

Trabajo Fin de Máster

Máster en Sistemas de Energía Térmica

Análisis Paramétrico de las Calderas Pirotubulares

Autor: Gregorio Ojuelos Moreno

Tutor: José Julio Guerra Macho

Dpto. Ingeniería Energética  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2023





Trabajo Fin de Máster  
Máster Sistemas de Energía Térmica

# **Análisis Paramétrico de las Calderas Piro-tubulares**

Autor:

Gregorio Ojuelos Moreno

Tutor:

José Julio Guerra Macho  
Catedrático de Universidad

Dpto. Ingeniería Energética  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2023



Trabajo Fin de Máster: Análisis Paramétrico de las Calderas Piro-tubulares

Autor: Gregorio Ojuelos Moreno

Tutor: José Julio Guerra Macho

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2023

El Secretario del Tribunal



*A mi tutor, por guiarme en este trabajo y ser comprensible.*

*A mi pareja por ser mi apoyo, más aún estos últimos meses.*

*A mi madre y a mis tíos. Dedicado a mi padre. Te echo de menos.*



# Resumen

---

En el presente trabajo se realiza un análisis paramétrico de diferentes características de las calderas pirotubulares. Dicho análisis se ha llevado a cabo utilizando datos de modelos de calderas pirotubulares reales, obtenidos a partir de catálogos o webs de fabricantes.

La primera fase del proyecto ha consistido en realizar una revisión bibliográfica de la tecnología de calderas pirotubulares y acuotubulares. Se puso en contexto a la caldera dentro de una instalación de vapor, exponiendo la función del resto de componentes y describiendo los límites de del uso del vapor en una instalación en cuanto a presión.

Posteriormente, se analizaron con más detalle diferentes aspectos de las calderas pirotubulares, pasando por los accesorios que permiten que funcione, las diferentes tipologías de caldera en función de la aplicación, procedimientos que hay que seguir durante la instalación y el mantenimiento, y parámetros característicos que son determinados a la hora de acudir al mercado a por un modelo.

Una vez estudiadas las diferentes características de las calderas pirotubulares, se pasó a recopilar dichos datos de los catálogos de los fabricantes. Con esta información se compuso una base de datos.

En base a los datos recogidos, se realizaron una serie de análisis paramétricos entre diferentes variables para estudiar sus porcentajes y como se relacionaban. Para asegurar que los análisis fueran representativos, se descartaron aquellos que involucraban parámetros los cuales no estaban disponibles en suficiente número de modelos.

Por último, a raíz de estos análisis se argumentan los resultados y se sacan una serie de conclusiones.



# Abstract

---

In the present work a parametric analysis of different characteristics of firetube boilers is performed. This analysis has been carried out using data from real firetube boiler models, obtained from manufacturers' catalogues and websites.

The first phase of the project consisted of making a bibliographic review of the technology of firetube and watertube boilers. The boiler was put into context within a steam system, exposing the role of the rest of the components and describing the limits of use of steam in an installation in terms of pressure.

Subsequently, different aspects of firetube boilers were analysed in more detail, including the accessories that allow it to operate, the different types of boilers depending on the application, procedures that must be followed during installation and maintenance, and critical parameters that are determined before searching in the market.

Once the different characteristics of the firetube boilers had been studied, said data was collected from the manufacturers' catalogues. With this information a database was generated.

Based on the data collected, a series of parametric analyses were carried out between different variables to study their percentages and how they were linked. To ensure that the analyses were representative, those involving parameters that were not available in a sufficient number of models were discarded.

Finally, the result of these analyses are discussed and a series of conclusions are drawn.



# Índice

---

<b>Agradecimientos</b> .....	<b>7</b>
<b>Resumen</b> .....	<b>9</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>11</b>
<b>Índice</b> .....	<b>13</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1. <i>Introducción</i> .....	1
1.2. <i>Descripción de una instalación de vapor</i> .....	2
1.3. <i>Elementos de una instalación de vapor</i> .....	6
1.4. <i>Organización y contenido</i> .....	9
<b>2 GENERADOR DE VAPOR PIROTUBULAR</b> .....	<b>11</b>
2.1. <i>Introducción</i> .....	11
2.2. <i>Descripción de un generador de vapor pirotubular</i> .....	11
2.3. <i>Clasificación y Aplicaciones</i> .....	19
2.4. <i>Parámetros característicos</i> .....	23
2.5. <i>Ejemplo de selección</i> .....	25
2.6. <i>Instalación y mantenimiento</i> .....	26
<b>3 ESTUDIO DE MERCADO</b> .....	<b>30</b>
3.1. <i>Introducción</i> .....	30
3.2. <i>Parámetros de la base de datos</i> .....	30
3.3. <i>Fabricantes y modelos</i> .....	33
3.4. <i>Base de datos</i> .....	34
3.5. <i>Análisis paramétrico</i> .....	36
<b>4 RESUMEN Y CONCLUSIONES</b> .....	<b>46</b>
4.1. <i>Resumen</i> .....	46
4.2. <i>Conclusiones</i> .....	46



# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de una instalación de vapor [1].....	2
Figura 2. Disposición de calderas en paralelo[3].....	3
Figura 3. Funcionamiento de una caldera acuotubular [3] .....	5
Figura 4. Diagrama de funcionamiento de un desaireador [4] .....	7
Figura 5. Diagrama de funcionamiento de un purgador [6] .....	8
Figura 6. Fotografía de una placa de una caldera [8] .....	11
Figura 7. Mecanismo de control de nivel [2].....	13
Figura 8. Manómetro de una caldera pirotubular [2].....	13
Figura 9. Válvula de parada en una caldera pirotubular [2] .....	15
Figura 10. Válvula de seguridad de una caldera pirotubular [2] .....	15
Figura 11. Tipos de cámara de inversión de gases [3].....	16
Figura 12. Diagrama de funcionamiento de un tanque flash [9] .....	17
Figura 13. Sistema de purgas con precalentamiento del agua de alimentación.....	17
Figura 14. Diagrama de funcionamiento de un atemperador [11].....	18
Figura 15. Diagrama de corrientes en una caldera con economizador [11] .....	19
Figura 16. Caldera pirotubular tipo Lancashire [3] .....	20
Figura 17. Diseño de una caldera pirotubular vertical [12] .....	20
Figura 18. Ciclo de vida de la biomasa [13].....	21
Figura 19. Esquema de una cogeneración con turbina de vapor a contrapresión [14] .....	23
Figura 20. Esquema de una cogeneración con turbina de vapor de condensación y extracciones [15] .....	23
Figura 21. Incrustaciones en una caldera de vapor [2] .....	27
Figura 22. N° de modelos de calderas pirotubulares por fabricante .....	33
Figura 23. Porcentaje de parámetros obtenidos para cada modelo.....	35
Figura 24. Porcentaje de parámetros por fabricante .....	36
Figura 25. Distribución de modelos de calderas pirotubulares por Países de fabricación.....	36
Figura 26. Distribución de modelos de calderas pirotubulares por Fluido caloportador .....	37
Figura 27. Distribución de modelos de calderas pirotubulares por Combustible .....	37
Figura 28. Porcentaje de modelos que usan combustibles renovables y no renovables .....	38
Figura 29. Distribución de modelos de calderas pirotubulares por Disposición del haz tubular.....	39
Figura 30. Porcentaje de modelos con Bomba de alimentación incluida .....	39
Figura 31. Potencia frente a Presión nominal de cada modelo de caldera pirotubular .....	40
Figura 32. Caudal de fluido frente a Presión nominal de cada modelo de caldera pirotubular .....	41
Figura 33. Rendimiento nominal frente a Presión nominal de cada modelo de caldera pirotubular .....	41
Figura 34. Rendimiento nominal frente a Potencia nominal de cada modelo de caldera pirotubular .....	42
Figura 35. Potencia nominal frente a Número de pasos de cada modelo de caldera pirotubular .....	42
Figura 36. Presión nominal frente a Número de pasos de cada modelo de caldera pirotubular .....	43
Figura 37. Rendimiento frente a Número de pasos de cada modelo de caldera pirotubular .....	43
Figura 38. Longitud frente a Diámetro exterior de cada modelo de caldera pirotubular.....	44
Figura 39. Peso frente a Potencia nominal de cada modelo de caldera pirotubular .....	44
Figura 40. Potencia nominal frente a Diámetro de salida de gases de cada modelo de caldera pirotubular ...	45



# 1 INTRODUCCIÓN

---

## 1.1. Introducción

El panorama energético actual está sufriendo un cambio en su modelo debido al creciente coste de las fuentes de energía, los cada vez más escasos combustibles fósiles y la tendencia a reducir el impacto ambiental de las actividades industriales. Para mejorar en cada uno de estos aspectos existe el estudio de la eficiencia energética. Este área tiene muchas vertientes dependiendo del ámbito en el que se quiera implementar (residencial, terciario o industrial) y el tipo de energía que se busque ahorrar.

Este trabajo se va a enfocar en el estudio del estado del arte de uno de los equipos principales en gran parte de la industrial mundial, las calderas pirotubulares. También se pueden llamar generadores pirotubulares.

Una caldera no es más que un intercambiador de calor en cuyo interior se produce una reacción de combustión. Posteriormente los gases calientes productos de dicha reacción le transmiten calor por diferencia de temperatura a un fluido caloportador, que puede ser aire, gases calientes, agua sobrecalentada o fluidos sintéticos como aceite térmico, que posteriormente transportan esa energía a otros lugares de la planta.

El vapor es el fluido caloportador más utilizado en las instalaciones industriales que requieren de energía en forma de calor para sus procesos. Esta energía se puede transferir a otros fluidos, inyectar el vapor directamente al proceso o proporcionar fuerza motriz para generar una potencia. Este último uso es el empleado para la generación de energía eléctrica mediante turbinas de vapor.

En el caso de que se quiera transferir el calor a otro fluido, se puede realizar mediante diferentes equipos. El más común es el intercambiador de calor, aunque también se pueden usar una camisa o un serpentín.

Entre las industrias que usan vapor de proceso se encuentran la química y petroquímica, textil, alimentaria, papelera, farmacéutica, automovilística y aeroespacial entre otras.

El vapor es fluido caloportador más extendido debido a las siguientes características:

- Rango de temperaturas de operación: el vapor en sus diversas formas tiene un rango de operación desde los 100 °C hasta > 400 °C. Esto es debido a que se puede usar tanto vapor saturado como sobrecalentado. El uso de vapor saturado es preferible, ya que al estar en estado de cambio de fase, tiene un mayor coeficiente de película convectivo, lo que facilita la transferencia de energía. Debido a esto en general no se usa el vapor para procesos que requieran una temperatura mayor de 200 °C, porque los costes debido al aumento de la presión de saturación no compensan y se prefiere usar fluidos como aceites térmicos o sales fundidas. Estos fluidos solo pueden operar a rangos de temperaturas elevados debido a que tienen altas temperaturas de congelación.

- Viscosidad: el vapor es un fluido poco viscoso, lo cual disminuye la pérdida de carga, facilitando su transporte y bajando los costes de bombeo. La viscosidad de los aceites térmicos y las sales fundidas es más elevada y aumenta exponencialmente conforme disminuye la temperatura.

- Calor específico: este parámetro representa la energía que almacena un fluido por unidad de masa. Si se multiplica por la densidad tendríamos la energía por volumen. Un alto coeficiente permite disminuir la red de transporte y los costes de bombeo. En el caso del vapor es bastante elevado.

- Coeficiente de transferencia: este parámetro representa la facilidad que tiene un fluido para transmitir calor. Cuanto mayor es este parámetro más se puede reducir el tamaño de

los equipos de intercambio de energía. El vapor tiene un coeficiente elevado debido a que se trata de un fluido de cambio de fase.

- Abundante y barato en general, aunque puede variar según la zona.
- No agresivo, inflamable ni tóxico

Los calderas que emplean aceite térmico como fluido caloportador son similares en cuanto a construcción a las calderas de vapor. Las principales diferencias que se encuentran son a nivel de seguridad, ya que al no existir un cambio de fase se trabaja a un presión menor que en el caso del vapor. Además, el rendimiento térmico de la instalación suele ser mayor ya que no existen las pérdidas por recuperación de condensados [1].

## 1.2. Descripción de una instalación de vapor

Una instalación de vapor se organiza en diferentes bloques según la función de los equipos. Estos bloques serían el de generación, la red de distribución del vapor, el de consumo y la red de condensados. Un esquema del ciclo se puede apreciar en la Figura 1.



Figura 1. Esquema de una instalación de vapor [1].

El agua entraría al ciclo pasando varios equipos de tratamiento, en los cuales se eliminarían sustancias potencialmente dañinas para el proceso, además de gases disueltos. Después pasaría a la caldera, donde se calentaría el agua desde temperatura ambiente hasta la temperatura de saturación. Las calderas suelen tener varias purgas para eliminar el agua rica en sales, que se va depositando al producirse la evaporación. Esta agua de purgas tiene mucha energía ya que se encuentra a temperatura de saturación, por lo que se suele aprovechar precalentando el agua de alimentación o generando vapor a menor presión mediante un tanque flash.

Las dos tipologías principales de calderas de vapor son las calderas pirotubulares y acuotubulares. Las calderas se clasifican en un tipo u otro dependiendo de cual sea el fluido que circule por los tubos, pudiendo ser los gases de combustión (pirotubulares) o el fluido de trabajo (acuotubulares). El otro fluido circulará por el exterior de los tubos, dentro del cuerpo de la caldera.

En una instalación de vapor con una alta demanda o con grandes variaciones en la misma pueden llegar a usarse varias calderas de vapor para ajustarse mejor a dichas necesidades. El límite aproximado de caudal de vapor que puede generar una caldera pirotubular está entorno a los 30.000 kg/h. Para cargas superiores se requerirán varias calderas en paralelo. Las calderas acuotubulares son

capaces de producir mayores caudales de vapor, sin embargo es preferible utilizar varias calderas pirotubulares ya que es menos costoso.

Existe otro tipo de calderas llamadas de vaporización instantánea que son utilizadas principalmente en la industria alimentaria. Se caracterizan por ser capaces de aportar vapor a presiones medias de forma veloz. Para que la respuesta sea lo más rápida posible son muy compactas y contienen muy poco volumen de agua. Debido a esto tienen rendimientos más bajos que las calderas pirotubulares y acuotubulares, aunque se prioriza la velocidad de respuesta al rendimiento debido a que funcionan para satisfacer demandas pequeñas e intermitentes, no elevadas y constantes [2]. Al ser de una aplicación tan diferente de las calderas pirotubulares y acuotubulares, no se van a estudiar en este trabajo.

A la hora de diseñar una instalación con varias calderas, hay que tener en cuenta que el vapor fluye de dónde hay más presión a dónde hay menos, por lo que si el punto de consumo está situado en un extremo de la línea de vapor, las calderas que estén más alejadas tendrán que producir mayor presión que las calderas que estén más cerca. Esto supone un problema, ya que si la caldera más cercana está produciendo a plena carga, haría que las demás estuvieran produciendo con sobrecarga. Las calderas pueden producir por encima de la carga nominal en momentos puntuales para abastecer una demanda repentina, sin embargo es desaconsejable su uso por un tiempo prolongado dado que disminuye considerablemente la vida útil de la caldera. Para evitar esto se intentan diseñar las descargas de la línea en puntos intermedios, tal y como se aprecia en la Figura 2.

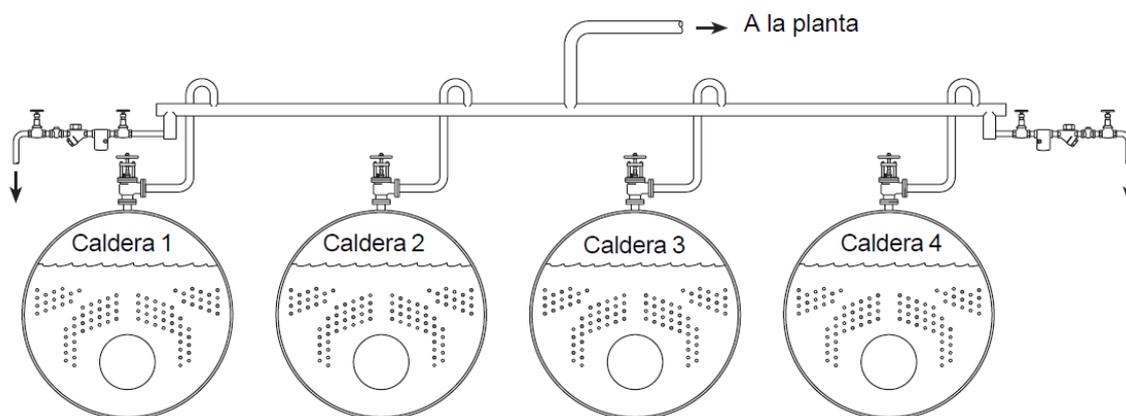


Figura 2. Disposición de calderas en paralelo[3]

Las calderas tienen un mayor rendimiento cuando trabajan cerca de su carga nominal, así que es preferible tener pocas calderas funcionando a régimen nominal que muchas a carga parcial, aunque esto muchos veces no es posible debido a los perfiles de demanda de la planta.

Las tuberías de vapor siempre están aisladas ya que con los caudales que se manejan en la industria suele ser una inversión muy rentable, ya que el coste es bastante reducido en comparación con las pérdidas que evitan. En la Tabla 1 se muestran distintos materiales aislantes y sus características.

El tipo de aislamiento dependerá principalmente de la temperatura al cual se le va a someter al material, ya que los materiales a considerar suelen tener conductividades similares. La reducción de las pérdidas de calor no es línea con el diámetro del espesor. Cada centímetro extra de aislamiento que se instale disminuirá un poco menos las pérdidas que el centímetro anterior. Por esto motivo obtendremos un espesor óptimo teniendo en cuenta el coste del aislante.

Las líneas de vapor de las calderas convergen en el colector, desde dónde se distribuye el vapor. En una planta de grandes dimensiones suelen existir varios colectores a distintas presiones para abastecer a todos consumidores. Desde el punto de vista del funcionamiento de una planta es conveniente tener diámetros de tubería grandes, ya que disminuyen la velocidad del vapor y por lo tanto las pérdidas de carga, además de que favorece la deposición del condensado por gravedad. Otras

razones a tener en cuenta para disminuir la velocidad del vapor es el nivel de ruido y el ajuste de los elementos de conexión de la línea. Además de estos motivos, la velocidad del vapor está limitada en planta por seguridad. Sin embargo un mayor tamaño de las tuberías significa una mayor inversión, por lo que hay que encontrar un compromiso entre ambos [1]. Para retirar el condensado que se genera en el colector se instalan una serie de purgadores que drenan por gravedad.

