial de 13.300.000 euros. Esto supone que se ha de gastar aproximadamente un millón de euros por cada megavatio de potencia eléctrica





instalada, lo que entra dentro de los varemos entre los cuales se mueven este tipo de instalaciones en la actualidad.

Como puede comprobarse, el equipo que hace aumentar el coste de la planta es la turbina de gas al ser éste un equipo caro. En concreto la turbina de gas instalada supone el 35% de la inversión total.

## 8.2 – Beneficio anual

Para calcular el beneficio anual que supone la planta de cogeneración para la fábrica de neumáticos, primero se va a comenzar indicando algunos datos de partida que son un reflejo del mercado actual, que dependen la propia fábrica o que han sido calculados anteriormente.

- Potencia eléctrica contratada: potencia eléctrica que la empresa tenía contratada con la empresa suministradora de electricidad para el consumo de la propia fábrica

$$W_{eléctrica}^{contratada} = 10.000 \text{ kW}$$

- Potencia eléctrica vendida: potencia eléctrica generada sobrante respecto de lo consumido en la propia fábrica y que, por lo tanto, se puede vender a la compañía eléctrica

$$W_{eléctrica}^{venta} = 2.900 \text{ kW}$$

- Precio de compra de la energía eléctrica: precio al que se pagaba la electricidad contratada antes de la instalación de la planta de cogeneración

$$\text{Precio de compra de la EE} = 90 \frac{\text{€}}{\text{MWh}_e}$$

- Precio de venta de la energía eléctrica: precio al que se puede vender el sobrante de energía eléctrica generada y que representa un valor medio establecido por el pool energético

$$\text{Precio de venta de la EE} = 50 \frac{\text{€}}{\text{MWh}_e}$$

- Disponibilidad de la planta: tiempo que la fábrica, y por tanto que la planta de cogeneración, trabajan a lo largo del año

$$t = 8.000 \frac{h}{\text{año}}$$





- Coste del gas natural: precio al que se paga el gas natural tanto para su uso en la turbina de gas como en la caldera convencional

$$\text{Precio del GN} = 40 \frac{\text{€}}{\text{MWh}_c}$$

- Potencia del combustible ahorrada en la caldera convencional: disminución de la potencia contenida en el combustible a introducir en la caldera convencional

$$W_{\text{caldera}}^{\text{ahorro}} = 20.948 \text{ kW}$$

- Potencia del combustible en la turbina de gas: potencia contenida en el combustible a introducir en la turbina de gas de la planta de cogeneración

$$W_{\text{combustible}}^{\text{real}} = 37.069 \text{ kW}$$

Una vez conocidos estos parámetros, ya se puede llevar a cabo el cálculo del beneficio anual obtenido con la planta de cogeneración. Lo primero que se puede calcular son los ingresos obtenidos por la venta de energía eléctrica.

$$\text{Venta de EE} = 2,9 \text{ MW} \cdot \frac{50 \text{ €}}{1 \text{ MWh}_e} \cdot \frac{8.000 \text{ h}}{1 \text{ año}} \approx 1.160.000 \text{ €}$$

A continuación, se puede calcular el ahorro que supone no tener que seguir pagando a la empresa suministradora de electricidad, la potencia eléctrica que se tenía contratada anteriormente.

$$\text{Ahorro de compra de EE} = 10 \text{ MW} \cdot \frac{90 \text{ €}}{1 \text{ MWh}_e} \cdot \frac{8.000 \text{ h}}{1 \text{ año}} \approx 7.200.000 \text{ €}$$

También se puede calcular el ahorro que supone la disminución del combustible a utilizar en la caldera convencional de gas natural.

$$\text{Ahorro de GN en caldera} = 20.948 \text{ MW} \cdot \frac{40 \text{ €}}{1 \text{ MWh}_c} \cdot \frac{8.000 \text{ h}}{1 \text{ año}} \approx 6.700.000 \text{ €}$$

A pesar de que se ahorra una gran cantidad de combustible en la caldera, se comienza a gastar este combustible en la turbina de gas, por lo que es necesario tener en cuenta estos gastos.

$$\text{Gasto en GN en TG} = 37,069 \text{ MW} \cdot \frac{40 \text{ €}}{1 \text{ MWh}_c} \cdot \frac{8.000 \text{ h}}{1 \text{ año}} \approx 11.865.000 \text{ €}$$

Por último, se han de tener en cuenta los gastos de operación y mantenimiento que acarrea el funcionamiento de la planta a lo largo del año.

$$\text{Gasto en OyM} \approx 150.000 \text{ €}$$

De esta forma ya puede calcularse el beneficio anual obtenido restando los gastos generados de los ingresos y ahorro obtenidos.

*Beneficio anual*

$$\begin{aligned}
 &= \text{Venta de EE} + \text{Ahorro de compra de EE} + \text{Ahorro de GN en caldera} \\
 &\quad - \text{Gasto de GN en TG} - \text{Gasto en OyM} \\
 &= 1.160.000 + 7.200.000 + 6.700.000 - 11.865.000 - 150.000
 \end{aligned}$$

$$\boxed{\text{Beneficio anual} = 3.045.000 \frac{\text{€}}{\text{año}}}$$

Por lo tanto, con la instalación de la planta de cogeneración en la fábrica de neumáticos se consigue un beneficio anual de 5.975.000 euros al año.

### 8.3 – Tiempo de retorno simple

El tiempo de retorno simple (TRS), o periodo de recuperación (payback), representa el tiempo que se tarda en recuperar la inversión inicial llevada a cabo. Antes de calcular este tiempo es necesario partir de los siguientes datos ya calculados anteriormente.