Tipo de material	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Temperatura cara caliente (°C)	Temperatura cara fría (°C)	Conductividad (kcal/m <sup>3</sup> h <sup>2</sup> C)	
Coquilla de lana mineral	100	300	35	0,048	
		400	35	0,056	
Manta de fibra mineral	50	100	25	0,05	
		200	25	0,05	
		180	30	0,045	
		70	220	30	0,049
		100	300	35	0,051
		125	400	35	0,063
		500	40	0,059	
Manta de fibra de roca	100	300	35	0,048	
		400	35	0,056	
Espuma de poliuretano	-	-	38	0,036	

Tabla 1. Tipos de aislamiento y características para líneas de distribución

Las salidas del colector hacia los consumidores siempre se realizan por la parte superior del colector, para favorecer que se suministre solo vapor seco. En los procesos en los cuales solo se requiere la energía y no el vapor, el circuito se cierra retornando el agua condensada al depósito de acumulación, pasando antes por el desgasificador.

La presión del vapor en una instalación viene marcada por la temperatura del proceso a satisfacer, ya que en estado saturado a cada presión de vapor le corresponde una única temperatura. La temperatura del vapor va a ser la suma de la temperatura del proceso más las pérdidas térmicas de la instalación y la cercanía de temperaturas en el intercambiador.

Para generación eléctrica se suele usar vapor sobrecalentado (o recalentado), ya que tiene una mayor entalpía que el vapor saturado, y al convertir la energía térmica en energía mecánica mediante una turbina, no hay ninguna penalización de que el vapor sobrecalentado tenga menor coeficiente de película convectivo que el vapor saturado.

El tercer tipo de vapor es el vapor húmedo, el cual se encuentra en la campana (zona de cambio de fase), pero su título de vapor es menor que 1. Esto quiere decir que parte del agua está en forma líquida, lo cual además de dificultar la transferencia de energía, genera problemas mecánicos en los equipos debido a la velocidad con la que circula. Estas gotas líquidas se forman debido a que se pierde parte de la energía en la red de vapor mediante rozamiento y pérdidas térmicas. Para evitar problemas se instalan a lo largo de la red de vapor una serie de purgadores, que eliminan de la red el agua en estado líquido manteniendo el vapor seco.

Previamente a un purgador se instala un equipo llamado separador, que es un equipo por donde pasa el vapor donde en cuyo interior se producen cambios bruscos de dirección con el objetivo de

separar las gotas de líquido del vapor seco. El agua sale por debajo por gravedad hacia un purgador mientras que el vapor continuará su recorrido por la línea. Se considera vapor seco a uno que tenga una sequedad de entorno al 96-99% [3].

Dada una caldera pirotubular, la presión máxima a la que puede operar viene marcada por la tensión que genera dicha presión. Dicha tensión se denomina tensión de circunferencia, y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Tensión de Circunferencia} = \frac{\text{Presión} * \text{Diámetro interior de la caldera}}{2 * \text{Grosor del material de la caldera}}$$

De ella podemos deducir que a mayor diámetro de la caldera mayor tensión, pudiendo disminuirla aumentando el grosor. Sin embargo, aumentar el grosor tiene otros inconvenientes. Lo primero es que obviamente se necesita una mayor cantidad de material, lo cual encarece los costes de fabricación. También dificulta el proceso de curvado, al ser más complicado curvar una capa gruesa que fina. Por último, este aumento de grosor hace que la disipación de calor por conducción sea más lenta, lo cual puede hacer que se sobrecaliente y se hunda. Debido a esto se ha comprobado empíricamente que el grosor máximo del tubo hogar no puede superar los 18-20 mm, con lo que obtenemos dada la ecuación anterior una presión máxima para las calderas pirotubulares de alrededor de 25-27 bar [3]. Para presiones (y temperaturas) superiores se necesitará usar una caldera acuotubular.

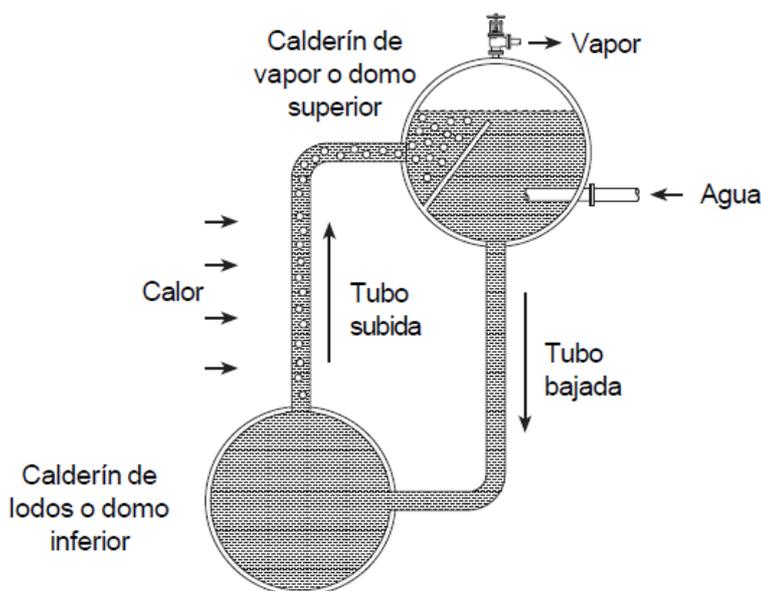


Figura 3. Funcionamiento de una caldera acuotubular [3]

A diferencia de las calderas pirotubulares, en las cuales son los humos los que circulan por el interior de los tubos mientras que el agua se encuentra en la carcasa, en las calderas acuotubulares se invierten las posiciones. La fuente de calor en forma de llamas se localiza en el hogar, que calienta los tubos que están alrededor de las paredes. El agua circula en este tipo de calderas de forma natural, por diferencia de presión. Siguiendo la Figura 3, el agua de alimentación fría entra al calderín superior y desciende por el tubo al tener una densidad mayor que el agua caliente. Después se va calentando y se generan burbujas de vapor, lo cual hace que disminuya su densidad y ascienda por otro tubo hasta el calderín superior, donde el vapor sale del circuito. A mayor presión, la diferencia de densidad entre el agua y el vapor saturado es menor, por lo que se necesitan mayores distancias entre ambos calderines para alcanzar el mismo nivel de circulación.

Para producir vapor sobrecalentado se hace pasar el vapor saturado a la salida del calderín de nuevo por el hogar. Es posible alcanzar presiones superiores a los 100 bar porque la tensión que se genera alrededor de los tubos por donde circula el agua es mucho menor que alrededor del cuerpo de una caldera pirotubular, debido a la diferencia de diámetro. A pesar de que este tipo de calderas tienen un rendimiento térmico mayor que el de las calderas pirotubulares, solo se suelen utilizar cuando se requiere vapor saturado a mayor presión y temperatura, o vapor sobrecalentado. Esto es debido a que el pequeño aumento de rendimiento no compensa el aumento en los costes asociados a la construcción de esta tipología de calderas. Además, se requiere un control más severo del agua de alimentación.

En el caso de que el fluido caloportador sea un fluido térmico como aceite solo se pueden utilizar calderas pirotubulares debido a las altas temperaturas de trabajo que necesitan dichos fluidos debido a su alto punto de congelación y viscosidad.

### 1.3. Elementos de una instalación de vapor

Una instalación de vapor es un conjunto de equipos que cumplen la función de abastecer las necesidades de energía térmica de unos consumidores. A continuación se estudian cada uno de ellos:

- Caldera

Equipo que se encarga de generar el vapor que posteriormente se transportará a los consumidores finales. Como se estudiará en los apartados siguientes, existen distintas tipologías de calderas para diferentes aplicaciones. Sin embargo, todas tienen en común que consisten en una máquina en la cual se produce una reacción exotérmica de combustión, y cuya energía generada es traspasada a un fluido caloportador.

- Separadores de gota

Como su nombre indica, los separadores de gota son equipos que se ocupan de eliminar las pequeñas condensaciones de agua que arrastra la corriente de vapor por el circuito de transporte. Su misión es complementaria a la de los purgadores, ya que estos se ocupan de retirar el condensado que ya se ha formado, mientras que los separadores son capaces de retirar las gotas de agua más pequeñas.

Existen diferentes tipologías de separadores de gotas en función del mecanismo de separación, que puede ser por coalescencia de las gotas de agua, filtros...entre otros.

- Equipos finales

Los equipos finales son el motivo por el cual se instala un sistema de vapor. Se trata de los consumidores térmicos a los cuales se abastece con el fluido caloportador proveniente de la caldera. Este fluido entra a los equipos de intercambio con una alta entalpía y sale con una más baja, después de haber transferido la energía.

Estos equipos finales serán diferentes dependiendo de en qué tipo de aplicación esté implementada la instalación de vapor. Desde diferentes industrias al sector terciario.

- Sistema de tratamiento de agua

El sistema de tratamiento de agua está formado por un conjunto de equipos cuya función es mantener el agua del sistema de vapor en unos niveles aceptables de gases, sólidos disueltos y otros compuestos. Estos niveles pueden venir marcados por los fabricantes de los equipos o por la normativa de funcionamiento. Se entrará más en detalle de los problemas que pueden surgir en una instalación que no realiza un tratamiento de agua adecuado en el apartado 2.6.

- Bomba de alimentación

Su función es la de aportar agua a la caldera para mantener el nivel lo más constante posible. El caudal de agua de alimentación debe ser superior al del vapor generado porque hay que tener en cuenta las purgas de caldera.

- Desgasificador

Es un equipo de tratamiento de agua que se encarga de eliminar el oxígeno, el anhídrido carbónico y otros gases disueltos en el agua antes de que sean bombeados hacia la caldera. Eliminar estos gases es importante ya que son los principales culpables de los problemas de corrosión que aparecen en el circuito de agua caliente.

Este dispositivo elimina estos gases aprovechándose del mismo fenómeno físico que causa la corrosión. La solubilidad de estos gases sigue aproximadamente el dibujo de una curva parabólica positiva cuando la representamos en función de la temperatura, encontrándose su vértice (valor más pequeño) a temperaturas entorno a 100 °C (cercano a la temperatura de ebullición del agua). Es por eso que cuando el agua se evapora en la caldera que suelta esos gases y pueden producir corrosión.

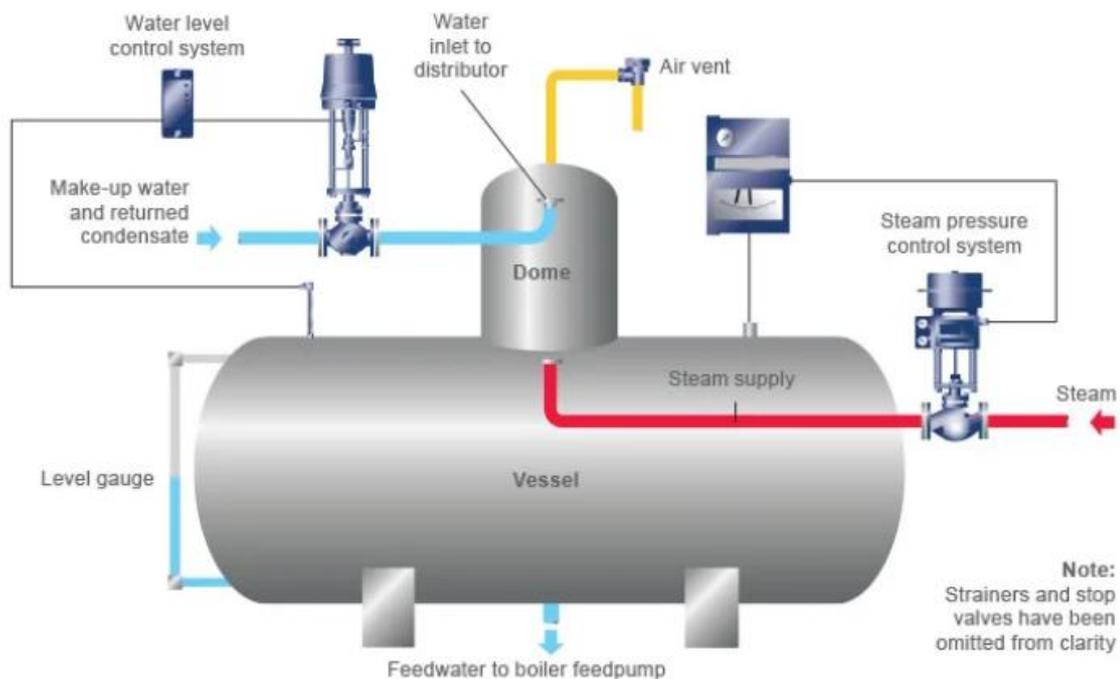


Figura 4. Diagrama de funcionamiento de un desaireador [4]

Tal y como se muestra en la Figura 4, el agua entra al desaireador por la parte superior del desgasificador, llamado cabezal o domo, dónde se genera una cascada o se atomiza en pequeñas gotas para favorecer la transferencia de calor. Al mismo tiempo se está inyectando una pequeña cantidad de vapor por el inferior del domo para que vaya a contracorriente que el agua que cae, transfiriéndole calor para que alcance la temperatura de saturación y suelte los gases disueltos, que son arrastrados a la atmósfera con el vapor restante mediante un venteo en la parte superior del domo [2].

Si se aumenta el volumen del desaireador, puede hacer también la función de depósito de alimentación, ahorrando costes. La ventaja que la configuración en dos equipos separados es que el desaireador sirve como depósito de inercia que tiene almacenada cierta cantidad de agua (menor que el depósito principal) en caso de que haya algún problema en el tanque de condensados, por lo que te aporta más flexibilidad y disponibilidad en la operación de la planta [5].

- **Sensores**

Se instalan sensores de diferentes parámetros en los puntos críticos del sistema de vapor. Los más comunes son los de presión, temperatura y caudal, aunque en ciertos puntos también se pueden medir otras variables como la conductividad.

Estos sensores sirven tanto a la función de control como a la de seguridad, dependiendo del lugar en el que se haya colocado, aunque hay muchos sensores que tienen la doble función. En los puntos más críticos de la instalación se suelen instalar sensores de forma redundante, es decir, más a uno por cada tipología, para que en caso de que uno falle tener otro de contraste. La configuración más segura suele ser tener 3 sensores, ya que con dos se puede tener la duda de cual está midiendo correctamente.

- **Valvulería**

A lo largo del circuito de agua existen válvulas que tienen como función la interrupción completa o parcial del flujo del vapor. Estas válvulas están instaladas en puntos clave para el control de la instalación, como a las entradas y salidas de equipos importantes, o permitiendo bypasses.

Otras válvulas solo son necesarias en momentos de parada o arranque de la caldera, dadas las condiciones especiales de operación que supone.

Y por último están las válvulas de seguridad, que están taradas a una presión un poco mayor de la de trabajo para abrir y liberar vapor disminuyendo la presión del sistema en caso de sobrepresión.

- **Purgadores**

Cuando el vapor circula por los conductos de la instalación se produce una pérdida de carga por fricción con las tuberías u otros elementos del circuito. Ese fenómeno da lugar a pérdidas térmicas del vapor, que es condensado parcialmente.

La presencia de gotas de vapor en el circuito es perjudicial para la instalación, ya que a las velocidades a las que va el flujo de vapor, las gotas golpean en los codos y demás equipos produciendo golpes de ariete. Además, el condensado favorece la corrosión.

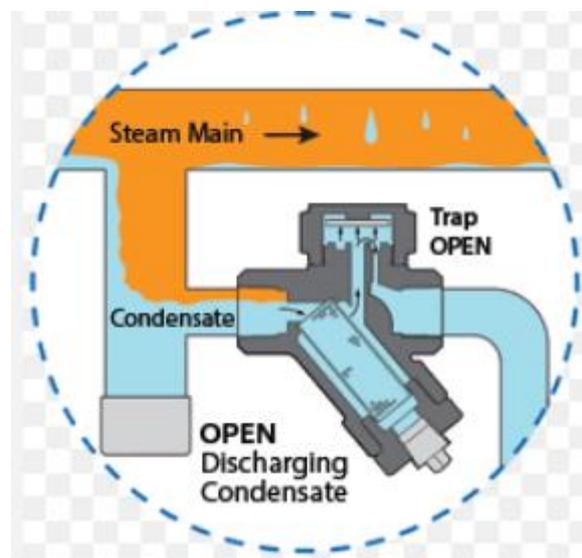


Figura 5. Diagrama de funcionamiento de un purgador [6]

Para eliminar ese condensado del circuito se instalan los purgadores. Un purgador es un equipo que funciona como una válvula que sabe diferenciar el condensado del vapor, abriéndose para que pase el condensado y cerrándose antes de que escape el vapor. Existen diferentes tipos de purgadores según el parámetro por el que distinguen los fluidos, en función de la temperatura

(termostático), de la densidad (mecánico) o de la velocidad (termodinámico). También existen purgadores que combinan más de uno de los métodos, a los cuales se les llama mixtos.

En plantas industriales con cogeneración implementada o en las centrales de generación de energía eléctrica que utilicen turbinas será necesario instalar purgadores en cada una de las extracciones de las turbinas, ya que es necesario eliminar el condensado antes de la puesta en marcha para evitar daños en los álabes.

Durante el arranque, los purgadores son los encargados de eliminar el aire del sistema para que pueda circular el vapor.

El uso de uno u otro tipo de purgador dependerá de varios factores, como el tipo de vapor, temperatura y presión del condensado, tamaño o peso máximo, ruido...

- Depósito de alimentación

El depósito de alimentación es el equipo donde va a parar el condensado al final del ciclo. Idealmente, si el proceso que se abastece no requiere aporte de agua, el caudal que vuelve al depósito en forma de condensado es el mismo que pasa por la bomba de alimentación de la caldera. Sin embargo, debido a fugas de agua, fugas de revaporizado y las purgas, eso no ocurre en la práctica. En consecuencia, se tiene que estar aportando agua nueva al ciclo.

Esta agua se encuentra a temperatura ambiente, considerablemente más fría que el agua que vuelve al depósito por el circuito de condensados. Debido esto, al llegar los condensados al depósito se genera revaporizado, que se escapa, debido a que aunque el taque sea cerrado en su mayoría, siempre existe un venteo abierto a la atmósfera. Para evitar esto se suelen mezclar los caudales de agua nueva y de condensados en la entrada del tanque, que se hace mediante un tubo de inmersión que se sumerge en el depósito para hacer que la mezcla entre por la parte de abajo y así disminuya su temperatura sin generarse revaporizado [7].

Existen también tanques de condensados presurizados (cerrados a la atmósfera), en los cuales no es necesario introducir el agua por abajo ya que el revaporizado no se puede escapar. La desgasificación se sigue realizando mediante una válvula.

En los tanques atmosféricos, una forma eficaz de disminuir las pérdidas de calor es cubriendo la superficie del agua de una manta de pelotas de plástico, que además de dificultar la transmisión de calor también impiden la absorción de oxígeno por parte del agua [3].

Como se ha mencionado anteriormente, existen también tanques que son a la vez desaireador y depósito de condensados.

## 1.4. Organización y contenido

Una vez se ha definido lo que es una instalación de vapor y los equipos que forman parte de ella se va a estudiar con mayor profundidad uno de estos equipos, las calderas pirotubulares.

Primero se hará una breve introducción a las calderas pirotubulares, cómo funcionan, qué las diferencia de otro tipo de calderas y los combustibles que pueden emplear.

Después se realizará una descripción más detallada de las mismas, entrando a estudiar los pequeños equipos o accesorios que simplifican su funcionamiento.

Una vez ya se han estudiado todos los detalles de las calderas, se pasará a realizar a una clasificación de las diferentes tipologías de calderas pirotubulares, haciendo énfasis en las aplicaciones que tiene cada una.

Siguiendo del análisis teórico, se profundizará en el apartado de mantenimiento de las calderas, describiendo punto por punto las diferentes acciones y procedimientos que se deben llevar a cabo en

una instalación para aumentar la eficiencia de una caldera y alargar su vida útil. También se comentarán aspectos a tener en cuenta durante la instalación que posteriormente condicionarán el funcionamiento.

A partir de aquí se entra en los apartados previos al estudio de mercado. Primero se definirán los parámetros característicos de las calderas pirotubulares, y seguidamente se estudiará como dichos parámetros influyen en la selección de una caldera pirotubular.

Además, se hará una breve revisión de la normativa de fabricación y operación que deben obedecer dichas calderas.

Ya terminado el análisis teórico, se realizará una recopilación de los parámetros característicos de los modelos de calderas pirotubulares de los principales fabricantes del mercado, a modo de base de datos. A partir de dicha recopilación se analizarán los resultados obtenidos y se generarán una serie de conclusiones

# 2 GENERADOR DE VAPOR PIROTUBULAR

## 2.1. Introducción

Las calderas de tubos de humo o pirotubulares consisten en un cilindro hueco atravesado por un haz de tubos por los cuales circulan los gases de la combustión que se produce en una estancia más grande también interior a la caldera llamada hogar. Todo eso rodeado por agua por agua que ocupa espacio entre los tubos y las paredes del cilindro exterior de la caldera llamado carcasa.

Los tres tipos de combustibles principales que suelen utilizar las calderas de vapor son gas, fueloil y carbón. También se pueden usar residuos industriales o comerciales como las calderas de pellets. La elección del combustible se hace en función del precio, teniendo en cuenta también una estimación a futuro debido a la larga vida útil que tienen las calderas. En el pasado era más común usar residuos industriales en las calderas, pero con la normativa de emisión de gases actual es más difícil cumplir los requisitos medioambientales de contaminantes en los gases de la chimenea. También existen calderas que pueden utilizar varios tipos de combustibles para adaptarse mejor a los precios del mercado [2].

## 2.2. Descripción de un generador de vapor pirotubular

Existen una serie de equipos y accesorios que se instalan en las calderas con el objetivo de mejorar la eficiencia, la seguridad o el funcionamiento.

- Plaza de características

Debido al gran número de explosiones en calderas que sucedían en el siglo XIX, se formó una compañía en Manchester que sometía a dichos equipos a exámenes. Se demostró que estos exámenes eran capaces de detectar defectos antes de que ocurrieran las explosiones y el porcentaje de fallos en calderas examinadas era mucho menor que en las demás. Este éxito llevó a la primera ley de calderas en Reino Unido que recogía la obligatoriedad de los controles [2]. Por ese motivo se empezaron a instalar placas que incluyeran la fecha de los controles además de otras características de la caldera como el número de serie, combustible, fabricante, modelo, potencia, presión de diseño...etc, tal como se puede observar en la Figura 6.

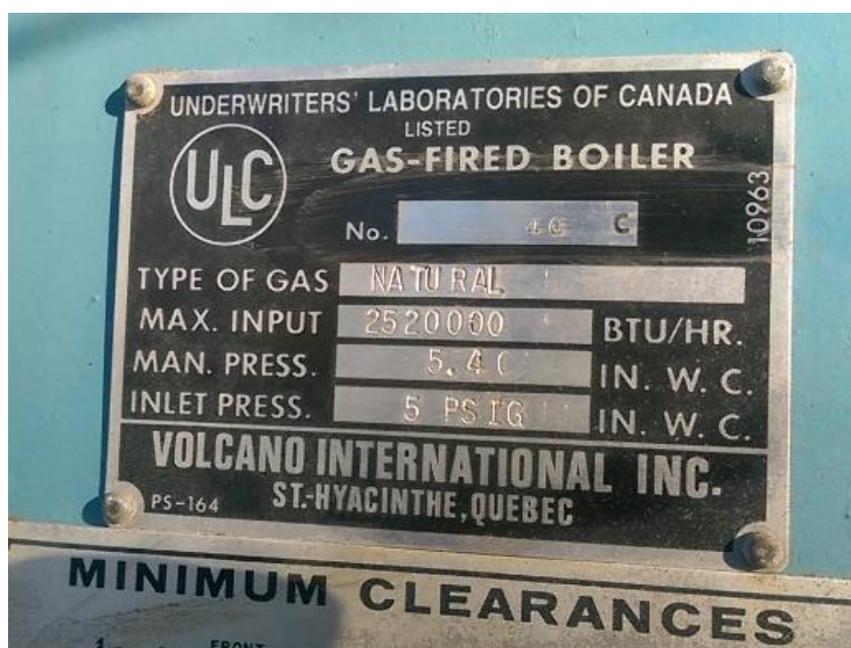


Figura 6. Fotografía de una placa de una caldera [8]

- Quemadores

Tienen la función de mezclar el aire y el combustible para su posterior combustión. Dependiendo de la antigüedad de la caldera la regulación de los quemadores suele ser todo-nada, con dos o más marchas o modulante.

- Hogar

Es la parte de la caldera donde se aloja la llama. Al principio se encuentran los quemadores y por el final salen los tubos que conducirán los gases a la salida. Aquí es donde se produce la combustión, que requiere de un combustible, un comburente (oxígeno del aire generalmente) y una fuente de ignición. La combustión consta de tres etapas:

- Prerreacción: el combustible se descompone formando radicales, que son compuestos intermedios muy inestables al tener carga positiva o negativa. Algunos ejemplos son el  $H^+$ ,  $CO^+$ ,  $OH^-$  o  $O^-$ . Estos compuestos varían en función de la composición del combustible que se esté utilizando.

- Oxidación: se combinan los radicales disipándose energía (etapa exotérmica). Físicamente se ve la propagación de la llama.

- Terminación; se forman los compuestos finales a los que llamamos productos de la reacción como  $CO_2$  o  $H_2O$ .

Para que se inicie la combustión, el combustible tiene que estar en forma gaseosa, así que los combustibles líquidos y sólidos como el gasoil, fueloil, carbón o biomasa se tienen que calentar hasta que desprendan vapores que puedan inflamarse.

Si el color de los gases de combustión es muy oscuro quiere decir que se está produciendo una combustión incompleta en el hogar. Esto puede ser debido a que la cantidad de aire introducida es demasiado baja o que no se está produciendo una correcta mezcla aire-combustible, que da lugar a un alto porcentaje de inquemados (principalmente monóxido de carbono, CO). A estos inquemados se les llama comúnmente como hollín. Además del hecho de que no se está quemando completamente el combustible, el hollín tiene el problema de que se deposita en la chimenea y puede acabar obstruyéndola parcialmente, afectando negativamente al tiro. Esta deposición además puede contener restos de azufre, que en contacto con el agua de lluvia puede producir ácido sulfúrico y corroer las paredes metálicas [1].

Si por el contrario el calor de los humos es más claro, sabemos que se está produciendo una combustión más completa. Sin embargo, no se puede saber si el exceso de aire es correcto o si por el contrario estamos introduciendo demasiado aire en exceso, por lo que aunque las pérdidas por inquemados sean bajas, tenemos unas pérdidas altas de calor sensible en los gases.

- Sonda

El trabajo de la sonda es medir en todo momento el nivel de agua en el interior de la caldera. Esta lectura es utilizada por el control automático de la caldera que regula el caudal que pasa por la bomba de alimentación mediante válvulas o recirculación.

El control de nivel puede ser de todo/nada o modulante [7]. Un control todo/nada es más simple y barato, pero menos eficiente ya que hay más posibilidad de que se produzca arrastre de agua. Además, si existen grandes oscilaciones de carga dificulta considerablemente la operación y pueden variar tanto la presión como el caudal de vapor. El control de nivel modulante es más respetuoso con la caldera ya que no se producen grandes cambios de temperatura debido a la subida y bajada del nivel. Se puede realizar mediante una bomba de frecuencia variable o con una válvula que recircule parte del caudal ajustándose a las necesidades de la caldera.

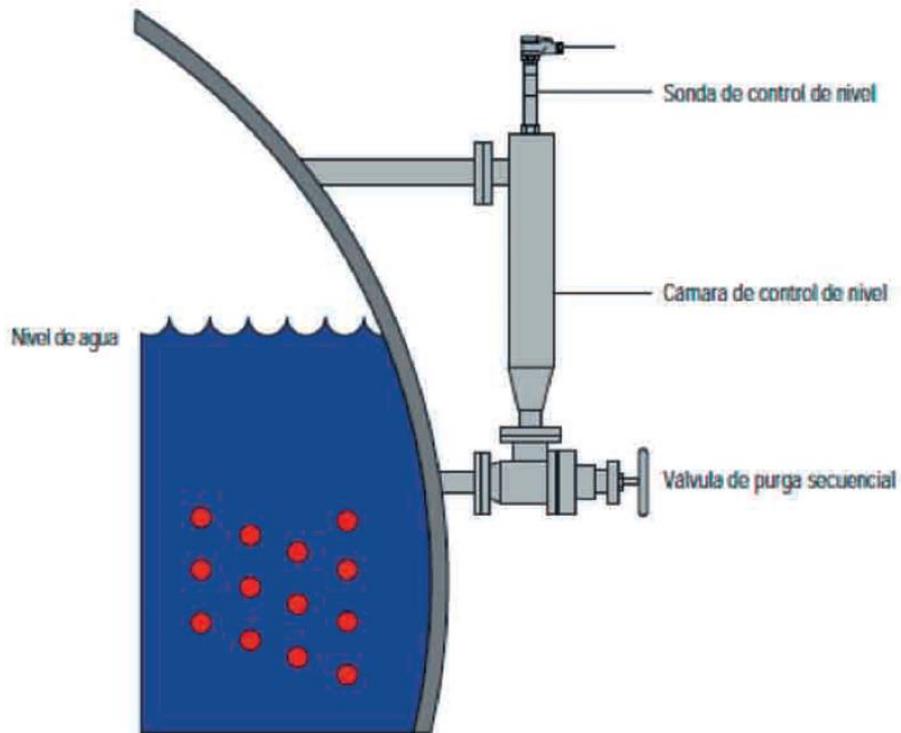


Figura 7. Mecanismo de control de nivel [2]

Controlar el nivel de la caldera es importante ya que si está demasiado alto se puede producir arrastre de agua con el vapor lo que produce golpes de ariete aguas abajo de la caldera, y si está demasiado bajo pueden acabar al descubierto los tubos de gases, haciendo que no se pueda evacuar el vapor y produciéndose puntos calientes que en casos muy graves pueden acabar en rotura de los tubos.

- Indicadores ópticos de nivel

Equipo que se usa para controlar visualmente el nivel de agua. Sirve para comprobar de forma rápida que la sonda de nivel funciona correctamente.

- Barómetro/Manómetro

Se encarga de medir la presión en el interior de la caldera. Este sensor suele estar asociado al control de las válvulas de seguridad de la caldera.

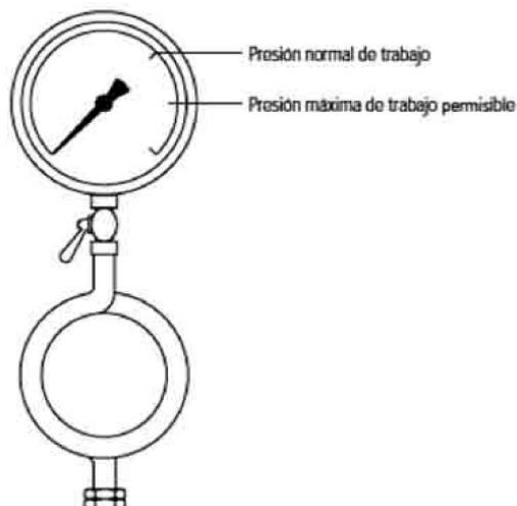


Figura 8. Manómetro de una caldera pirotubular [2]

- Válvula de purga

La concentración de sales en el tanque va aumentando a medida que se va generando vapor. Si la concentración aumenta demasiado, el vapor que se genera puede acabar arrastrando agua sucia, lo cual es bastante indeseable ya que esa suciedad se va depositando en los equipos aguas abajo como válvulas o intercambiadores.

Además de esto, parte de las sales puede acabar precipitando en la caldera. Esos sólidos se acumulan encima de los tubos por donde pasa el gas, y disminuyen el coeficiente de transferencia. Esto es muy peligroso ya que al disminuir la transferencia de calor se generan puntos calientes que puede acabar por fundir el tubo, produciéndose una fuga del agua hacia los tubos y dicha agua se evaporaría al disminuir la presión, pudiéndose llegar a producir una explosión.

Para evitar esto se realizan purgas de agua. Siempre se busca purgar la cantidad mínima necesaria de agua que permita una correcta operación de planta (sin fenómenos de espuma y arrastre), ya que no es deseable purgar de más debido a que estás perdiendo energía, porque dicha agua tiene una alta entalpía al estar en estado saturado.

Suelen instalarse dos tipos de purga, la purga de nivel o superficie y la de fondo.

La purga de superficie se coloca a la altura de los tubos de gases para evitar que se acumulen los sólidos precipitados encima de ellos. La periodicidad de apertura de la purga de superficie se ajusta midiendo la conductividad eléctrica del agua, que depende principalmente de la cantidad de cloruros haya disueltos en la misma [2]. Cuando la conductividad alcanza el valor de consigna elegido, la válvula de purga se abre automáticamente.

Se puede calcular de manera fácil la cantidad de agua que se está purgando sabiendo la conductividad del agua de alimentación y la del valor de consigna de la purga.

$$Purga [\%] = \frac{Conductividad_{alimentación}}{Conductividad_{consigna} - Conductividad_{alimentación}} * 100$$

La purga de fondo se sitúa en el fondo de la caldera, como su nombre indica, que es el lugar donde se acumulan la mayor parte de los sólidos que han precipitado (lodos). Esta purga suele ser rápida, ya que el objetivo no es controlar la salinidad como el caso de la purga de nivel, sino eliminar los lodos que se han depositado en el fondo. A diferencia de con la purga de nivel, la periodicidad de esta purga se ajusta simplemente por tiempo [2].

- Válvulas de interrupción:

Esta válvula se encarga de aislar la salida del vapor de la caldera hacia los equipos aguas abajo. No se trata de una válvula modulante, sino de todo o nada, ya que su papel no es actuar durante la operación para regular el flujo en función de la carga, sino en las paradas y arranques [3]. Para el arranque de la caldera, la válvula de interrupción debe abrirse lentamente para evitar aumentos bruscos de presión aguas abajo y golpes de ariete [2].

- Válvula de retención

Esta válvula cumple una función similar a la válvula de interrupción pero por la parte de la entrada del agua de alimentación a la caldera. Cuando la bomba de alimentación se para, el agua de la caldera intenta retornar hacia la entrada por diferencia de presión. Esta válvula cierra el paso y lo vuelve a abrir cuando aumenta la presión por el lado de la bomba cuando se vuelve a encender.

El mecanismo se puede ver en la Figura 9 junto con la válvula de agua de alimentación que sí se encarga de regular el flujo en función de la carga.

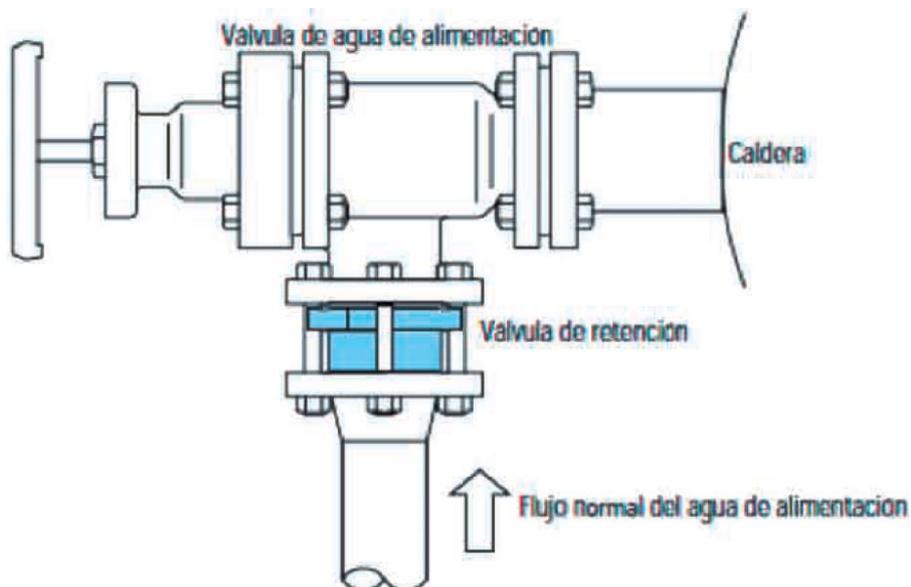


Figura 9. Válvula de parada en una caldera pirotubular [2]

- Válvula de seguridad

La función de la válvula de seguridad es proteger a la caldera en caso de sobrepresión. Para ello, la válvula se encuentra tarada a la presión máxima permisible de la caldera, que debe estar por encima de la presión de trabajo. La válvula tiene que tener capacidad para evacuar, como mínimo, el mismo caudal que el de entrada de agua de alimentación.



Figura 10. Válvula de seguridad de una caldera pirotubular [2]

- Rompedor de vacío

Al parar la caldera, el vapor en su interior se condensa y se genera un vacío, disminuyendo la presión por debajo de la atmosférica. Debido a ello se produce un gradiente de presión hacia el interior de la caldera que puede dañar las paredes y accesorios. Para evitar esto se abre el rompedor de vacío, y se drena el condensado [3].

- Eliminador de aire

Cuando se arranca una caldera, el espacio en su interior dónde estaría el vapor se encuentra lleno de aire. Este aire puede producir corrosión y afectar negativamente al proceso de arranque, ya que dificulta la transferencia de calor. Para evitar esto este aire se purga usando una válvula manual o mediante un eliminador de aire de presión equilibrada que lo hace de forma automática [3].

- Carcasa

Parte visible de la caldera por el exterior. Contiene al hogar y al sistema de tubos en su interior. Generalmente es de aspecto cilíndrico.

- Cámara de inversión de gases

Elemento encargado de reconducir los gases de combustión al siguiente paso. En la Figura 11 vemos dos tipologías distintas de cámaras de inversión. En la primera caldera la cámara se encuentra en el exterior de la caldera, no estando rodeada de agua. Este tipo de cámaras suelen estar hechas de mampostería de cemento refractario para disminuir la transferencia de calor al exterior. En la segunda configuración la cámara está rodeada de agua. La segunda configuración es más eficiente, porque aunque en la primera se intenten reducir las pérdidas de calor, en la segunda esas “pérdidas” se están aprovechando para calentar el agua, aumentando el área de transferencia de la caldera.