- Inversión inicial: gasto a llevar a cabo para la implantación de la planta de cogeneración

$$\text{Inversión inicial} = 13.300.000 \text{ €}$$

- Beneficio anual: beneficio que se obtiene anualmente debido a la instalación de la planta de cogeneración

$$\text{Beneficio anual} = 3.045.000 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

De esta forma puede obtenerse el periodo de retorno simple como el cociente de la inversión realizada entre los beneficios obtenidos anualmente.

$$\text{TRS} = \frac{\text{Inversión inicial}}{\text{Beneficio anual}} = \frac{13.300.000}{3.045.000}$$

$$\boxed{\text{TRS} = 4,37 \text{ años} = 4 \text{ años y } 5 \text{ meses}}$$

Se consigue recuperar la inversión al cabo de cuatro años y cinco meses, lo que supone un tiempo de retorno de la inversión, que si bien no es exageradamente alto, está por encima de lo que suelen pedir las empresas en la actualidad que es entre uno y dos años.



## 8.4 – Valor actual neto

El valor actual neto (VAN) permite reflejar el valor actual de los beneficios netos que la planta de cogeneración generará a lo largo de su vida. Para calcular este parámetro se parte de los siguientes datos.

- Inversión inicial: gasto a llevar a cabo para la implantación de la planta de cogeneración

$$I = 13.300.000 \text{ €}$$

- Beneficio anual: beneficio que se obtiene anualmente debido a la instalación de la planta de cogeneración

$$Q = 3.045.000 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

- Tiempo de operación: tiempo que la planta de cogeneración estará en funcionamiento desde su puesta en marcha

$$n = 20 \text{ años}$$

- Tasa de descuento: coste del capital que se aplica para determinar el valor actual de un beneficio futuro

$$K = 0,05 (5 \%)$$

El valor actual neto se calcula como el sumatorio de los beneficios anuales netos actualizados para todos los años de operación de la planta de cogeneración de acuerdo con la tasa de descuento menos la inversión inicial.

$$VAN = -I + \sum_{t=1}^n \frac{Q}{(1 + K)^t} = -13.300.000 + \sum_{t=1}^{20} \frac{3.045.000}{(1 + 0,05)^t}$$

$$\boxed{VAN \approx 24.650.000 \text{ €}}$$

Se obtiene, por lo tanto, que el valor actual del beneficio que la planta de cogeneración pretende generar a lo largo de su vida útil es de 24.650.000 euros. Se trata de un valor positivo y además muy alto, lo que asegura una buena rentabilidad de la planta.

## 8.5 – Tasa interna de rendimiento

La tasa interna de rendimiento (TIR) permite obtener cual es la tasa de descuento necesaria para que la planta de cogeneración presente un valor actual neto nulo. Para calcular este parámetro se parte de los siguientes datos.



- Inversión inicial: gasto a llevar a cabo para la implantación de la planta de cogeneración

$$I = 13.300.000 \text{ €}$$

- Beneficio anual: beneficio que se obtiene anualmente debido a la instalación de la planta de cogeneración

$$Q = 3.045.000 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

- Tiempo de operación: tiempo que la planta de cogeneración estará en funcionamiento desde su puesta en marcha

$$n = 20 \text{ años}$$

- Valor actual neto: valor actual de los beneficios netos que la planta de cogeneración generará a lo largo de su vida útil

$$VAN = 0$$

La tasa interna de rendimiento se obtiene igualando a cero la expresión del valor actual neto utilizada anteriormente y obteniendo el valor de la tasa de descuento.

$$VAN = -I + \sum_{t=1}^n \frac{Q}{(1+r)^t} = -13.300.000 + \sum_{t=1}^{20} \frac{3.045.000}{(1+r)^t} = 0$$

$$r = 0,225 \text{ (22,5 \%)}$$

Es decir, que se obtiene una tasa interna de rendimiento del 22,5%. Al ser este valor muy superior a la tasa de descuento, se puede concluir, junto con lo ya calculado anteriormente, que la planta de cogeneración a instalar en la fábrica de neumáticos presenta una rentabilidad muy buena que indica que el proyecto debe llevarse a cabo.

## 8.6 – Análisis de sensibilidad

A continuación se va a realizar un estudio de como variarían los parámetros económicos calculados anteriormente si se produjese una variación que afectase a la inversión o al beneficio anual producido por la planta.

### Aumento de la inversión

Durante el proceso de construcción pueden aparecer inconvenientes que no estaban contemplados al comienzo del proyecto. Se va a considerar un



incremento de la inversión de un 15 % y se van a calcular el resto de parámetros de igual forma a como han sido calculados anteriormente.

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 2. Análisis de sensibilidad respecto a la inversión**

Parámetro	Valor inicial	Valor tras variación	Variación
Inversión	13.300.000 €	15.300.000 €	+ 15 %
Beneficio anual	3.045.000 €	3.045.000 €	=
Tiempo de retorno simple	4 años y 5 meses	5 años y 1 meses	+ 8 meses
Valor actual neto	24.650.000 €	22.650.000 €	- 8,11 %
Tasa interna de rendimiento	22,5 %	19,32 %	- 36,18 %

A pesar de que la inversión inicial se ve aumentada un 15 %, y que como consecuencia de ello, el resto de parámetros económicos presentan valores algo peores en cuanto a rentabilidad respecto a los iniciales, la planta de cogeneración sigue siendo un proyecto rentable por un amplio margen.

### Aumento del precio del gas natural

El precio del gas natural puede verse incrementado en gran medida debido a factores externos, de forma que el gasto en combustible que se realiza en la planta de cogeneración aumenta disminuyendo el beneficio anual obtenido y por lo tanto afectando al resto de parámetros. Se va a considerar un incremento del 20 % del precio del gas natural desde los 40 €/MWh considerados anteriormente hasta un precios de 50 €/MWh y se van a calcular el resto de parámetros de igual forma a como han sido calculados anteriormente.

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 3. Análisis de sensibilidad respecto del precio del gas natural**

Parámetro	Valor inicial	Valor tras variación	Variación
Inversión	13.300.000 €	13.300.000 €	=
Beneficio anual	3.045.000 €	1.760.000 €	- 42.20 %
Tiempo de retorno simple	4 años y 5 meses	7 años y 7 meses	+ 2 años y 7 meses
Valor actual neto	22.650.000 €	8.633.000 €	- 61.89 %
Tasa interna de rendimiento	22,5 %	11,82 %	- 10,68 %



Como consecuencia de que el precio del combustible se ve incrementado un 20 %, y que como consecuencia de ello, el resto de parámetros económicos presentan valores mucho peores en cuanto a rentabilidad respecto a los iniciales, la planta de cogeneración sigue siendo un proyecto rentable aunque con un periodo de recuperación de la inversión muy alto.

De los análisis de sensibilidad realizados, puede comprobarse como el aumento del precio del gas natural afecta en mayor medida a la rentabilidad de la planta de cogeneración que un posible aumento en la inversión de la planta.

De todas formas, queda demostrado que, a pesar de que la variación de diferentes factores influya de forma negativa en la rentabilidad del proyecto, la implantación de la planta de cogeneración en la fábrica de neumáticos es rentable económicamente teniendo en cuenta cualquier parámetro a analizar respecto de la situación anterior a la instalación de la planta de cogeneración.



## 9 – Planificación del proyecto

En este apartado se llevará a cabo la planificación del proyecto de implantación del sistema de cogeneración en la fábrica de neumáticos describiendo cada uno de los paquetes de trabajo que componen el global del proyecto junto con sus responsables, recursos, duración, etc. para después llevar a cabo la planificación indicando fechas de comienzo y fin del mismo.

### 9.1 – Paquetes de trabajo

A continuación se describen los paquetes de trabajo desde la etapa inicial del proyecto hasta la final.

#### Ingeniería básica

- Descripción: Diseño de la ingeniería básica de la planta de cogeneración
- Responsable: Director del proyecto
- Recursos humanos: Equipo de ingenieros
- Recursos técnicos: Ordenadores y software de diseño necesarios
- Entregable: Diseño básico de la planta de cogeneración
- Carga de trabajo: 2 meses
- Tiempo máximo de duración: 2 meses
- Predecesoras: Ninguna

#### Ingeniería de detalle

- Descripción: Diseño de la ingeniería de detalle de la planta de cogeneración
- Responsable: Director del proyecto
- Recursos humanos: Equipo de ingenieros
- Recursos técnicos: Ordenadores y software de diseño necesarios
- Entregable: Diseño detallado de la planta de cogeneración
- Carga de trabajo: 6 meses
- Tiempo máximo de duración: 6 meses
- Predecesoras: Ingeniería básica

#### Compra de equipos

- Descripción: Adquisición de los equipos a instalar en la planta de cogeneración
- Responsable: Responsable de compras
- Recursos humanos: Personal administrativo





- Recursos técnicos: No se requieren recursos técnicos destacables
- Entregable: Equipos que conforman la planta
- Carga de trabajo: 6 meses
- Tiempo máximo de duración: 6 meses
- Predecesoras: Ingeniería básica

### Obra civil

- Descripción: Construcción de la obra civil de la planta de cogeneración
- Responsable: Jefe de obra
- Recursos humanos: Equipo de constructores
- Recursos técnicos: Maquinaria necesaria para llevar a cabo la obra
- Entregable: Obra civil de la planta
- Carga de trabajo: 4 meses
- Tiempo máximo de duración: 6 meses
- Predecesoras: Ingeniería básica

### Montaje mecánico

- Descripción: Montaje de los equipos de la planta en la obra
- Responsable: Jefe de obra
- Recursos humanos: Equipo de montadores, soldadores, caldereros, etc.
- Recursos técnicos: Maquinaria necesaria para llevar a cabo el montaje de los equipos
- Entregable: Montaje mecánico de los equipos en la obra
- Carga de trabajo: 2 meses
- Tiempo máximo de duración: 2 meses
- Predecesoras: Compra de equipos y obra civil

### Montaje eléctrico y de la instrumentación

- Descripción: Montaje eléctrico y de la instrumentación de la planta
- Responsable: jefe de obra
- Recursos humanos: Equipo de electromecánicos
- Recursos técnicos: Maquinaria necesaria para llevar a cabo el montaje eléctrico
- Entregable: Montaje de todos los elementos eléctricos y de la instrumentación
- Carga de trabajo: 3 meses
- Tiempo máximo de duración: 3 meses
- Predecesoras: Montaje mecánico

## Puesta en marcha

- Descripción: Trabajos de puesta en marcha de la planta de cogeneración
- Responsable: Jefe de obra
- Recursos humanos: Equipo de montadores, soldadores, caldereros, electromecánicos, etc.
- Recursos técnicos: Maquinaria necesaria para la puesta en marcha de la planta
- Entregable: Entrega llave en mano de la planta de cogeneración
- Carga de trabajo: 2 meses
- Tiempo máximo de duración: 2 meses
- Predecesoras: Montaje eléctrico y de la instrumentación