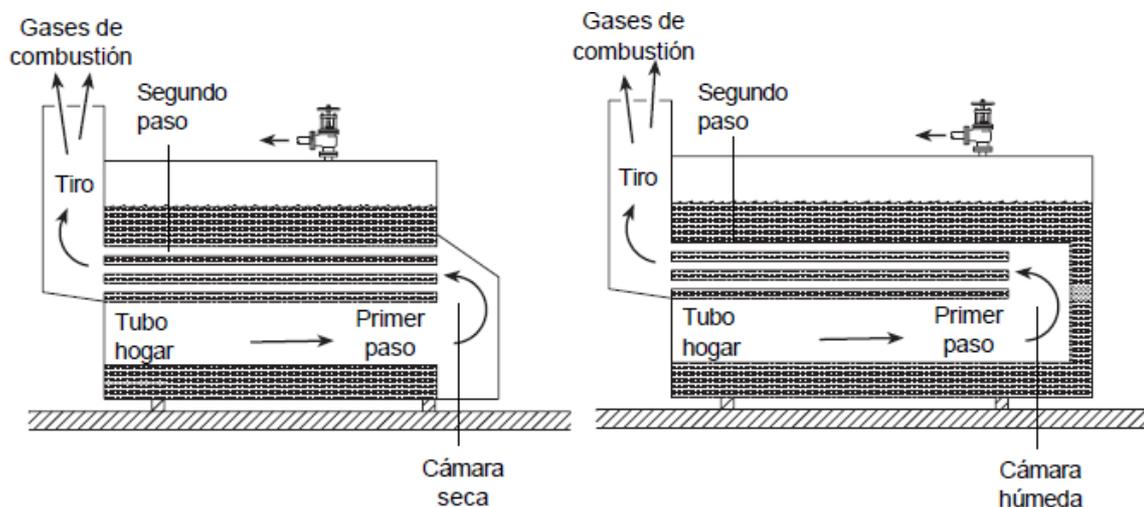


Figura 11. Tipos de cámara de inversión de gases [3]

- Tanque flash:

Como se ha mencionado, el agua de purga es rica en energía, por lo que se intenta aprovechar lo máximo posible para disminuir las pérdidas del proceso. Una forma de hacerlo es hacer pasar la corriente de la purga por un tanque flash.

Este equipo consiste en un tanque a una presión menor que la de saturación. Al llegar aquí el agua de purga se genera un revaporizado aprovechable.

Uno de los usos más frecuentes de este revaporizado es el de precalentar el agua de alimentación, tal y como se puede apreciar en la Figura 13. Otros usos pueden ser utilizar dicho revaporizado para consumidores de vapor a una menor presión o simplemente introducirlo en el tanque de alimentación.

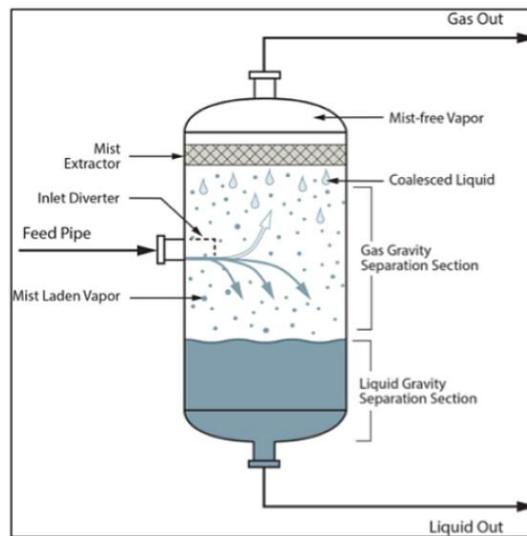


Figura 12. Diagrama de funcionamiento de un tanque flash [9]

Además, el efluente del tanque flash también se puede aprovechar precalentando alguna corriente, como la del retorno del condensado, ya que no es conveniente retornar este efluente al sistema debido a su alto contenido en sales, que encarecería considerablemente el coste del tratamiento de agua. Aplicando estos dos equipos se puede recuperar hasta el 80% de la energía de la purga [5].

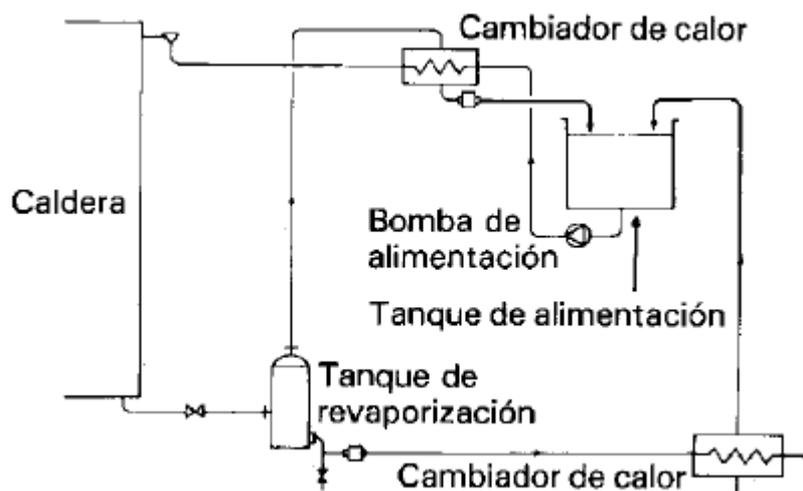


Figura 13. Sistema de purgas con precalentamiento del agua de alimentación

- Sobrecalentador

Generalmente, si se desea obtener vapor sobrecalentado se suele utilizar una caldera acuotubular. La explicación es que el principal uso del vapor sobrecalentado es la generación eléctrica, y las calderas acuotubulares te permiten producir vapor a mayor presión para producir más electricidad [10].

Sin embargo, a las calderas pirotubulares también se les puede instalar un sobrecalentador. Esto puede ser útil, por ejemplo, si queremos implementar una cogeneración en una instalación que ya cuenta con una caldera de vapor pirotubular.

- Atemperador

Un atemperador es un equipo que inyecta agua a una corriente de vapor sobrecalentado para disminuir su temperatura. Este equipo de equipos se instalan aguas abajo del sobrecalentador y antes

de llegar a la turbina para controlar la temperatura del vapor vivo.

Su funcionamiento es muy sencillo. Se trata de una válvula que está conectada a un sensor de temperatura instalado en la corriente de vapor sobrecalentado. Esta válvula es regulable y deja pasar más o menos agua en función de la temperatura del vapor sobrecalentado para obtener unas condiciones de vapor vivo lo más estables posible.

Como se ha comentado anteriormente, a la hora de utilizar vapor como calor de proceso es preferible que se encuentre en estado saturado debido al alto coeficiente de película convectivo en la zona de cambio de fase en comparación con el coeficiente de película convectivo de un gas como el vapor sobrecalentado. Por ese motivo, en una instalación en la que tengamos que producir vapor sobrecalentado para generación eléctrica, y además lo usemos para proceso, se deben instalar atemperadores antes de los intercambiadores de calor que alimenten a los consumidores para llevar el vapor a condiciones de saturación.

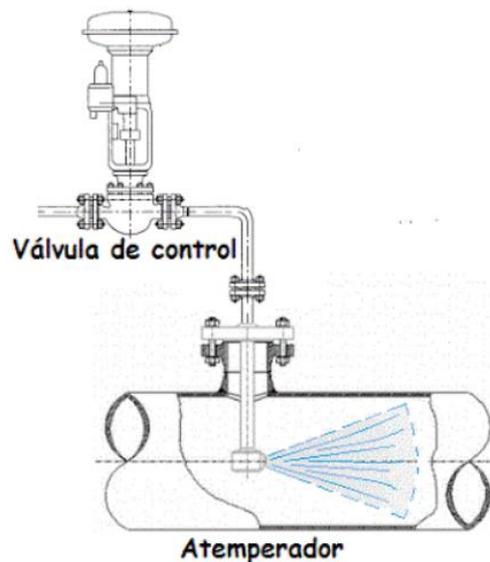


Figura 14. Diagrama de funcionamiento de un atemperador [11]

- Economizador

Otra de las grandes ineficiencias del proceso de generación de vapor son las pérdidas de calor por los gases de combustión. Aunque el recorrido de los tubos de gases por el interior de la caldera está diseñado para ceder la mayor cantidad de calor posible, los gases se siguen expulsando a una temperatura bastante alta ya que el agua de la caldera se encuentra a la temperatura de saturación, por lo que la temperatura mínima de los gases está delimitada por la temperatura del agua más la cercanía, que depende del diseño de la caldera.

Para evitar esto se instala un economizador, que no es más que un intercambiador a la salida de los gases de la caldera que se utiliza para precalentar el agua de alimentación, de forma similar a como se hace con el efluente de las purgas. Dependiendo de la temperatura del agua de alimentación, este equipo puede llegar a incrementar alrededor de un 5% el rendimiento de la caldera [2].

Si se está empleando un combustible que tenga suficiente contenido de azufre (como el fueloil), los gases no pueden disminuir por debajo de la temperatura de rocío, que es la temperatura a la cual se empiezan a condensar gotas de ácido sulfúrico o sulfuroso. A pesar de que los recuperadores de calor se suelen construir de acero, cromo, níquel y molibdeno para resistir mejor la corrosión, con el paso del tiempo estos ácidos pueden llegar a producir defectos en la superficie del intercambiador. Para evitarlo la temperatura de los gases no suele bajar de los 150-175 °C [1].

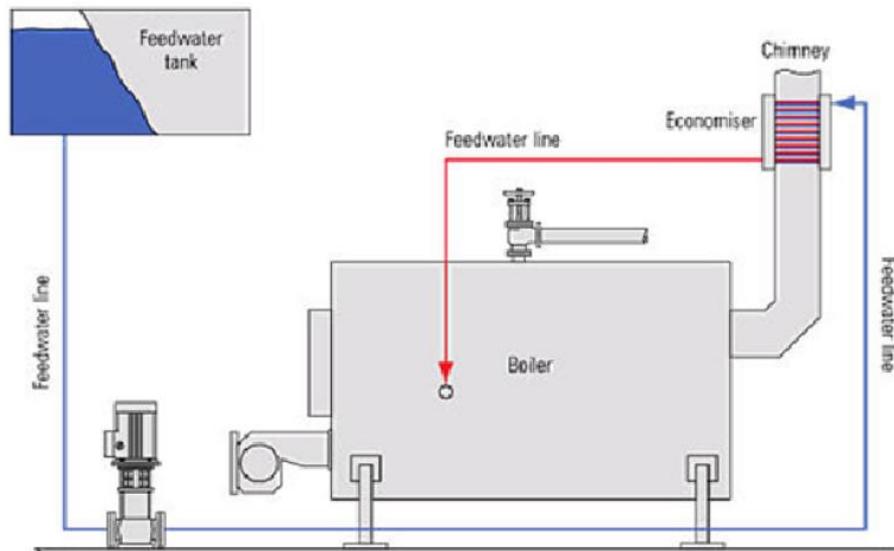


Figura 15. Diagrama de corrientes en una caldera con economizador [11]

- Precalentador

Si en vez de calentar el agua de alimentación se desea calentar el aire de la combustión se instala un precalentador, que no es más que un intercambiador de calor gas-aire que cede el calor de los gases de combustión al aire de entrada después de la impulsión.

Al igual que con el economizador, hay que asegurar que la temperatura de los gases no disminuye por debajo de la temperatura de rocío para combustibles ricos en azufre.

- Chimenea

Es la vía de salida de la caldera por la parte de los gases. Se encuentra localizada al final del recorrido de los tubos por la caldera y suelta los gases a la atmósfera.

## 2.3. Clasificación y Aplicaciones

Aunque ya se han distinguido las calderas entre pirotubulares y acuotubulares, dentro de las calderas pirotubulares existen otra serie de clasificaciones en función de ciertos parámetros y características que diferencian a las calderas:

- Número de pasos

Las calderas pirotubulares transfieren calor de los gases que pasa por los tubos al agua de la caldera que los rodea. Existen varias combinaciones diferentes de distribución de tubos dependiendo del número de “pasos”.

Se considera un paso cada vez que los gases recorren de un extremo a otro de la caldera por el interior de los tubos antes de ser expulsados. Un mayor número de pasos aumenta la eficiencia de una caldera ya que se está aumentando el área de transferencia, sin embargo también supone un mayor coste. En el mercado actual, el compromiso entre eficiencia y coste de inversión se encuentra en las calderas de 3 pasos [2].

Existió un tipo de caldera, llamada caldera Lancashire, cuyo segundo paso se realizaba por debajo del hogar, tal y como se puede apreciar en la Figura 16. Este tipo de caldera fue inventada en 1844, y actualmente no existe ninguna en funcionamiento.

Este paso estaba aislado mediante ladrillos para disminuir las pérdidas de calor. Desde allí los gases circulaban por unos conductos laterales hasta la chimenea. Este tipo de calderas llegaron a alcanzar caudales de 6500 kg/h de vapor y presiones de 17 bar. Además, debido al gran volumen de

la caldera podía afrontar con facilidad demandas repentinas de vapor (como el arranque y parada de la maquinaria de las minas inglesas de aquella época).

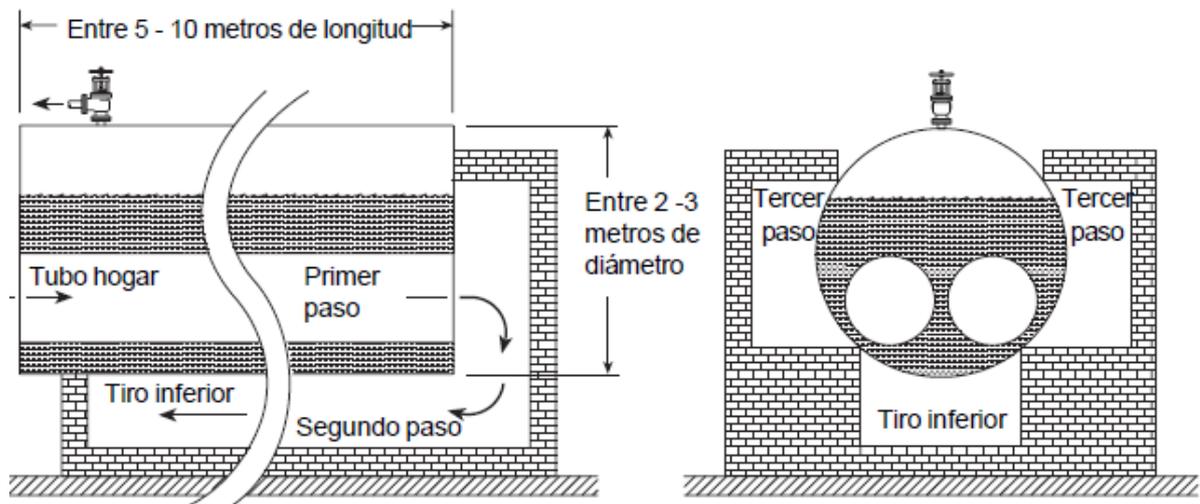


Figura 16. Caldera pirotubular tipo Lancashire [3]

El inconveniente de este tipo de calderas era el uso de los ladrillos, que acababan deformándose debido a la contracción y expansión de los tubos. La introducción de la caldera pirotubular de multi-tubo (siendo más pequeña y eficaz) hizo que desapareciera la caldera de tipo Lancashire.

- Disposición del haz tubular

Las calderas pirotubulares también se clasifican según la disposición del haz tubular, que puede colocarse de forma horizontal o vertical. En el caso de la disposición vertical, la combustión se da en la parte inferior de la carcasa, que es donde está ubicado el hogar. Posteriormente los gases ascienden por los tubos hasta la chimenea, mientras que están rodeados de agua de forma similar a una caldera pirotubular horizontal. En la Figura 17 se muestra el diseño de una caldera pirotubular vertical.

Las calderas pirotubulares verticales también se conocen como de un único paso, ya que los gases solo recorren una vez caldera. Tienen la ventaja de que requieren un menor espacio que las calderas horizontales.

La disposición horizontal es la más común en la industria debido a que permite una mayor área de transferencia, y por lo tanto mayor potencia de caldera.

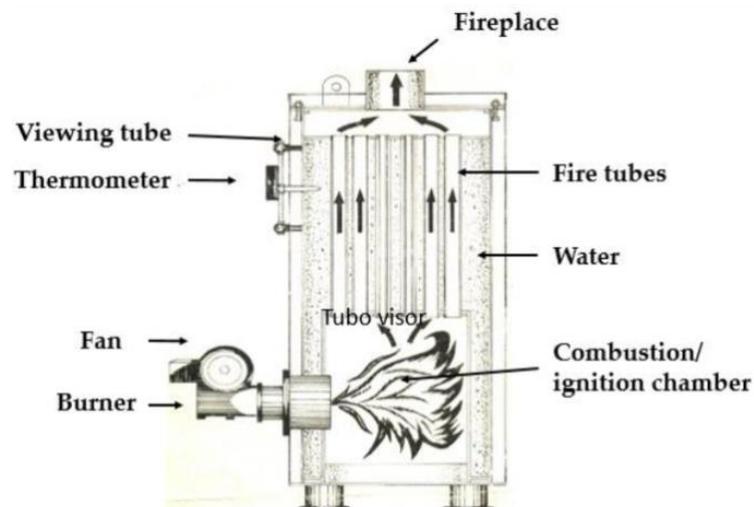


Figura 17. Diseño de una caldera pirotubular vertical [12]

- Circulación de los fluidos según el tiro en la chimenea

Una de las clasificaciones más importantes de las calderas pirotubulares es según la circulación de los humos, que puede ser natural, forzada o inducida.

La circulación (o tiro) forzada es el método más usado en la actualidad. Consiste en el uso de soplantes para modificar el caudal de aire, y por lo tanto gases, que se introduce en la caldera. Este funcionamiento tiene la ventaja de que, utilizando un sensor de la composición de gases en la chimenea, aumenta el rendimiento de la combustión ya que ajusta mejor el exceso de oxígeno.

Otra ventaja que tiene es que permite el precalentamiento del aire de combustión mediante recuperadores de calor de los humos de chimenea u otras fuentes de calor residual. Mediante el tiro natural no es posible debido a la pérdida de carga que supone el paso por el precalentador.

La desventaja de este tipo de circulación es el mayor coste de inversión y el consumo de los ventiladores, pero en general siempre es rentable debido al aumento del rendimiento de la caldera.

El tiro inducido también requiere de ventiladores al igual que el tiro forzado. La principal diferencia entre ambos es que en el tiro forzado el ventilador se instala en la entrada de los gases a la caldera, para empujarlos hacia dentro, mientras que el ventilador del tiro inducido se instala en la salida de la caldera.

El ventilador de tiro inducido succiona el aire y lo expulsa por la chimenea, haciendo que circule el de toda la caldera. La principal desventaja que tiene el tiro inducido frente al tiro forzado es que el primero impulsa gases de combustión, no aire. Esto implica problemas de corrosión, ensuciamiento... Por este motivo se suele utilizar el tiro forzado.

El tiro natural tiene es un método más simple, ya que solo requiere de la altura de la chimenea para crear una depresión en la caldera y que el aire circula. Al no tener elementos mecánicos su funcionamiento es más sencillo.

- Combustible utilizado

Las calderas también se pueden clasificar según el combustible que emplea. Actualmente las calderas más comunes son las de gas natural, que has desplazado a las de carbón, gasóleo o fueloil debido a sus menores emisiones de gases de efecto invernadero. Esto sucede porque el PCI del gas natural es superior al de otros combustibles convencionales, y su ratio kW/kg CO<sub>2</sub> es menor.

Otro combustible que está ganando popularidad recientemente es la biomasa. Es un combustible un poco más caro que el gas natural, sin embargo sus emisiones de gases netas son cero. Esto es debido que la Agencia Internacional de la Energía y otros organismos reguladores consideran que las emisiones que produce la combustión de la biomasa están compensadas con el CO<sub>2</sub> que absorben en su etapa de producción.

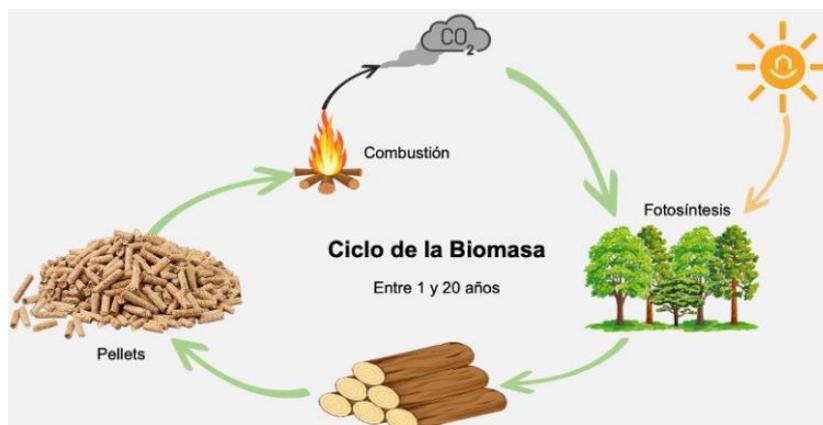


Figura 18. Ciclo de vida de la biomasa [13]

Esta asunción tiene muchos matices ya que no solo importan las cantidades totales de emisiones, si no el lugar en el que se absorben/emiten, el número de años que tarda en crecer..., entre otros. Sin embargo, es cierto que a ojos de la Administración es un combustible más limpio que los combustibles fósiles como el gas natural, y teniendo en cuenta los objetivos climáticos marcados por la Unión Europea en los próximos años puede ser una buena alternativa.

Además, otra desventaja que tienen los combustibles sólidos como el carbón o la biomasa es su bajo poder calorífico en comparación con el del gas natural, 20-25 kJ/kg para el carbón y 10-20 kJ/kg para la biomasa para los 45-50 kJ/kg del gas natural [15]. Esto se traslada en que las calderas que queman combustibles sólidos necesitarán caudales máxicos más elevados que las de gas natural, y por tanto el tamaño de caldera será mayor.

Otra alternativa es utilizar residuos del proceso industrial como combustible. Esta opción no estará disponible para todos los sectores industriales, pero sí es aprovechable en industrias como la papelera, que genera muchos residuos que contienen gran cantidad de carbono y podrían convertirse en biomasa o gasificarse para obtener biogás.

Este tipo de combustible no suele ser la opción más económica, pero reduce los costes de tratamiento de los residuos y es una buena alternativa baja en emisiones.

Aunque no es estrictamente un combustible, los fabricantes también suelen diferenciar las calderas pirotubulares que utilizan corrientes de gases residuales con alta temperatura como fuente de energía térmica.

Estas calderas se suelen llamar calderas de recuperación y funcionan de la misma manera que las convencionales simplemente intercambiando el quemador por una entrada de gases calientes. Estos gases suelen provenir de escapes de motores de combustión interna.

- Fluido caloportador

En los catálogos de los fabricantes se suelen agrupar las calderas por fluido de trabajo. La lógica detrás de la decisión es que suele ser una de las características que más hace diferenciar a unas calderas de otras.

A continuación se hablará de los distintos fluidos usados en calderas pirotubulares:

- Vapor saturado / sobrecalentado: es el fluido de trabajo más común en la industria. En comparación con otros fluidos tiene algunas desventajas en materia de requerimientos del agua o complejidad de la instalación, pero gracias a su alta eficiencia y bajo coste suele ser la mejor opción para la mayoría de instalaciones.

- Aceite térmico: su nicho de mercado se centra en aplicaciones donde se requieren temperaturas tan elevadas que no es operativo utilizar vapor debido a la alta presión. Además de eso, tiene otras ventajas como ser más seguro al no necesitar presurización o que el sistema no requiere regulación química.

- Agua sobrecalentada / caliente: son instalaciones más sencillas y seguras al utilizar un líquido en vez de un gas, sin embargo es menos eficiente como fluido caloportador que el vapor. También se suelen utilizar para abastecer demandas térmicas a menor temperatura. Por ese motivo, además de en entornos industriales también se utiliza mucho en el sector terciario.

- Generación de energía eléctrica

Tradicionalmente las calderas se han utilizado o bien para generar vapor para satisfacer las demandas térmicas de una instalación o bien para turbinar dicho vapor en una central de producción de energía eléctrica. Sin embargo, desde finales del siglo pasado en las plantas industriales se empezaron a utilizar las calderas para generar vapor y turbinarlo.

La producción de energía en forma de calor y electricidad se denomina cogeneración, y es un método muy eficaz para las instalaciones industriales de suficiente tamaño de abaratar su factura eléctrica autoconsumiendo su producción eléctrica o bien vertiéndola a la red. Generalmente se decide en función de los precios de la electricidad.

La técnica consiste en generar vapor a una mayor presión que la demandada por los consumidores para así turbinarlo hasta una menor presión y generar potencia eléctrica mientras que se siguen abasteciendo los consumos, tal y como se observa en la Figura 19.

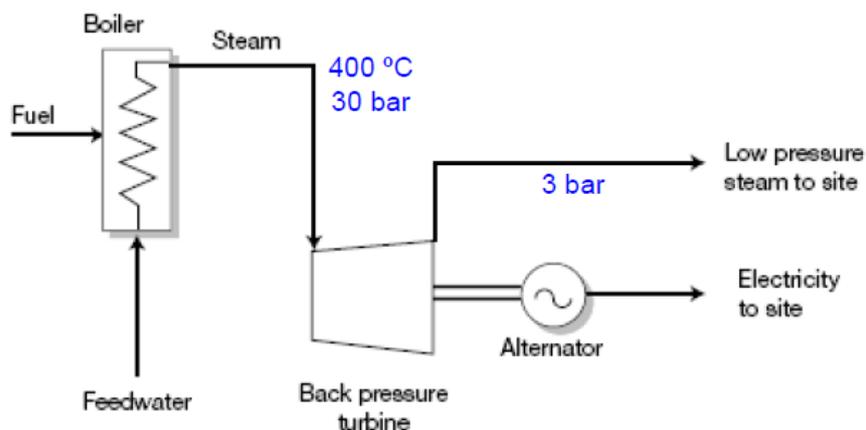


Figura 19. Esquema de una cogeneración con turbina de vapor a contrapresión [14]

Las turbinas cuyo efluente es vapor a una presión mayor que la atmosférica se llaman turbinas a contrapresión, y son diferentes de las que se usan en instalaciones que únicamente generan energía eléctrica porque en estas el efluente sale en estado de vapor húmedo (parcialmente condensado).

Otra de las metodologías para implementar la cogeneración es utilizar una turbina de vapor a condensación y realizar extracciones de vapor a las presiones deseadas para los consumos, que es la configuración que se muestra en la Figura 20.

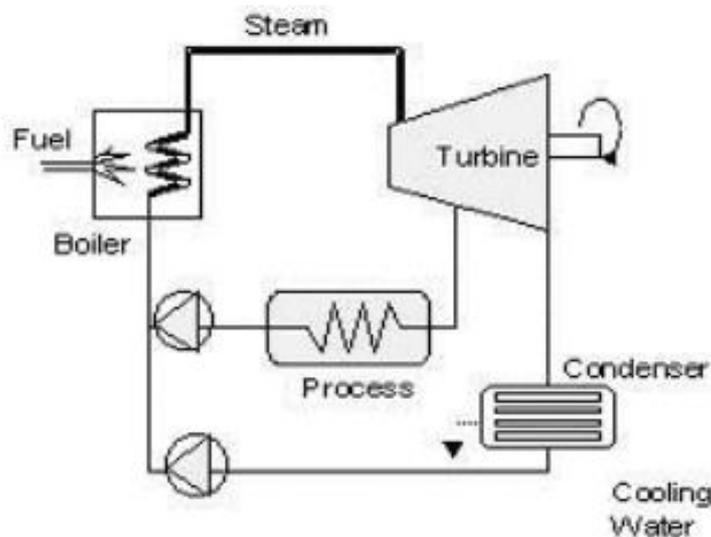


Figura 20. Esquema de una cogeneración con turbina de vapor de condensación y extracciones [15]

## 2.4. Parámetros característicos

Los parámetros característicos son una serie de variables o propiedades que son prioritarios para la elección de una caldera pirotubular. Estos parámetros vienen determinados por la aplicación que se le va a dar a la caldera. Son los siguientes:

- Fluido de trabajo

Aunque las calderas más comunes en la industria son las de vapor, también se emplean calderas de aceites térmicos, agua sobrecalentada o agua caliente en otras aplicaciones. Los catálogos de los fabricantes de calderas suelen agruparlas en función del fluido caloportador, y es la primera distinción que se tiene que hacer para elegir un modelo.

Dentro de las calderas de vapor, lo más habitual son las calderas que generan vapor saturado. Sin embargo, también existen modelos que tienen instalado un sobrecalentador para tener la posibilidad de producir vapor recalentado.

La elección de uno u otro fluido caloportador dependerá de la aplicación que se le vaya a dar a la caldera, siendo la característica más importante que el rango de temperaturas del fluido caloportador coincida con el rango de temperaturas de trabajo del generador. Más detalles en el apartado 2.3.

- Temperatura y Presión nominal

La temperatura del fluido caloportador vendrá marcada por la temperatura más alta de los consumidores a los que debe abastecer de calor. También hay que tener en las pérdidas de calor de las líneas de distribución. Para el caso del vapor saturado, a cada temperatura de saturación le corresponde una presión, que será el parámetro que se controlará mediante la bomba de alimentación.

- Caudal y Potencia nominal

El caudal y la potencia son dos variables que van de la mano, ya que la potencia representa la energía térmica cedida por la caldera, y esta depende fundamentalmente del caudal. Por esto motivo muchos fabricantes de calderas suelen dar solo uno de los datos.

El caudal también es una de las variables principales a la hora de seleccionar una caldera. Se calcula para ser suficiente para poder proveer a todos los consumidores de la planta a plena carga. Para esto se suman las potencias de todos los equipos finales y se divide entre el salto de entalpía del fluido caloportador en el generador.

Con ese caudal, se puede calcular la potencia de la caldera multiplicándolo por el salto de entalpía en la misma.

- Combustible

Generalmente, la elección del combustible se suele hacer buscando la opción más económica. Muchas calderas además cuentan con quemadores capaces de quemar diferentes tipos de combustibles, para así adecuarse mejor a los variantes precios del mercado.

Sin embargo, otro aspecto importante a la hora de seleccionar un combustible son las emisiones. Con las cada vez más restrictivas leyes climáticas, el uso de algunos combustibles se está quedando obsoleto debido a que no cumplen los requisitos de emisiones de GEI. Esta decisión dependerá principalmente del país donde se encuentre la central y sus objetivos climáticos a medio y largo plazo.

### **Datos necesarios**

- Temperatura más alta de los consumidores de calor
- Potencia térmica necesaria para abastecer a los consumidores
- Temperatura del agua de alimentación

## 2.5. Ejemplo de selección

En una industria se quiere adquirir una caldera para abastecer de energía térmica a algunos procesos. La suma de las potencias necesarias es de 10 MW, y la temperatura de proceso más alta es de 185 °C. La temperatura del agua de alimentación a la caldera es de 25 °C.

Se ha decidido instalar una caldera pirotubular de vapor saturado dado que ya se cuenta con una instalación de vapor en la planta y el rango de temperaturas del proceso está dentro del rango de trabajo del vapor.

En este problema no se van a tener en cuenta las pérdidas de calor, pérdidas de carga, fugas de vapor y purgas debido a que el alcance del mismo es ejemplificar simplemente como se realizaría el cálculo.

### a) Variables de entrada

Tproceso	Temperatura del proceso a abastecer	185 °C
Pproceso	Potencia térmica a abastecer	10 MW
Talimentación	Temperatura del agua de alimentación a la caldera	25 °C

### b) Resolución

Entrando a las tablas de propiedades del vapor con una temperatura de 185 °C y un título de 1 se obtiene que se va a necesitar una presión de generación de 11,2 bar absolutos. También se obtiene que la entalpía en este estado es de 2781,41 kJ/kg.

Para calcular el caudal de vapor que es necesario aportar al proceso se utiliza la entalpía del vapor saturado a 11,2 bar, la potencia requerida por el consumidor y la entalpía del agua saturada a 15,5 bar (785,11 kJ/kg):

$$m_{vapor} = \frac{P_{proceso}}{h_{vapor} - h_{agua}} = \frac{10 * 1000}{2781,41 - 785,11} = 5,01 \text{ kg/s}$$

Con este caudal de vapor ya se puede calcular la potencia de la caldera, que siempre será mayor que la suma de las potencias de los consumidores debido a que el agua entra en estado subenfriado, por lo que el salto entálpico es mayor. La entalpía del agua de alimentación (25 °C y 11,2 bar) es de 105,87 kJ/kg.

$$P_{caldera} = m_{vapor} * (h_{vapor} - h_{agua}) = 10,38 * (2792,01 - 105,87) = 13404,46 \text{ kW}$$

### c) Variables de salida

Pgeneración	Presión a la que se tiene que generar el vapor	11,2 bar
mvapor	Caudal de vapor	5,01 kg/s
Pcaldera	Potencia térmica que debe abastecer el generador	13,40 MW

Con estos resultados, un ejemplo de caldera que podríamos seleccionar de la base de datos es el modelo SMS del fabricante español Valtec-Umisa, que tiene una presión nominal de 12 bar, una potencia de 13,13 MW y un caudal de 5,56 kg/s. Como se ha comentado anteriormente, para un caso real habría que corregir un poco los resultados con las pérdidas del sistema.

## 2.6. Instalación y mantenimiento

Un correcto mantenimiento preventivo permite reducir en un gran porcentaje el número de fallos en la caldera y por lo tanto aumentar la disponibilidad de la misma. Esto es aun más importante en instalaciones donde el vapor es la única alternativa para aportar energía térmica a los procesos productivos, porque dependen completamente del correcto funcionamiento de la caldera.

Esto acaba ahorrando dinero debido a lo costoso que son las paradas no planeadas y alarga la vida útil del equipamiento.

- Dimensionamiento de la caldera y equipos asociados

Las calderas tienen rendimientos cercanos al nominal hasta cargas iguales al 50% de la de diseño. Sin embargo, si una caldera trabaja por encima de la potencia de diseño, puede disminuir la presión, aumentando el tamaño de las burbujas de vapor que favorecerían el fenómeno de arrastre. Debido a esto es preferible que la caldera trabaje un poco por debajo de la potencia nominal a que trabaje por encima.

Todos los equipos de la instalación deben diseñarse para poder funcionar en todo el rango de potencias de la caldera. Además de eso, también es importante tener en cuenta el proceso de arranque en el dimensionamiento.

Durante el arranque, toda la instalación se encuentra fría, por lo que se deberá ir haciendo circular vapor de baja presión para que se vaya calentando. Además, durante esta etapa se genera mucho más condensado que en el funcionamiento normal, dada la baja temperatura. Las líneas de condensado y demás equipos deben estar diseñadas teniendo en cuenta este fenómeno.

- Tratamiento del agua de caldera

Se miden una serie de parámetros en el agua de alimentación tales como la cantidad de gases disueltos, el pH, cantidad de sólidos disueltos...etc, y se realizan tratamientos para llevar dichos parámetros a valores que optimicen el funcionamiento de la instalación y alarguen su vida útil. Algunos de dichos tratamientos son la destilación, filtración de sólidos disueltos y en suspensión para evitar su deposición y la formación de espuma en la caldera que favorezca la aparición del fenómeno de arrastre, eliminación de gases como el O<sub>2</sub> y el CO<sub>2</sub> (en el desgasificador) para evitar la corrosión que pueden producir, o adición de sustancias como ácidos para neutralizar el pH [2].

Conviene que el pH dentro de la caldera sea alto debido a que algunos metales como el hierro aumentan su solubilidad con el pH, y así no se depositan en el interior de la caldera, produciendo corrosión. Por ello el agua de aporte suele tener un pH de 10 a 12.

También se usan procesos de desmineralización del agua por intercambio iónico mediante resinas. Las sales suelen estar constituidas por elementos cuya solubilidad disminuye considerablemente al aumentar la temperatura, formándose incrustaciones en el interior de la caldera. Los compuestos más comunes son el carbonato cálcico, sulfato cálcico, hidróxido cálcico, hidróxido magnésico, y ciertos silicatos de calcio, magnesio y de aluminio. Estas resinas intercambian cationes calcio, magnesio y sodio por H<sup>+</sup>, y aniones sulfato, cloruro, bicarbonato y nitrato por OH<sup>-</sup>, eliminando las sales. Posteriormente se regeneran las resinas haciendo pasar diferentes soluciones por ellas. En casos donde el contenido en sales sea muy elevado (> 1,5 g/l), se suele emplear otro método basado en la ósmosis inversa utilizando membranas semipermeables, que tiene un coste de inversión mayor pero tiene mayor eficiencia de eliminación de sales.

Es muy importante eliminar estos compuestos antes de llegar a la caldera porque al decantar forman incrustaciones como las de la Figura 21. Estas incrustaciones tienen una conductividad térmica pequeña, así que actúan como "aislantes" perjudicando el flujo de calor. Es un fenómeno parecido a lo que ocurre con la acumulación de sólidos en suspensión. En casos graves ese recalentamiento del metal puede hacer que se acabe deformando y se produzcan roturas. Para evitar que se llegue hasta ese punto hay que realizar un lavado químico cuando se empiece a observar

corrosión en los tubos, aunque a diferencia de los métodos preventivos de eliminación de sales del agua de aporte, el lavado requerirá parar la caldera.



*Figura 21. Incrustaciones en una caldera de vapor [2]*

Las incrustaciones que caen al fondo también son peligrosas porque pueden ser absorbidas junto con la purga de fondos, sin estar esos conductos preparados para albergar compuestos sólidos de ese tamaño, por lo que provocan obstrucciones.