## Reuniones de control

- Descripción: Reunión para controlar que el proyectos se lleva acabo según lo planeado
- Responsable: Director del proyecto
- Recursos humanos: Equipo de ingenieros, jefe de obra, responsable de compras, etc.
- Recursos técnicos: No se requieren recursos técnicos destacables
- Entregable: Informe de situación del proyecto
- Duración: 1 día
- Frecuencia: Cada 2 meses

## 9.2 – Diagrama de Gantt

El proyecto está programado para ser comenzado el día 1 de Octubre de 2019, por lo que se han tenido en los días festivos correspondientes al calendario laboral de Bizkaia de los años 2019 y 2020.

La jornada laboral será de lunes a jueves de 8:00 a 13:30 y de 15:00 a 18:00 y los viernes de 8:00 a 14:00. Esto supone que se trabajarán ocho horas y media de lunes a jueves y seis horas los viernes y suponiendo un total de cuarenta horas trabajadas a la semana por cada trabajador.

Teniendo en cuenta la duración de cada uno de los paquetes de trabajo ya comentados anteriormente, y teniendo en cuenta las relaciones entre unas y otras tareas, el proyecto concluirá durante el decimoquinto mes de trabajo. Más concretamente el proyecto de implantación de la planta de cogeneración finalizará el día 3 de diciembre de 2020.

En la siguiente ilustración se muestra el diagrama de Gantt en el que puede verse la planificación del proyecto.

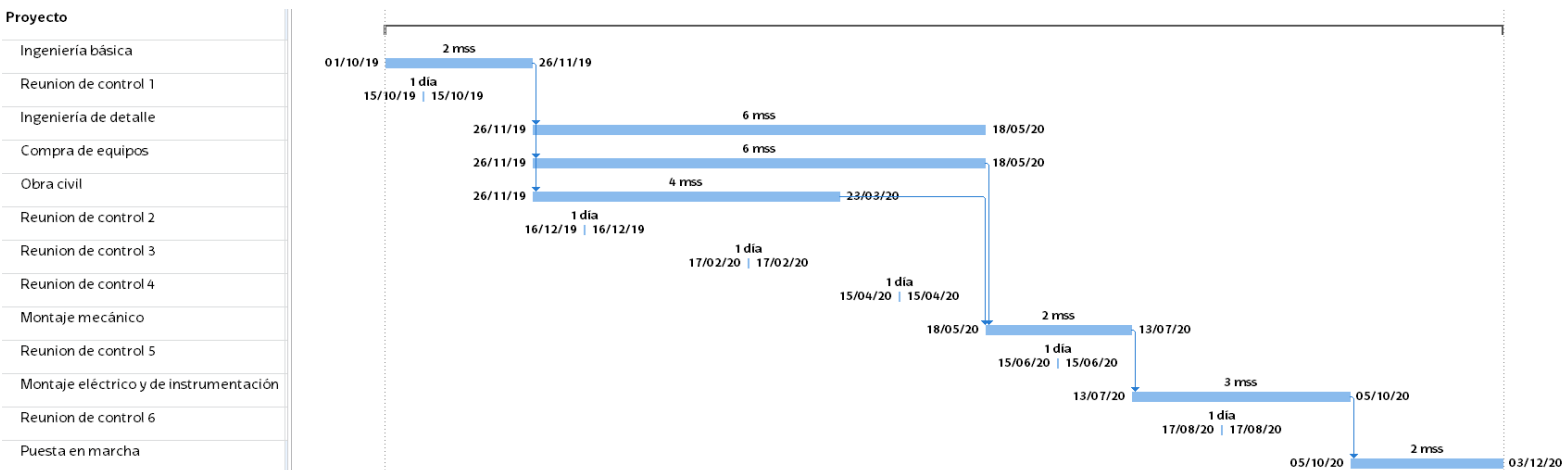


Ilustración 26. Diagrama de Gantt

En el Anexo 2 introducido al final del documento puede comprobarse de forma ampliada el Diagrama de Gantt realizado mediante el software Microsoft Project.



## 10 – Conclusiones y recomendaciones

A continuación se van a detallar las conclusiones principales sacadas durante la realización del presente trabajo y se realizarán ciertas recomendaciones.

Tal y como se ha comprobado al estudiar el proceso de fabricación de los neumáticos, éste requiere de una gran cantidad de energía térmica en forma de vapor para llevar a cabo la cocción además de la energía eléctrica requerida por el proceso. Esto supone que la alternativa de mejora energética a implantar en la fábrica sea capaz de generar ambos tipos de energía.

Tras el estudio de las diferentes alternativas de mejora energética que son la cogeneración, la biomasa, la energía solar térmica, la energía solar fotovoltaica y la geotermia, se ha decidido seleccionar la cogeneración ya que es la que mejor se adapta a las necesidades de la fábrica en cuanto a producción de electricidad y vapor, espacio y rentabilidad.