Para medir los parámetros del agua se realizan muestreos en diferentes puntos de la instalación, como la alimentación a la caldera (antes de la bomba), en la propia caldera o la purga, en el tanque de alimentación, y en la línea de condensados. Para realizar las muestras se despresuriza el líquido. En el caso del agua de caldera, al estar en estado de líquido saturado, si se disminuyera la presión se generaría revaporizado, lo cual estropearía la muestra ya que el revaporizado no se lleva sólidos disueltos, por lo que su concentración en el agua que queda aumentaría significativamente. Para evitar esto se suele enfriar la muestra antes de despresurizarla, haciendo que pase de líquido saturado a subenfriado, por lo que al disminuir la presión no se genera revaporizado. Hay que tener en cuenta de que se tiene que enfriar lo suficiente como para que al despresurizar no vuelva a entrar en la zona de campana, por lo tanto se genere vapor [7].

Aun con el exhaustivo del agua, las incrustaciones y la corrosión acabaran surgiendo en la instalación y será necesario tratarlas en las paradas en frío de la caldera.

- Recuperación de condensados

Como se ha comentado, el tratamiento del agua de aporte es muy importante para aumentar la vida útil de la instalación debido a los diversos problemas que evita. Sin embargo, también supone un coste considerable debido a la enorme cantidad de m<sup>3</sup> que necesita una instalación. Por ello es muy importante recuperar los condensados, que provienen de agua que ya ha sido tratada. No solo eso, sino que estos condensados también se encuentran a una temperatura superior a la del agua de aporte, por lo que también supone un ahorro de combustible para calentar en la caldera.

- Fatiga térmica

Las continuas paradas y arranques son incluso más perjudiciales para una caldera que las horas de funcionamiento. Esto es debido a que la chapa se dilata y se contrae en función de la temperatura, y si este proceso ocurre muchas veces acaba agrietándose. Esta fatiga puede disminuirse calentando la caldera lentamente para disminuir los gradientes de temperatura. El tiempo necesario dependerá de la instalación, siendo mayor para las grandes plantas dónde es del orden de horas [3].

- Combustión

Las pérdidas más importantes de una caldera son el calor que se escapa con los gases de combustión. Esta cantidad de energía aumenta con dos parámetros, la temperatura de los gases de

escape y el caudal de los mismos.

La temperatura de los humos aumenta si la transmisión de calor hacia los tubos en la caldera no ha sido correcta. Esto puede ocurrir si las superficies de transferencia han acumulado demasiada suciedad o si el tiempo de residencia de los gases en la caldera ha sido demasiado corto. Se estima que una disminución de 20°C en la temperatura de los gases a la salida supone aproximadamente un ahorro de un 1% en el caudal de combustible [1].

Una buena forma de aprovechar esa temperatura de los gases a la salida es mediante un economizador, que no es más que un intercambiador de calor aire-agua con el que se precalienta el agua de alimentación a la caldera.

El límite mínimo de temperatura de los gases suele venir marcado por la temperatura de rocío en combustibles que tengan azufre en su composición, como carbón o fueloil. Si la temperatura de los gases disminuye por debajo de dicha temperatura, se producen condensaciones que corroen los tubos del economizador debido al contenido en azufre.

Para reducir el caudal de gases lo más importante es realizar la combustión en condiciones lo más cercanas posibles a las estequiométricas. Siempre se emplea una cantidad de oxígeno mayor al necesario (exceso), porque la mezcla aire combustible dentro de la caldera no es ideal, y si no se añade oxígeno extra se producirían demasiados inquemados. Sin embargo, tampoco es aconsejable añadir demasiado oxígeno, porque todo el que se quede sin reaccionar es masa de gas que ha absorbido un calor para después ser expulsada por la chimenea, disminuyendo el rendimiento.

Dada la gran influencia de la combustión en la eficiencia de la caldera las grandes plantas controlan el exceso de aire (mediante el tiro) en continuo midiendo la concentración de gases a la salida de la chimenea [3]. Esto lo hacen mediante ventiladores que están conectados al sensor de gases de la chimenea. El inconveniente que tiene el tiro forzado es el consumo de los ventiladores, sin embargo es preferible pagar ese consumo por el aumento de estabilidad y eficiencia de la combustión que te permite el tiro forzado.

- Aislamiento térmico

Con el paso de los años las paredes de la caldera se van deteriorando por el simple uso de la misma. Debido a esto se producen defectos en el aislamiento que hacen que aumenten considerablemente las pérdidas de calor. Esto se puede detectar fácilmente utilizando una cámara termográfica que detecta los puntos externos de la caldera dónde la temperatura es mayor, que son también por dónde se escapa más calor.

Existen puntos que aun sin tener defectos de aislamiento son más propensos a tener pérdidas de calor, como las juntas, bridas, válvulas... Esto es debido a que por su función no pueden tener tanto material aislante como las paredes comunes. A pesar de eso hay que vigilar las pérdidas de calor por aislamiento en toda la caldera ya que se tratan de pérdidas constantes prácticamente invariables con la operación y que además son relativamente asequibles de reparar utilizando un paro por mantenimiento.

- Estanqueidad

La estanqueidad mide la cantidad de fugas e infiltraciones. Ambos fenómenos son perjudiciales para el rendimiento de la caldera. Por un lado, las fugas de humos suponen grandes pérdidas de calor ya que se encuentran a una temperatura elevada. Supondrán unas pérdidas mayores cuanto más temprana sea la fuga en el circuito de gases, ya que la temperatura de los humos será mayor. Además de la pérdida energética, una fuga de gases puede ser peligrosa debido al contenido en monóxido de carbono de los humos. Por otro lado, las infiltraciones son entradas de aire al circuito de gases. Estos caudales de aire se les conoce como parásitos porque se encuentran a mucha menor temperatura que los gases de combustión, por lo tanto absorben calor de ellos que será transmitido al agua/vapor.

- Ventilación

Mantener las rejillas de ventilación limpias es importante por dos motivos. El primero es que si entra demasiado poco aire la combustión va a ser pobre y se van a producir inquemados [1]. El segundo es que aunque la cantidad de aire sea la correcta, si la suciedad es suficiente hace que aumente considerablemente la pérdida de carga, haciendo que el salto de presión en el compresor sea mayor, aumentando su consumo.

- Emisiones de NOx

Los óxidos de nitrógeno, o comúnmente llamados NOx, son un grupo de gases contaminantes que se forman durante la combustión. Su emisión a la atmósfera está cada vez más restringida por las leyes medioambientales. Existen métodos de reducción de las emisiones pre-combustión y post-combustión.

Los métodos pre-combustión tienen que ver con la proporción aire-combustible, temperatura de la llama y la geometría de la caldera. Hay que tener en cuenta que los NOx se forman cuando el oxígeno del aire reacciona con el nitrógeno en vez de con el carbono del combustible. Por ello es muy importante tener una mezcla óptima y que la geometría de la caldera favorezca que por aerodinámica de llamas tanto oxidante como combustible estén en una adecuada proporción en cada espacio de la caldera.

# 3 ESTUDIO DE MERCADO

---

## 3.1. Introducción

Una vez se han descrito las instalaciones de vapor y las calderas pirotubulares, en este apartado se va a realizar un estudio de mercado de la tecnología. Para realizar este estudio de mercado primero se va a hacer una recopilación de los mayores fabricantes de turbinas pirotubulares y a analizar los modelos que tienen actualmente en su catálogo.

Posteriormente, con la información recopilada de los modelos de los fabricantes se va a realizar un análisis paramétrico a partir del cual se expondrán una serie de valoraciones.

## 3.2. Parámetros de la base de datos

Además de los parámetros característicos, existen otros parámetros que se van a obtener de los fabricantes para realizar el análisis paramétrico del apartado 3.5. En total se han recopilado un total de 49 parámetros para modelo. Estos parámetros son los que formarán parte de la base de datos.

1. Fabricante
2. Modelo
3. País de fabricación
4. Combustible utilizado
5. Fluido caloportador
6. Caudal nominal (kg/s). Caudal fluido caloportador generado en condiciones nominales
7. Presión nominal de generación (bar abs). Presión de generación en condiciones nominales
8. Potencia útil nominal (kW). Potencia útil del generador en condiciones nominales
9. Rendimiento nominal. Rendimiento en condiciones nominales
10. Poder calorífico utilizado en el rendimiento nominal: PCI/PCS
11. Consumo nominal de combustible (kg/s). Consumo de combustible en condiciones nominales
12. Disposición: Horizontal/vertical
13. Longitud del generador (m)
14. Diámetro exterior del generador (m)
15. Altura del generador (m) (en caso de que no sea de forma cilíndrica)
16. Material de la carcasa
17. Material de los tubos
18. Número de tubos
19. Número de pasos por tubos
20. Diámetro exterior de los tubos (")
21. Diámetro del tubo hogar (m)
22. Superficie de calefacción (m<sup>2</sup>)
23. Diámetro de salida de los gases (m)
24. Sobrepresión del hogar (mbar). Sobrepresión en el hogar del generador
25. Cámara de inversión de humos: seca/húmeda
26. Tiro: Natural/Forzado
27. Volumen interno (m<sup>3</sup>). Es la suma del volumen del tubo del hogar, de los tubos de humos, del agua y del hueco superior donde está alojado el vapor.
28. Volumen total (m<sup>3</sup>). Volumen ocupado por el generador
29. Contenido de fluido caloportador (kg)
30. Relación volumétrica. Relación entre el volumen del fluido caloportador y el volumen interno en condiciones nominales (Nota 1)
31. Peso en vacío (kg). Peso total del generador sin agua en su interior
32. Versatilidad en combustible. Posibilidad de utilizar varios tipos de combustibles. Si/No
33. Bomba de alimentación. Si/No

34. Caudal nominal de la bomba (kg/s). Caudal de la bomba en condiciones nominales.
35. Consumo eléctrico total (kW) en condiciones nominales
36. Temperatura de salida de gases en condiciones nominales (C)
37. Temperatura del hogar en condiciones nominales (C)
38. Curva de rendimiento a carga parcial. Si/No
39. Rendimiento al 75% de carga
40. Rendimiento al 50% de carga
41. Número de etapas a carga parcial
42. Caudal mínimo fluido caloportador (kg/s)
43. Caudal máximo fluido caloportador (kg/s)
44. Control de nivel. Modulante/Todo-nada
45. Indicador de nivel. Si/No
46. Alarma de nivel. Si/No
47. Válvula de seguridad. Si/No
48. Válvula de retención del fluido de alimentación. Si/No
49. Presostato de seguridad para el quemador. Si/No

Cabe mencionar, que de entre las distintas unidades a las cuales se podrían aportar los diferentes parámetros se han utilizado aquellas que forman parte del Sistema Internacional de Unidades (SI).

Los parámetros nominales son aquellos que se alcanzan cuando la caldera funciona a plena carga, que suele ser la situación a la cual funciona con mayor rendimiento y es a la cual se espera que se realice un mayor número de horas de operación.

Dentro de estos 49 parámetros, existen algunos que, sin ser críticos, sí que pueden decantar la balanza en caso de que varios modelos cumplan con los requisitos. A continuación se va a dar más detalles de estos parámetros:

- Dimensiones y Disposición

Como se ha comentado anteriormente, existen aplicaciones donde el espacio es reducido y es un parámetro descalificante para algunas calderas, aunque no suele ser lo habitual. La disposición va de la mano, ya que algunas veces la solución al problema del espacio es el uso de una caldera vertical.

Algunos ejemplos de aplicaciones donde son el transporte marítimo, o plantas que no dispongan de mucho espacio en la sala de calderas.

- Relación volumétrica

Es el cociente entre el volumen de fluido caloportador y el volumen interno del generador. El volumen interno se define como la suma del volumen del tubo del hogar, de los tubos de humos, del agua del interior de la carcasa y del hueco superior donde está alojado el vapor.

- Peso

De forma similar a las dimensiones, el peso no suele ser una variable importante en muchas aplicaciones, sin embargo existen otras donde sí es un condicionante a la hora de elegir caldera.

Por ejemplo, en edificios terciarios donde los cimientos no son tan robustos como en los de una planta industrial, puede ser un factor determinante que el peso de la caldera no supere cierto límite que obligue a hacer obras para adecuar el suelo. También en el transporte marítimo, mencionado anteriormente, un mayor peso repercute proporcionalmente en un mayor coste, ya que aumenta el consumo de combustible para el propio transporte.

- Rendimiento

El rendimiento de una caldera se define como la cantidad de calor útil que es capaz de aportar al fluido caloportador dividido entre la cantidad de energía aportada en forma de combustible. Este parámetro también se puede aportar en forma de consumo específico, que representa lo mismo pero mediante el cálculo inverso, es decir, la cantidad de energía en forma de combustible que se tiene que aportar para conseguir una unidad de la misma variable energética en forma de calor. Si tuviéramos dos calderas con la misma potencia nominal simplemente necesitaríamos comparar el consumo de combustible de cada una.

El rendimiento no es una variable constante, sino que depende de las condiciones de operación. Generalmente los fabricantes prueban sus calderas a diferentes cargas y obtienen curvas o tablas del rendimiento en función de la potencia. En caso de que esperemos que nuestra instalación funcione con demandas muy variables, será importante que la caldera tenga un rendimiento alto en el mayor rango de operación posible.

Las calderas son máquinas con un grado de avance tecnológico muy avanzado al llevar utilizándose más de un siglo, y sus rendimientos suelen estar por encima del 90% incluso hasta cargas cercanas del 50%.

A la hora de comparar los rendimientos entre distintas calderas es importante saber en qué condiciones se han calculado. Por ejemplo, los combustibles suelen tener dos valores del poder calorífico, el inferior y el superior. Esto es debido a que la cantidad energía por kilo de combustible dependerá de si se consigue recuperar la energía latente del agua en forma de vapor. Para conseguir esto se deben enfriar los gases de escapa a una temperatura suficientemente baja para que el vapor condense. Dependerá de la instalación concreta, así que para estimar correctamente el rendimiento se deberá tener en cuenta.

- Calidad de Fabricación

Hay otras características de la caldera que no son directamente cuantificables, como pasaba con el rendimiento, sino que son parámetros cualitativos. Uno de estos parámetros son los materiales de construcción. Unas buenas calidades constructivas en los tubos y la carcasa permitirán alargar la vida útil de la caldera y disminuirán los costes de mantenimiento y el número de paradas, por lo que es otro factor a tener en cuenta si la disponibilidad es un parámetro importante en la instalación.

- Accesorios

Los accesorios de control y seguridad son muy importantes para el correcto funcionamiento de la caldera, tal y como se ha visto en el apartado 2.2. Aunque muchos de estos equipos suelen venir incorporados en la caldera, es importante cerciorarse de ello ya que si no lo están su adquisición e instalación supondrá un coste adicional a posteriori.

- Fabricante

Adquirir la caldera de un fabricante reconocido asegura que un producto va a cumplir con lo que dice su hoja de datos. Además, da seguridad de que no van a faltar piezas de repuesto ni personal cualificado para realizar los mantenimientos.

Otro factor ligado al fabricante es el país de fabricación, ya que una mayor cercanía va a suponer menores costes de transporte y mayor disponibilidad de piezas.

- Precio

Como en cualquier proyecto, el precio de la inversión es uno de los parámetros más importantes a la hora de comparar. El precio va ligado a algunos parámetros que se han comentado anteriormente, como los accesorios y la calidad de los materiales, ya que lo encarecen. También se

contrarresta con el rendimiento, ya que una caldera puede tener el rendimiento más alto pero aun así no ser la elección adecuada, debido a que no compensa su precio, como podría pasar con una caldera que estuviera pensada para usarse de back-up en picos de demanda. O viceversa, si se espera que la caldera vaya a tener muchas horas de funcionamiento al año probablemente salga más rentable invertir un poco más por un mayor rendimiento.

### 3.3. Fabricantes y modelos

Se van a tener en cuenta en el análisis todo tipo de calderas pirotubulares, independientemente del fluido de trabajo. Se han analizado un total de 20 fabricantes y 131 modelos. Este número de modelos multiplicado por los 49 parámetros recopilados para cada uno da un número de datos total de 6419.

1. Attsu
2. Babcock Wanson
3. Bosch
4. Cannon Bono
5. Cerney
6. Cleaver Brooks
7. Ferroli
8. GSS
9. Henan Yuanda
10. ICI
11. Johnston Boiler
12. LCZ
13. RCB
14. Sincal
15. Sogecal
16. UMS
17. Victory Energy
18. Viessman
19. Ygnis
20. Zozen

La distribución de los modelos por fabricantes se muestra en la Figura 22.

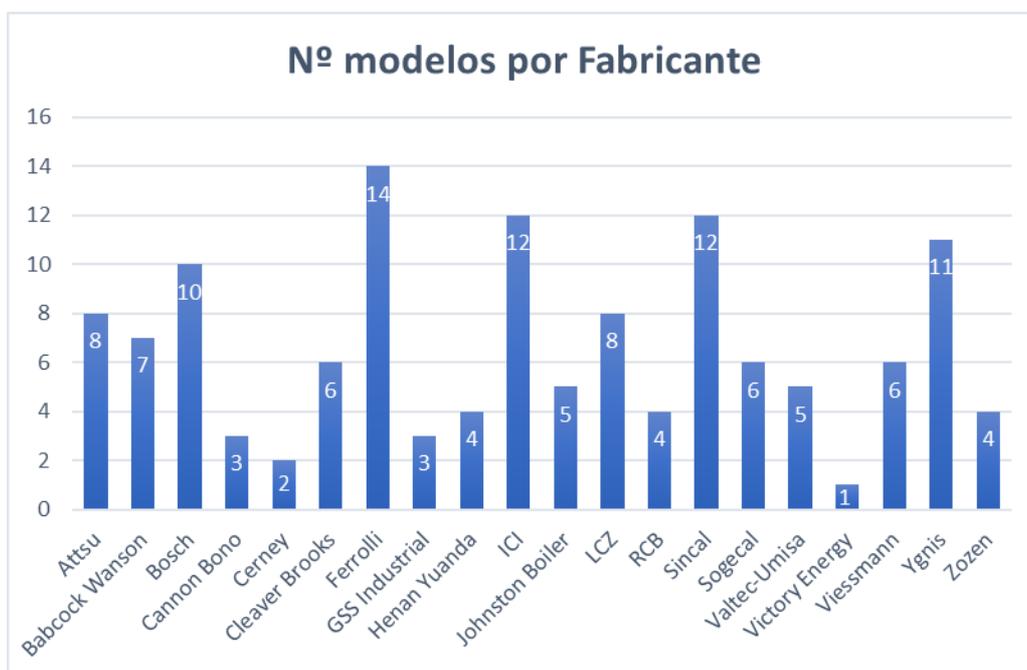


Figura 22. Nº de modelos de calderas pirotubulares por fabricante

Se aprecia que la mayoría de los fabricantes tienen en su catálogo entre 5 y 12 modelos. Algunos de los que menos tienen, como Cerney y Victory Energy es debido a que estos fabricantes no cuentan como un catálogo como tal, sino que dan unos rangos de distintos parámetros entre los cuales se puede hacer un encargo.