La fábrica de neumáticos tiene un requerimiento de 35 toneladas a la hora de vapor saturado a una presión de 15 bar y tiene contratada una potencia eléctrica de 10.000 kW. Una vez realizado el dimensionamiento de la planta de cogeneración, y teniendo en cuenta las características y la cantidad de vapor a generar, se ha optado por instalar una turbina de gas. Concretamente la turbina SGT-400 de Siemens de 12.900 kW. Con éste equipo podremos satisfacer sobradamente el consumo eléctrico de la fábrica pudiendo vender el sobrante. Sin embargo, no se consigue generar toda la energía térmica necesaria, por lo que sigue siendo necesario utilizar la caldera convencional de gas natural para generar una pequeña parte de vapor. El rendimiento eléctrico equivalente obtenido es del 80%, valor muy superior al que se puede obtener mediante cualquier otra forma de generación de energía.

La inversión inicial requerida para la implantación de la planta de cogeneración asciende a 13.300.000 €. Se ha llevado a cabo un cálculo del beneficio anual posible a obtener con la implantación de esta mejora energética teniendo en cuenta que se puede vender la energía eléctrica sobrante y que ya no es necesario seguir pagando a la empresa suministradora de electricidad. El beneficio anual obtenido es de 3.04575.000 €.

De esta forma se deduce que el tiempo necesario para recuperar la inversión realizada es de aproximadamente cuatro años y medio, que es un periodo superior a lo que las empresas están demandando en la actualidad. Además, se han calculado otros indicadores económicos que también confirman la rentabilidad del proyecto. También se ha realizado un análisis de sensibilidad de cómo afecta a la rentabilidad de la planta un aumento de la inversión y del gas natural y se ha comprobado como el proyecto sigue siendo rentable.

El proyecto está programado para comenzar el día 1 de octubre de 2019 y, teniendo en cuenta las tareas a realizar en el proceso, se estima que se tardará



casi quince meses en poder entregar la planta llave en mano. Concretamente se estima que el proyecto acabará el día 3 de diciembre de 2020.

A pesar de que la planta de cogeneración es un proyecto rentable económicamente, puede darse el caso de que la empresa no vea con buenos ojos que se tarde unos cuatros años y medio en recuperar la inversión. Esto se debe a que debido a la continua inestabilidad económica en la que se vive actualmente en la cual de un año a otro se pasa de crecer al 3% a estar en recesión, las empresas están empezando a pedir tiempos de retorno de la inversión de entre uno y dos años. Esto es debido a que, a pesar de que en la actualidad se prevean unos beneficios a dos años vista puede que todo cambie antes de recuperar la inversión realizada.

Esta planta de cogeneración, a pesar de presentar un tiempo de recuperación de la inversión superior a lo que solicitan las empresas actualmente, está formada por una tecnología muy madura y fiable como es la turbina de gas. Éste equipo puede funcionar sin problemas más de diez años y, además, existe la posibilidad de que pasadas las 50.000 horas de funcionamiento, la empresa fabricante deje la turbina como nueva para seguir funcionando.

Por lo tanto, se ha de concluir que la implantación de un sistema de cogeneración en la fábrica de neumáticos es un proyecto que no solo permite un mejor aprovechamiento energético sino que además permite obtener un beneficio económico, todo ello con una tecnología madura y fiable y que permitirá, por lo tanto, que la empresa recupere la inversión realizada y obtenga beneficios a pesar de que se tarde más de lo que la empresa desearía.



## 11 – Bibliografía

- [1] Michelin. *How is a tire made?* Fecha de consulta: 11 de Febrero de 2019. Disponible en: <https://www.michelinman.com/US/en/help/how-is-a-tire-made.html>
- [2] Barquilla, Juan Jesus. Fernandez de Gamboa, Jon. *Proceso de fabricación de neumáticos en la Fábrica de Michelin*. Plantas de cogeneración. Curso 2017-2018.
- [3] motor.es. *Así se fabrica un neumático Michelin*. Fecha de consulta: 11 de Febrero de 2019. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=n1X6bWAtFrM&t=121s>
- [4] National Geographic. *Megafactorias 2x07 Michelin*. 2011. Fecha de consulta: 11 de Febrero de 2019. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=ElhfCZf1UOY&t=705s>
- [5] García, Alexander. San Martín, David. *Proceso de fabricación de neumáticos. Plantas de cogeneración*. Curso 2018-2019.
- [6] De la Peña Aranguren, Víctor Francisco. Departamento de máquinas y motores térmicos. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao. Universidad del País Vasco. *La cogeneración: herramienta clave para la eficiencia energética y calidad ambiental*. 21 de Febrero de 2005.
- [7] De la Peña Aranguren, Víctor Francisco. Departamento de máquinas y motores térmicos. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao. Universidad del País Vasco. *Tratamiento de la biomasa*.
- [8] Garcia Barcos, Alexander. *Valorización energética de lodos de depuración de aguas residuales mediante ciclo Rankine para generar energía eléctrica*. Curso académico 2016-2017.
- [9] Zabala Urrutia, Laura. *Análisis de las diferentes tecnologías de centrales termosolares*. Julio 2015.
- [10] InfoPower Solar. *Andasol-1, primera planta comercial de colectores cilindro parabólicos de Europa*.
- [11] *Componentes de una instalación fotovoltaica*.
- [12] Martínez de Lafuente, Oscar. Profesor titular de ingeniería nuclear de la UPV/EHU. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao. Universidad del País Vasco. *Energía solar fotovoltaica*.



[13] García García, Alberto. García Uriarte, Jonatan. Gómez González, Iñigo. *Geotermia: definición y aplicaciones*.

[14] *Funcionamiento básico de los motores de combustión interna alternativos (MCIA) y ciclos de comparación. Refrigeración y lubricación de MCIA*.

[15] de la Peña Aranguren, Víctor Francisco. Departamento de máquinas y motores térmicos. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao. Universidad del País Vasco. *Mantenimiento de equipos energéticos*. ISBN: 978-84-9082-377-4. Enero de 2016.

[16] Fernández Díaz, Pedro. *Turbinas de gas*. Disponible en: <http://libros.redsauce.net/>

[17] *Calderas de recuperación*.

[18] Moran, Michael J. Shapiro, Howard N. *Fundamentos de termodinámica técnica*. 2ª Edición. Editorial Reverté.

[19] Catalogo Siemens. *Turbinas de gas industriales, una extensa gama de productos de 4 a 47 megavatios*. 2008.

[20] Departamento de expresión gráfica y proyectos de ingeniería. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao. Universidad del país Vasco. *Proyectos de ingeniería*. Curso 2015-2016.





## Anexos

### *Anexo 1 – Dimensionamiento de la planta de cogeneración con Engineering Equation Solver (EES)*

En este anexo se incluye tanto el código introducido en el software Engineering Equation Solver (EES) para el dimensionamiento de la planta de cogeneración como los resultados obtenidos en el propio programa.

#### **Código introducido en el software Engineering Equation Solver (EES)**

{Datos de partida}

```
{Caudal de vapor requerido, kg/s}
m_dot_v|molde=35/3,6
{Presión del vapor, bar}
P_v=15
{Estado del vapor, -}
x_v=1
{Poder calorífico del combustible, kJ/Nm3}
PCI=37000
{Potencia eléctrica contratada, kW}
W_dot_e|contratada=10000
```

{Datos de diseño de la planta}

```
{Temperatura en el desgasificador, °C}
T_desg=105
{Temperatura de los condensados, °C}
T_cond=90
{Presión de los condensados, bar}
P_cond=1
{Presión en el desgasificador, bar}
P_desg=3
{Rendimiento de la bomba, -}
eta_b=0,65
{Rendimiento de la caldera convencional}
eta_cald=0,90
```

{Calculo de los caudales de vapor en la caldera y en el desgasificador}

```
{Entalpia del vapor, kJ/kg}
h_v=Enthalpy(Water;x=x_v;P=P_v)
{Entalpia a la salida del desgasificador, kJ/kg}
h_desg=Enthalpy(Water;T=T_desg;P=P_desg)
```



{Entalpia de los condensados, kJ/kg}

$$h_{\text{cond}} = \text{Enthalpy}(\text{Water}; T = T_{\text{cond}}; P = P_{\text{cond}})$$

{Balance de masa en el desgasificado}

$$m_{\text{dot}_v} = m_{\text{dot}_v|molde} + m_{\text{dot}_v|desg}$$

{Balance de masa en el desgasificado}

$$m_{\text{dot}_v} * h_{\text{desg}} = m_{\text{dot}_v|molde} * h_{\text{cond}} + m_{\text{dot}_v|desg} * h_v$$