### 3.4. Base de datos

Para realizar la base de datos de los modelos de calderas pirotubulares se han extraído de los catálogos y páginas webs de los fabricantes 49 parámetros que caracterizan a sus calderas. Dichos parámetros son los que se listaban en el apartado 3.2.

Los resultados obtenidos muestran que no ha sido posible obtener todos los parámetros de todos los modelos, y que la información disponible varía mucho de un fabricante a otro. Cabe destacar que los fabricantes no proporcionan los mismos parámetros para todos sus modelos. Estas diferencias se hacen aun más notables en calderas de diferente fluido de trabajo.

Se han ordenado los parámetros entre categorías según si se han obtenido en más del 75% de los modelos, entre 75% y 50%, entre 50% y 25% y menos del 25%. Los resultados son los siguientes:

- Más del 75%:

1. Fabricante
2. Modelo
3. País de fabricación
4. Fluido caloportador
5. Disposición: Horizontal/vertical
6. Curva de rendimiento a carga parcial. Si/No
7. Combustible utilizado
8. Versatilidad en combustible. Si/No
9. Presión nominal de generación (bar abs).
10. Número de pasos por tubos
11. Potencia útil nominal (kW).

- Entre 75-50%:

12. Volumen total (m<sup>3</sup>).
13. Longitud del generador (m)
14. Diámetro exterior del generador (m)
15. Altura (m)
16. Cámara de inversión de humos: seca/húmeda
17. Válvula de seguridad. Si/No
18. Bomba de alimentación. Si/No
19. Peso en vacío (kg).
20. Indicador de nivel. Si/No
21. Presostato de seguridad para el quemador. Si/No
22. Rendimiento nominal.
23. Caudal nominal (kg/s).

- Entre 50-25%:

24. Válvula de retención del fluido de alimentación. Si/No
25. Tiro: Natural/Forzado
26. Poder calorífico utilizado en el rendimiento nominal: PCI/PCS

27. Alarma de nivel. Si/No
28. Material de la carcasa
29. Consumo nominal de combustible (kg/s).
30. Diámetro de salida de los gases (m)

- Menos del 25%:

31. Control de nivel. Modulante/Todo-nada
32. Sobrepresión del hogar (mbar).
33. Superficie de calefacción (m2)
34. Diámetro del tubo hogar (m)
35. Temperatura de salida de gases en condiciones nominales (C)
36. Contenido de fluido caloportador (kg)
37. Rendimiento al 50% de carga
38. Volumen interno (m3).
39. Consumo eléctrico total (kW) en condiciones nominales
40. Rendimiento al 75% de carga
41. Número de tubos
42. Caudal nominal de la bomba (kg/s).
43. Material de los tubos
44. Diámetro exterior de los tubos (“)
45. Relación volumétrica.
46. Temperatura del hogar en condiciones nominales (C)
47. Número de etapas a carga parcial
48. Caudal mínimo fluido caloportador (kg/s)
49. Caudal máximo fluido caloportador (kg/s)

Si se grafican estos resultados se obtienen los siguientes porcentajes representados en la Figura 23 para cada una de las categorías:

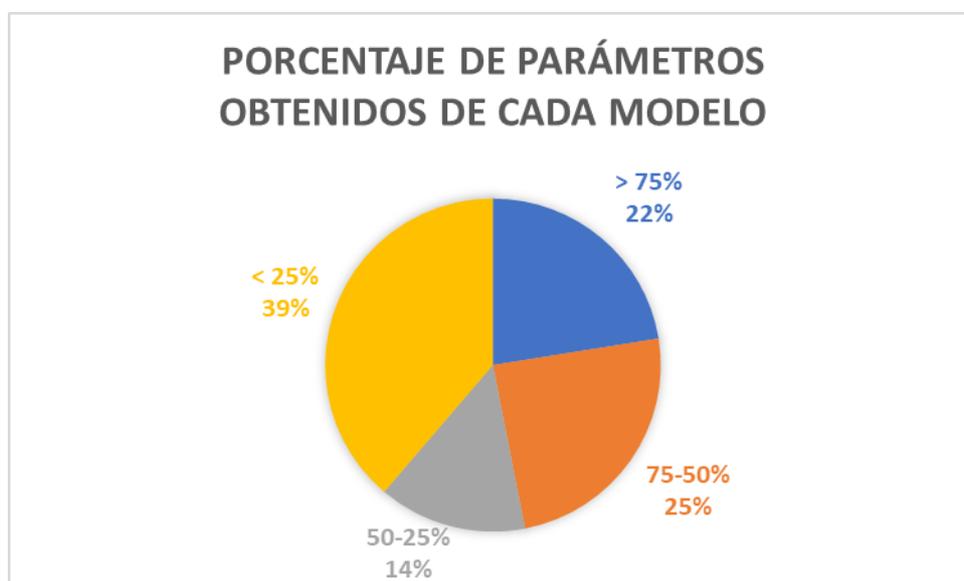


Figura 23. Porcentaje de parámetros obtenidos para cada modelo

Si se grafica el porcentaje de parámetros que aporta cada uno de los fabricantes se obtiene la Figura 24. Casi todos los fabricantes se encuentran en el rango de entre el 20 y el 50%, siendo los dos únicos fabricantes fuera de él Johnston Boiler, con un 54,58%, y Cerney, con un 18,75%, que representan el máximo y el mínimo respectivamente.

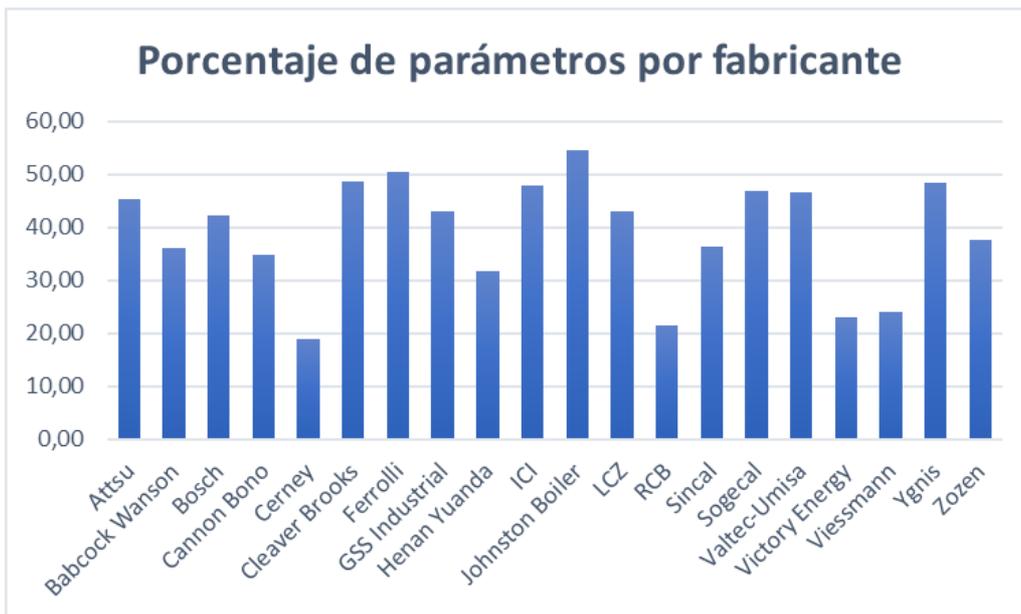


Figura 24. Porcentaje de parámetros por fabricante

### 3.5. Análisis paramétrico

En este apartado se va a realizar un estudio de los principales parámetros de diseño de una caldera pirotubular. Cabe mencionar que se han priorizado los análisis de las variables de las cuales se ha obtenido una mayor muestra, ya que son los cuales se pueden obtener unas conclusiones.

- Distribución por Países

Se ha calculado el porcentaje de modelos por países entre los fabricantes analizados. Se aprecia en la Figura 25 que un 85% de los fabricantes estudiados están localizados en Europa, siendo los países con más modelos Italia (28%) y España (22%).

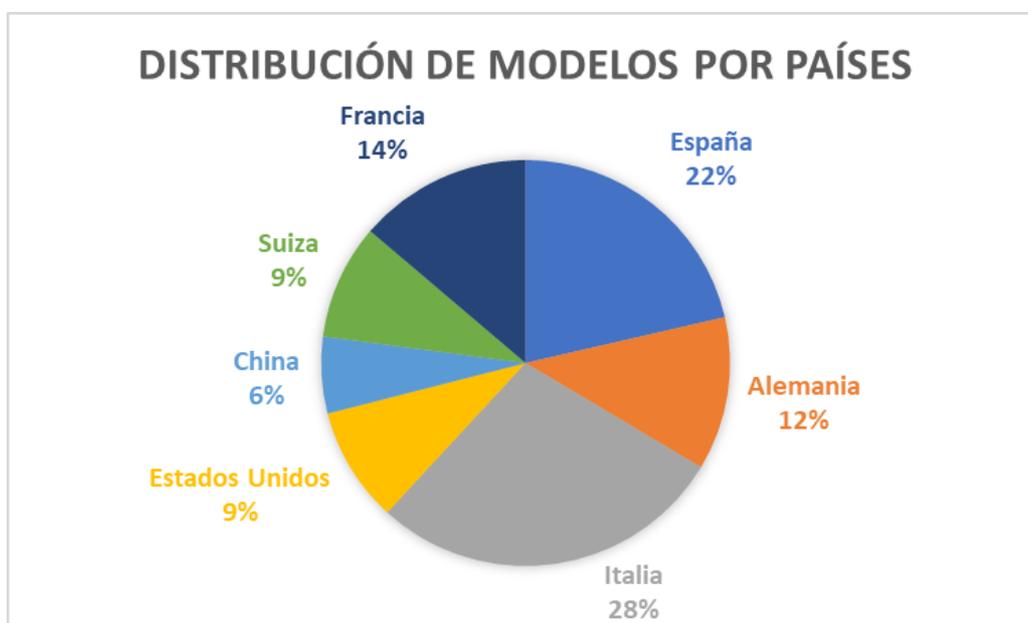


Figura 25. Distribución de modelos de calderas pirotubulares por Países de fabricación

- Distribución por Fluido caloportador

En los apartados anteriores se ha discutido sobre los motivos para elegir los diferentes tipos de fluidos caloportadores disponibles en el mercado. Esa discusión concluyó que para una mayoría de industrias y aplicaciones, el fluido de trabajo más conveniente es el vapor saturado. Esto queda ratificado al analizar los datos obtenidos de los fabricantes de calderas, donde más de un 50% de las calderas trabajan con vapor saturado. Los resultados del análisis se muestran en la Figura 26.

Para realizar este análisis, se han considerado como diferentes modelos las calderas que son compatibles con más de un fluido caloportador.

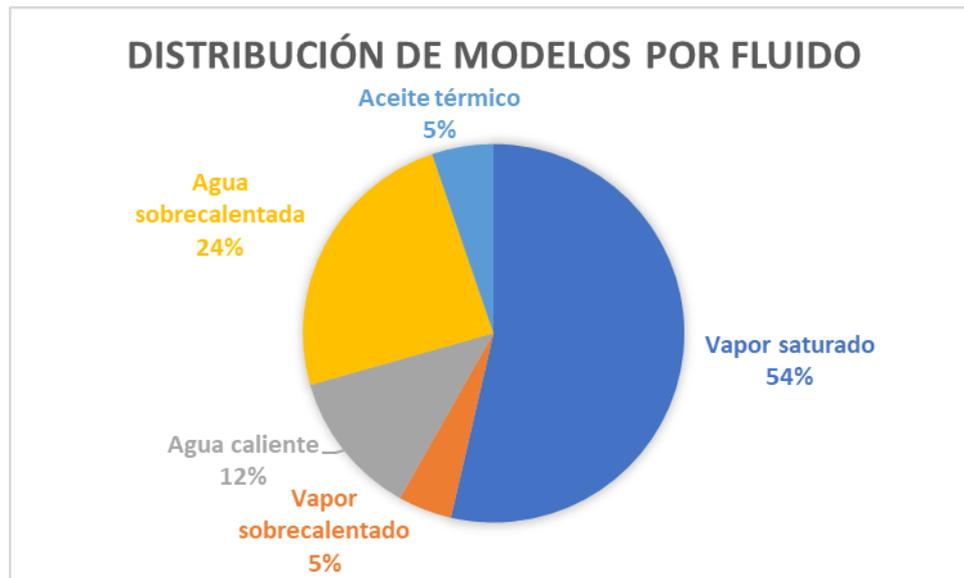


Figura 26. Distribución de modelos de calderas pirotubulares por Fluido caloportador

- Distribución por Combustible

Uno de los análisis más interesantes es el de modelos de caldera por tipos de combustible. En la Figura 27 se han representado los porcentajes de calderas pirotubulares que queman cada combustible. De la misma forma que en el análisis de fluido caloportador, para las calderas que aceptan más de un tipo de combustible al ser compatibles con quemadores diferentes, se ha considerado cada combustible como un modelo diferente.

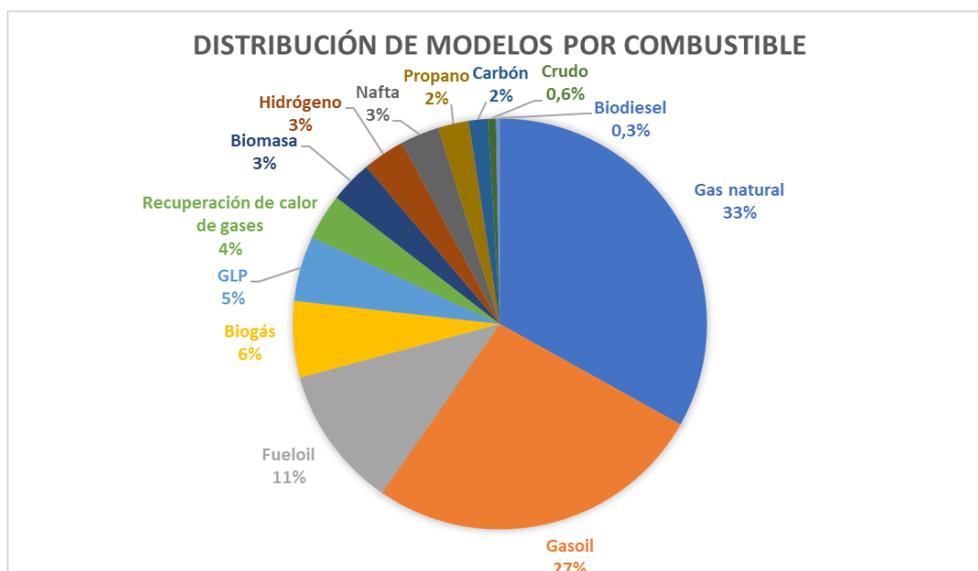


Figura 27. Distribución de modelos de calderas pirotubulares por Combustible

A pesar del cada vez mayor uso de combustibles renovables, se observa que los combustibles más utilizados siguen siendo fósiles, como el gas natural y el gasoil, que acaparan entre los dos el 60% de los modelos. Esta tendencia se puede apreciar mejor en la Figura 28, donde se muestran los porcentajes de modelos que usan combustibles renovables y no renovables.

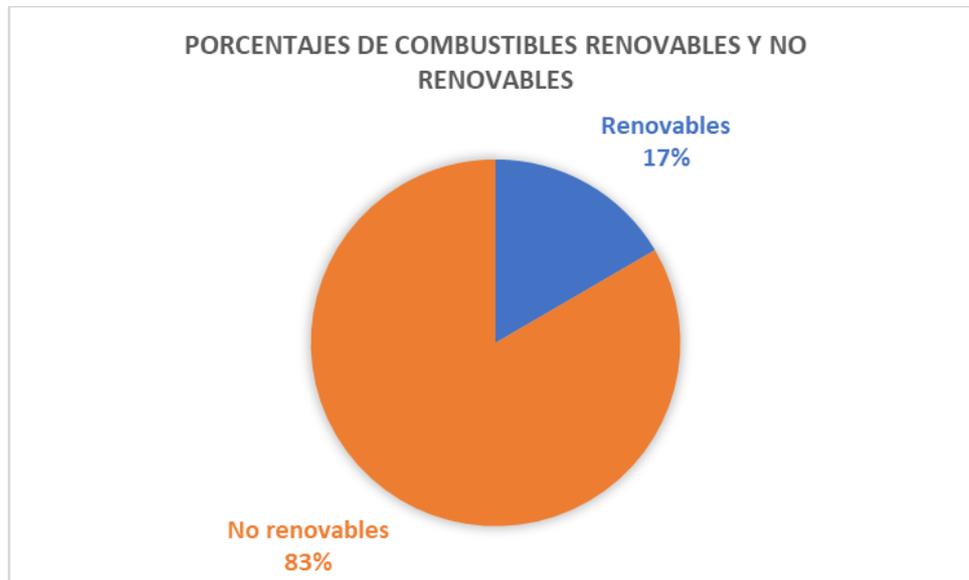


Figura 28. Porcentaje de modelos que usan combustibles renovables y no renovables

Para realizar esta estadística se han considerado como renovables las calderas que recuperan calor de gases de combustión, al tratarse de una energía residual que de otra forma no se aprovecharía, y las calderas de hidrógeno, ya que el motivo principal para utilizar hidrógeno como combustible es su baja huella de carbono, que solo se consigue si el origen de este hidrógeno es verde (proveniente de fuentes renovables). No tiene sentido, con los precios actuales, utilizar como combustible hidrógeno proveniente de fuentes no renovables, ya que las emisiones equivalentes van a ser similares a aquellas de combustibles fósiles y los costes de operación e implementación van a ser mayores.

Otra conclusión que se puede obtener de este análisis es que, a pesar de que los combustibles fósiles siguen siendo mayoritarios, el combustible fósil más utilizado es el gas natural, que en términos de emisiones es más respetuoso que otros como el carbón, que representa un porcentaje muy pequeño. Esto es en parte debido a que la mayoría de fabricantes que se han tenido en cuenta en este análisis son europeos, donde la normativa de emisiones es más estricta. Es esperable que la distribución de combustibles sería distinta con más fabricantes de China o India, donde es más común el uso del carbón como combustible.

- Distribución por Disposición del haz tubular

Otro de los parámetros principales a la hora de solicitar una caldera pirotubular es la disposición de la carcasa. En apartados anteriores se destacó que la disposición más común es la horizontal, y que solo se suele recurrir a calderas de disposición vertical en aplicaciones con espacio limitado. Esto se confirma al observar la Figura 29, que representa el porcentaje de calderas estudiadas con disposición vertical y horizontal, siendo la gran mayoría horizontal.

Algunos modelos de calderas de pequeño tamaño daban la opción de instalar la caldera con disposición vertical u horizontal. Para estos casos se han considerado dos modelos de caldera diferentes.



Figura 29. Distribución de modelos de calderas piro-tubulares por Disposición del haz tubular

- **Inclusión de Bomba de alimentación**

Según el análisis realizado que se puede observar en la Figura 30, aproximadamente un 60% de los modelos de calderas tienen incluida la bomba de alimentación en su paquete de venta. Esto suele ocurrir porque o bien el mismo fabricante de la caldera también tiene una línea de negocio de bombas, o bien ha llegado a acuerdos con fabricantes de bombas para venderlas en conjunto.