{Dimensionamiento de la planta con motor alterno de combustión interna}

{Temperatura de los gases a la entrada, °C}

$$T_{g|m1} = 400$$

{Temperatura de los gases a la salida, °C}

$$T_{g|m2} = 120$$

{Balance energético en la caldera}

$$W_{\text{dot}_v|m} = W_{\text{dot}_g|m}$$

{Entalpia del agua de alimentación, kJ/kg}

$$h_a = \text{Enthalpy}(\text{Water}; T = T_a; P = P_v)$$

{Potencia contenida en el vapor, kW}

$$W_{\text{dot}_v|m} = M_{\text{dot}_v} * (h_v - h_a)$$

{Rendimiento en gases}

$$\eta_{g|m} = W_{\text{dot}_g|m} / W_{\text{dot}_c|m}$$

{Rendimiento en gases, -}

$$\eta_{g|m} = 0,22$$

{Rendimiento eléctrico}

$$\eta_{e|m} = W_{\text{dot}_e|m} / W_{\text{dot}_c|m}$$

{Rendimiento eléctrico, -}

$$\eta_{e|m} = 0,45$$

{Dimensionamiento de la planta con turbina de gas}

{Temperatura de los gases a la entrada, °C}

$$T_{g|t1} = 500$$

{Temperatura de los gases a la salida, °C}

$$T_{g|t2} = 120$$

{Balance energético en la caldera}

$$W_{\text{dot}_v|t} = W_{\text{dot}_g|t}$$

{Potencia contenida en el vapor, kW}

$$W_{\text{dot}_v|t} = M_{\text{dot}_v} * (h_v - h_a)$$

{Rendimiento en gases}

$$\eta_{g|t} = W_{\text{dot}_g|t} / W_{\text{dot}_c|t}$$

{Rendimiento en gases, -}

$$\eta_{g|t} = 0,55$$

{Potencia contenida en los gases, kW}

$$W_{\text{dot}_g|t} = m_{\text{dot}_g|t} * 1,1 * (T_{g|t1} - T_{g|t2})$$

{Rendimiento eléctrico}

$$\eta_{e|t} = W_{\text{dot}_e|t} / W_{\text{dot}_c|t}$$

{Rendimiento eléctrico, -}

$$\eta_{e|t} = 0,30$$



{Potencia contenida en el combustible, kW}

$$W_{\dot{c}|t} = m_{\dot{c}|t} \cdot PCI$$

{Redimensionamiento con los datos de la turbina seleccionada}

{Rendimiento eléctrico, -}

$$\eta_{e|real} = 0,348$$

{Caudal másico de gases, kg/s}

$$m_{\dot{g}|real} = 39,4$$

{Temperatura de los gases a la entrada, °C}

$$T_{g|real} = 555$$

{Potencia eléctrica, kW}

$$W_{\dot{e}|real} = 12900$$

{Potencia contenida en los gases, kW}

$$W_{\dot{g}|real} = m_{\dot{g}|real} \cdot 1,1 \cdot (T_{g|real} - T_{g|t2})$$

{Rendimiento eléctrico}

$$\eta_{e|real} = W_{\dot{e}|real} / W_{\dot{c}|real}$$

{Potencia contenida en el combustible}

$$W_{\dot{c}|real} = m_{\dot{c}|real} \cdot PCI$$

{Calculo del rendimiento eléctrico equivalente}

{Disponibilidad, h/año}

$$t = 8000$$

{Energía eléctrica anual, kJh/año}

$$E = W_{\dot{e}|real} \cdot t$$

{Energía consumida anual, kJh/año}

$$Q = W_{\dot{c}|real} \cdot t$$

{Energía térmica anual, kJh/año}

$$V = W_{\dot{g}|real} \cdot t$$

{Rendimiento eléctrico equivalente, -}

$$R_{EE} = E / (Q - V / 0,9)$$

{Dimensionamiento de la bomba de agua de alimentación}

{Temperatura del agua de alimentación, °C}

$$T_a = T_{desg}$$

{Volumen específico del agua, m<sup>3</sup>/kg}

$$v_e = 1/1000$$

{Potencia teórica de la bomba, kW}

$$W_{\dot{b}|teorica} = M_{\dot{v}} \cdot v_e \cdot (P_v - P_{desg}) \cdot 100$$

{Rendimiento de la bomba}

$$\eta_b = W_{\dot{b}|teorica} / W_{\dot{b}|real}$$

{Calculo del combustible a utilizar en la caldera convencional}

{Potencia a generar en otra caldera, kW}



$W_{\dot{g}|caldera} = W_{\dot{g}|t} - W_{\dot{g}|real}$   
{Rendimiento de la caldera}  
 $\eta_{cald} = W_{\dot{g}|caldera} / W_{\dot{c}|caldera}$   
{Potencia contenida en el combustible, kW}  
 $W_{\dot{c}|caldera} = m_{\dot{c}|caldera} * PCI$   
{Potenci eléctrica que se puede vender, kW}  
 $W_{\dot{e}|venta} = W_{\dot{e}|real} - W_{\dot{e}|contratada}$   
{Rendimiento de la caldera}  
 $\eta_{cald} = W_{\dot{g}|t} / W_{\dot{c}|antes}$   
{Ahorro de potencia en el combustible, kW}  
 $W_{\dot{c}|ahorro} = W_{\dot{c}|antes} - W_{\dot{c}|caldera}$

### Resultados obtenidos en el software Engineering Equation Solver (EES)

E=1,032E+08  
 $\eta_b = 0,65$   
 $\eta_{cald} = 0,9$   
 $\eta_{e|m} = 0,45$   
 $\eta_{e|real} = 0,348$   
 $\eta_{e|t} = 0,3$   
 $\eta_{g|m} = 0,22$   
 $\eta_{g|t} = 0,55$   
 $h_a = 441,2$   
 $h_{cond} = 377$   
 $h_{desg} = 440,3$   
 $h_v = 2792$   
 $m_{\dot{c}|caldera} = 0,1385$   
 $m_{\dot{c}|real} = 1,002$   
 $m_{\dot{c}|t} = 1,153$   
 $m_{\dot{g}|real} = 39,4$   
 $m_{\dot{g}|t} = 56,14$   
 $m_{\dot{v}} = 9,984$   
 $m_{\dot{v}|desg} = 0,262$   
 $m_{\dot{v}|molde} = 9,722$   
PCI=37000  
P\_cond=1  
P\_desg=3  
P\_v=15  
Q=2,966E+08  
R\_EE=0,8002  
t=8000  
T\_a=105  
T\_cond=90  
T\_desg=105

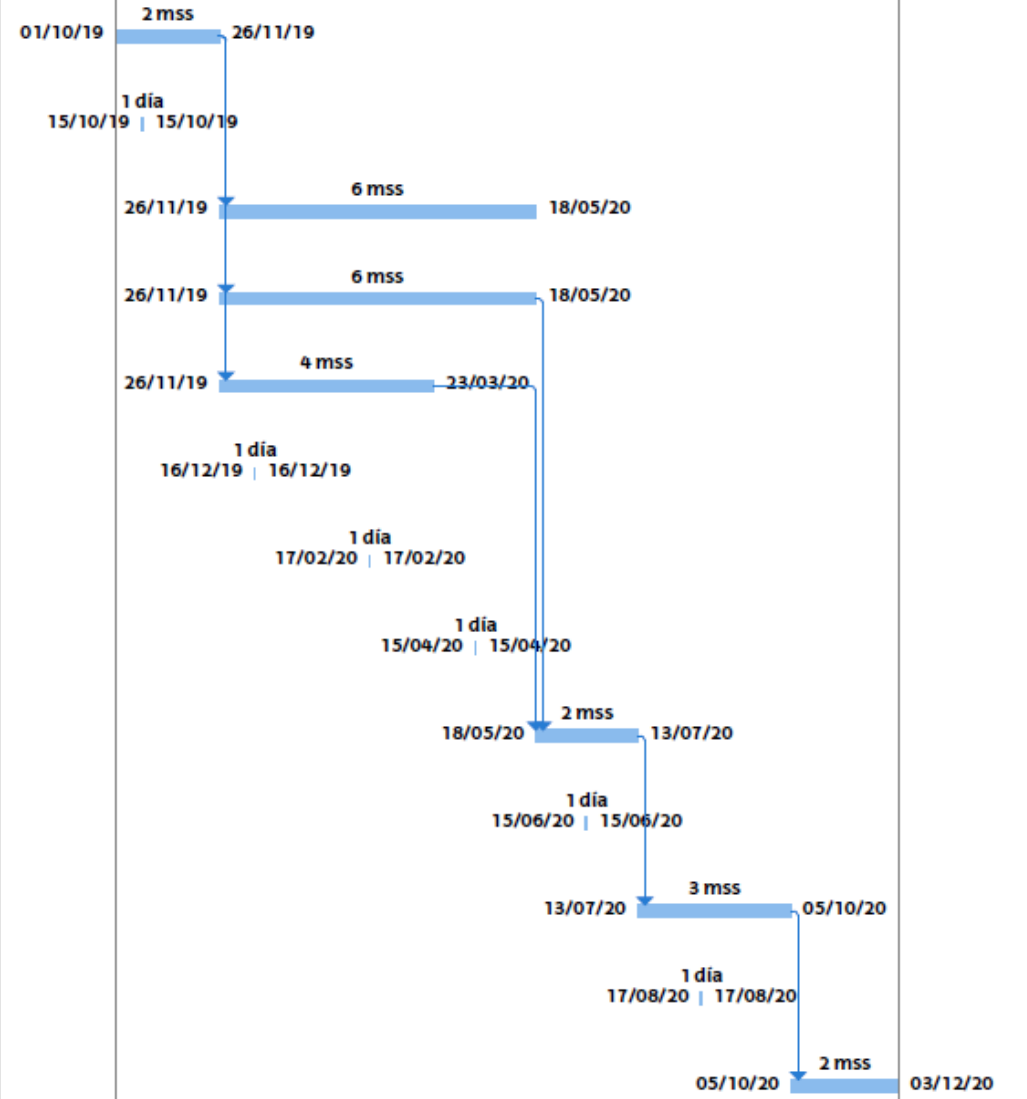


T\_g|m1=400  
T\_g|m2=120  
T\_g|real=555  
T\_g|t1=500  
T\_g|t2=120  
V=1,508E+08  
ve=0,001  
W\_dot\_b|real=18,43  
W\_dot\_b|teorica=11,98  
W\_dot\_c|ahorro=20948  
W\_dot\_c|antes=26073  
W\_dot\_c|caldera=5126  
W\_dot\_c|m=106663  
W\_dot\_c|real=37069  
W\_dot\_c|t=42665  
W\_dot\_e|contratada=10000  
W\_dot\_e|m=47998  
W\_dot\_e|real=12900  
W\_dot\_e|t=12800  
W\_dot\_e|venta=2900  
W\_dot\_g|caldera=4613  
W\_dot\_g|m=23466  
W\_dot\_g|real=18853  
W\_dot\_g|t=23466  
W\_dot\_v|m=23466  
W\_dot\_v|t=23466  
x\_v=1

## *Anexo 2 – Diagrama de Gantt realizado con Microsoft Project*

En este anexo se incluye el Diagrama de Gantt obtenido al incluir la planificación realizada en el software Microsoft Project.

Id	Nombre de tarea	Duración	Comienzo	Fin	Predecesoras	io	01 septiem	01 novemb	01 enero	01 marzo	01 mayo	01 Julio	01 septiem	01 novemb	01 enero											
						29 Jul	26 ago	23 sep	21 oct	18 nov	16 dic	13 ene	10 feb	9 mar	6 abr	4 ma	01 Jun	29 Jun	27 Jul	24 ago	21 sep	19 oct	16 nov	14 dic	1 ene	
1	Proyecto	15 mss	mar 01/10/19	jue 03/12/20																						
2	Ingeniería básica	2 mss	mar 01/10/19	mar 26/11/19																						
3	Reunion de control 1	1 día	mar 15/10/19	mar 15/10/19																						
4	Ingeniería de detalle	6 mss	mar 26/11/19	lun 18/05/20	2																					
5	Compra de equipos	6 mss	mar 26/11/19	lun 18/05/20	2																					
6	Obra civil	4 mss	mar 26/11/19	lun 23/03/20	2																					
7	Reunion de control 2	1 día	lun 16/12/19	lun 16/12/19																						
8	Reunion de control 3	1 día	lun 17/02/20	lun 17/02/20																						
9	Reunion de control 4	1 día	mié 15/04/20	mié 15/04/20																						
10	Montaje mecánico	2 mss	lun 18/05/20	lun 13/07/20	5,6																					
11	Reunion de control 5	1 día	lun 15/06/20	lun 15/06/20																						
12	Montaje eléctrico y de Instrumentación	3 mss	lun 13/07/20	lun 05/10/20	10																					
13	Reunion de control 6	1 día	lun 17/08/20	lun 17/08/20																						
14	Puesta en marcha	2 mss	lun 05/10/20	jue 03/12/20	12																					



Proyecto: Planificación Fecha: sáb 13/04/19	Tarea		Tareas externas		Tarea manual		Sólo fin	
	División		Hito externo		Sólo duración		Fecha límite	
	Hito		Tarea inactiva		Informe de resumen manual		Progreso	
	Resumen		Hito inactivo		Resumen manual		Progreso manual	
	Resumen del proyecto		Resumen inactivo		Sólo el comienzo			