Generalmente la utilización de esta bomba es recomendable ya que está diseñada y probada para funcionar con un alto rendimiento para el rango de caudales de la caldera. Algunos fabricantes incluso pueden incluir una segunda bomba de repuesto.

Para la elaboración de esta tabla, se ha considerado como bomba no incluida los modelos de los fabricantes que no mencionaban explícitamente que sí estaba incluida. Se ha decidido así ya que no se ha encontrado en ningún catálogo o web que se dijera que no estaba incluida, simplemente es una información que se omitía.

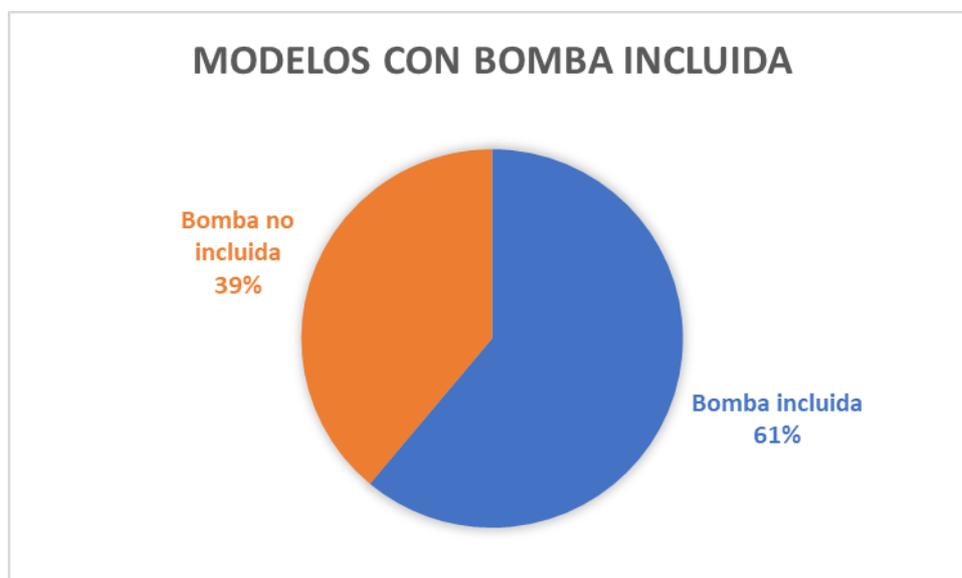


Figura 30. Porcentaje de modelos con Bomba de alimentación incluida

- Potencia frente a Presión nominal

En la Figura 31 se ha representado la potencia nominal de cada caldera frente a su presión nominal. Para este análisis han quedado excluidos los modelos de los cuales no se tenía información de alguno de los dos parámetros.

Observando el diagrama a simple vista, no parece que haya una relación directa entre ambos parámetros. Esto tiene sentido, ya que la potencia, más que con la presión, está relacionada con el caudal de fluido caloportador. Es cierto que a mayor presión mayor es la entalpía del fluido, pero ese incremento no es tan significativo como el hecho de producir mayor o menor caudal, que aumenta de forma más rápida la potencia de una caldera.

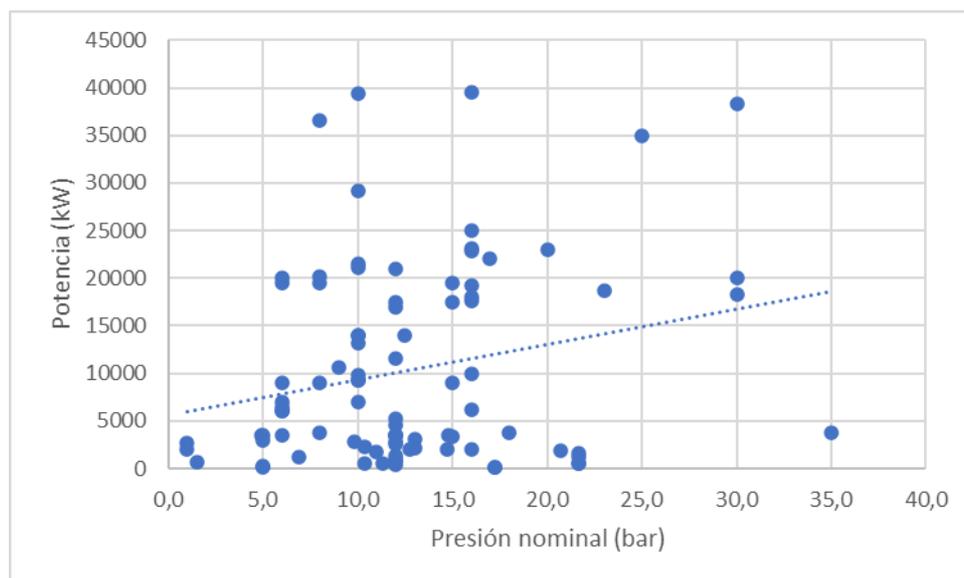


Figura 31. Potencia frente a Presión nominal de cada modelo de caldera piro-tubular

Por ese motivo, existen calderas con mucha potencia, pero no tan alta presión, ya que generan un caudal muy elevado. Aun así, si se representa la tendencia, se observa que la potencia asciende a medida que aumenta la presión de generación, ya que no existen muchos modelos que produzcan poco caudal a alta presión.

- Caudal de fluido caloportador frente a Presión nominal

En la Figura 32 se ha representado el caudal de fluido de cada caldera frente a su presión nominal. Se observa que sigue una tendencia bastante similar al diagrama de la potencia, lo cual es lógico por los mismos motivos que se utilizaban para la potencia.

Cabe mencionar que para este análisis no se han tenido en cuenta las calderas con fluidos térmicos líquidos, como el agua caliente, el agua sobrecalentada y el aceite térmico. Esta decisión se ha tomado debido a que en estos fluidos el salto de entalpía es menor que en el vapor, debido a que no se produce un cambio de fase. Por ese motivo, para una misma potencia una caldera de agua tiene mucho mayor caudal que de vapor.

A raíz de esto, se decidió hacer una gráfica para fluidos líquidos y otra para fluidos gaseosos, pero en los catálogos de calderas de agua caliente o sobrecalentada generalmente solo se suele dar el dato de la potencia de la caldera, no del caudal.

El caudal se podría haber calculado con la presión de trabajo y la temperatura del agua de alimentación, ya que se podría calcular el salto de entalpías, sin embargo, no muchos fabricantes aportan ese dato, por lo que el análisis no hubiera sido muy representativo.

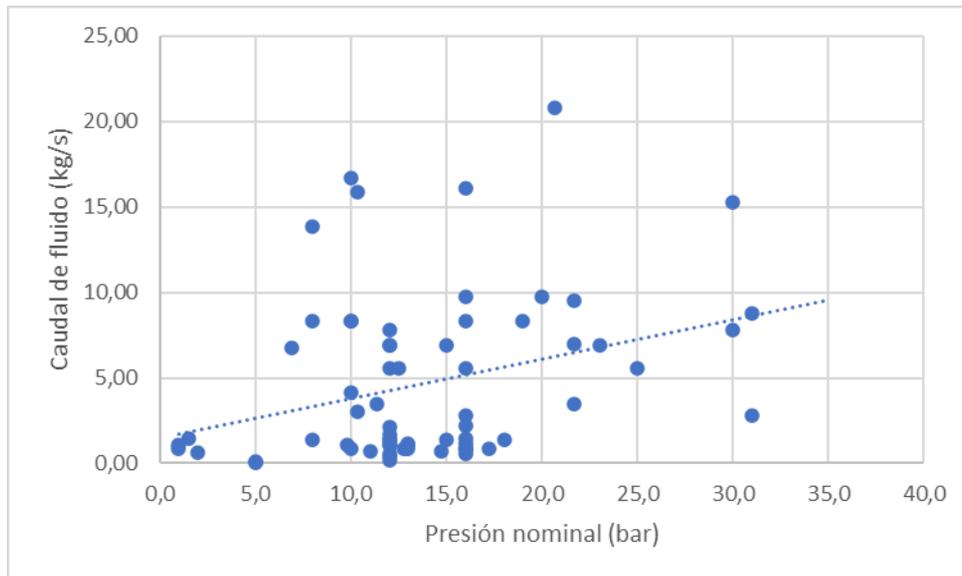


Figura 32. Caudal de fluido frente a Presión nominal de cada modelo de caldera pirotubular

- Rendimiento nominal frente a Presión nominal

Como se adelantó en el apartado 3.2, el rendimiento es uno de los parámetros más importantes de una caldera pirotubular. Generalmente, estos equipos suelen diseñarse para tener vidas útiles de decenas de años, por lo que una diferencia de décimas en el rendimiento puede suponer millones de euros a largo plazo. Esto es todavía más significativo en calderas con caudal elevado.

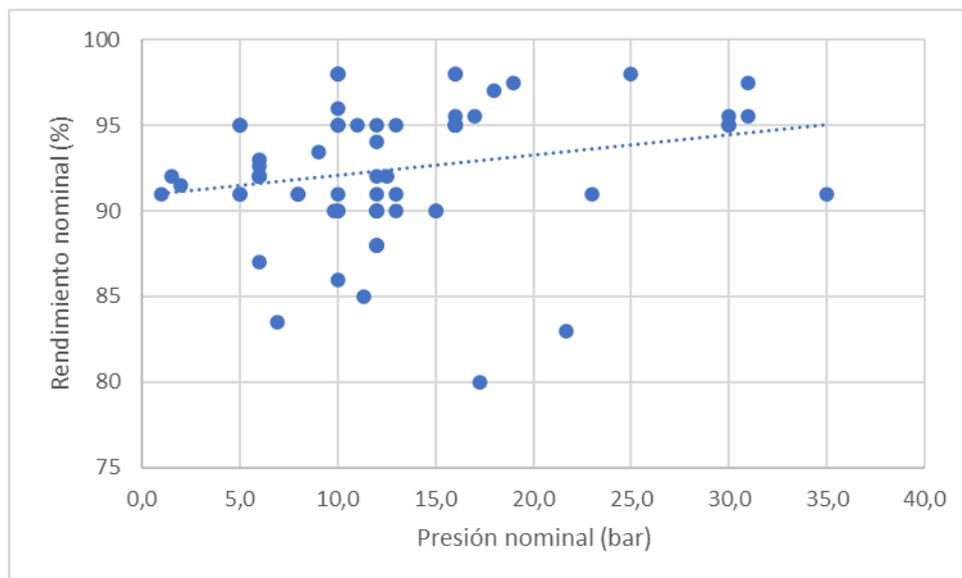


Figura 33. Rendimiento nominal frente a Presión nominal de cada modelo de caldera pirotubular

En la Figura 33 se puede apreciar que existe una pequeña tendencia a que las calderas con más presión tengan mayor rendimiento. Esto tiene sentido ya que como se ha observado en el punto anterior, las calderas con más presión de generación suelen ser también las que tienen mayor caudal. Esto premia la implementación de medidas que aumenten el rendimiento, ya que a igual rendimiento, mayores son las pérdidas en una caldera más grande. Una caldera más grande significa que las pérdidas por transmisión son menores, ya que la proporción Volumen/Área exterior es menor. Además, en este tipo de calderas es prácticamente obligatorio instalar economizadores y precalentadores debido a que la inversión se rentabiliza muy rápidamente con el aumento del rendimiento.

La mayoría de los fabricantes dan el rendimiento calculado con el PCI. Los modelos que usan el PCS lo hacen porque tienen incluidos un economizador de condensación, que permite alcanzar temperaturas tan bajas que la humedad del aire acaba condensándose, cediendo el calor al agua de alimentación. Sin embargo, esto ha ocurrido en menos de 5 modelos, por lo que han sido excluidos del análisis.

- Rendimiento nominal frente a Potencia nominal

En la Figura 34 se representa el rendimiento nominal frente a la potencia nominal. Se puede apreciar una distribución bastante similar a la del punto anterior donde se representaba el rendimiento nominal frente a la presión nominal. La explicación es la misma, calderas más grandes, con mayor caudal y potencia, tienen más medidas para mejorar el rendimiento.

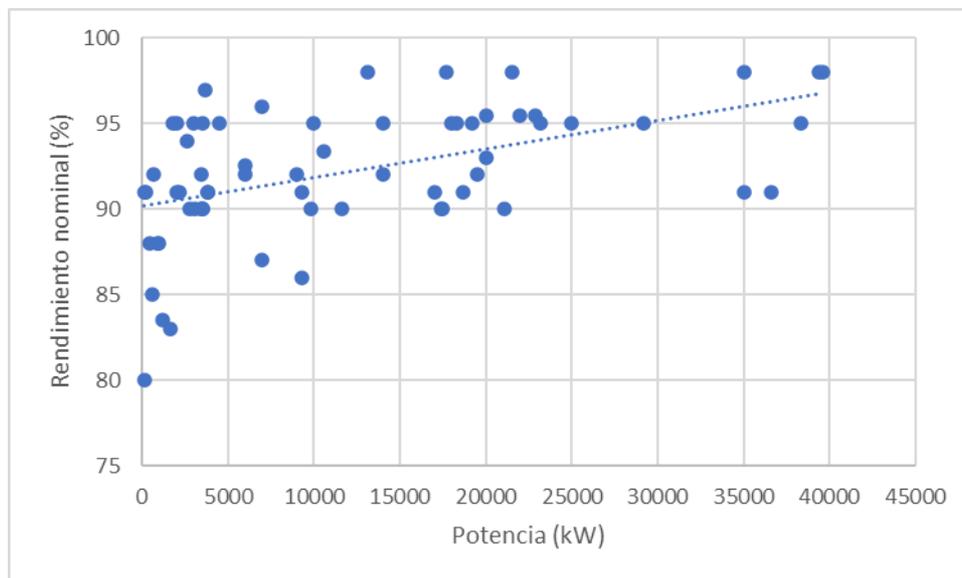


Figura 34. Rendimiento nominal frente a Potencia nominal de cada modelo de caldera pirotubular

- Potencia nominal frente a Número de pasos de humos

En la Figura 35 se representa la potencia nominal frente al número de pasos de humos para cada modelo de caldera pirotubular. Como en anteriores análisis, se han excluido los modelos de los cuales no se contaba con alguna de las dos variables.

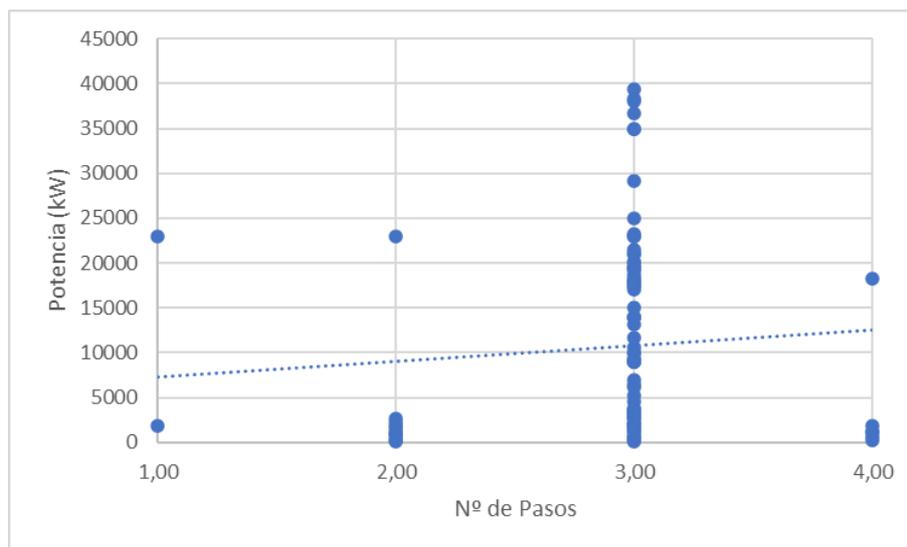


Figura 35. Potencia nominal frente a Número de pasos de cada modelo de caldera pirotubular

Como se puede observar, la gran mayoría de modelos, sin importar la potencia, cuentan con tres pasos de humos. Aun así, se observa una tendencia a aumentar la potencia a medida que aumenta el número de pasos. Esto sucede porque calderas con mayor número de pasos suelen ser más voluminosas y pueden abastecer mayores caudales de fluido, por lo que su potencia es superior.

- Presión nominal frente a Número de pasos de humos

En la Figura 36 se representa la presión nominal frente al número de pasos de humos para cada modelo de caldera pirotubular. Existe una ligerísima tendencia a disminuir la presión a la vez que aumenta el número de pasos, pero la tendencia es tan suave que se podría concluir que son dos parámetros que no albergan relación.

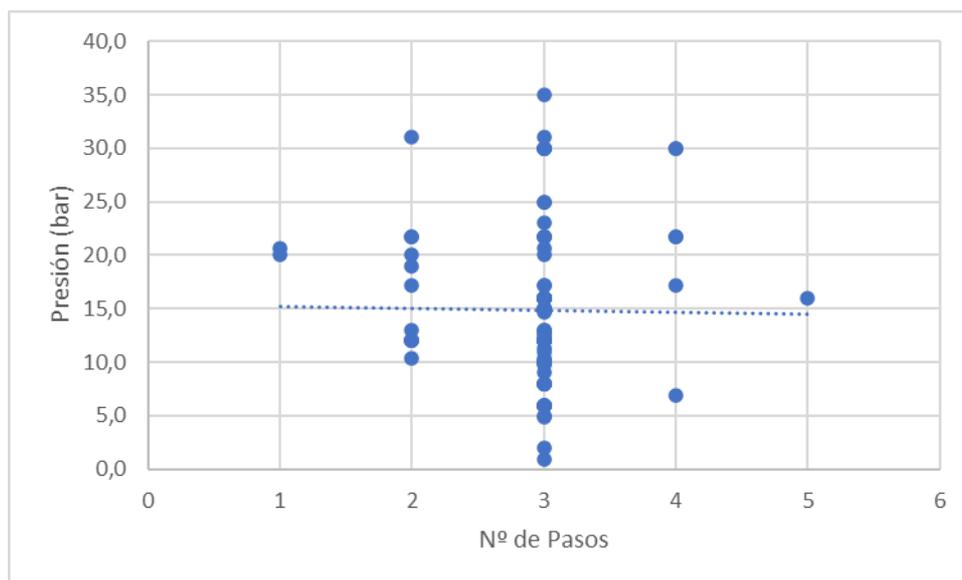


Figura 36. Presión nominal frente a Número de pasos de cada modelo de caldera pirotubular

- Rendimiento nominal frente a Número de pasos de humos

En la Figura 37 se representa el rendimiento nominal frente al número de pasos de humos para cada modelo de caldera pirotubular. En la teoría, un mayor número de pasos de humos permite disminuir la temperatura de escape de los gases, aumentando así el rendimiento térmico de la caldera. Sin embargo, en el diagrama prácticamente no se puede apreciar la tendencia al alza del rendimiento frente al número de pasos.

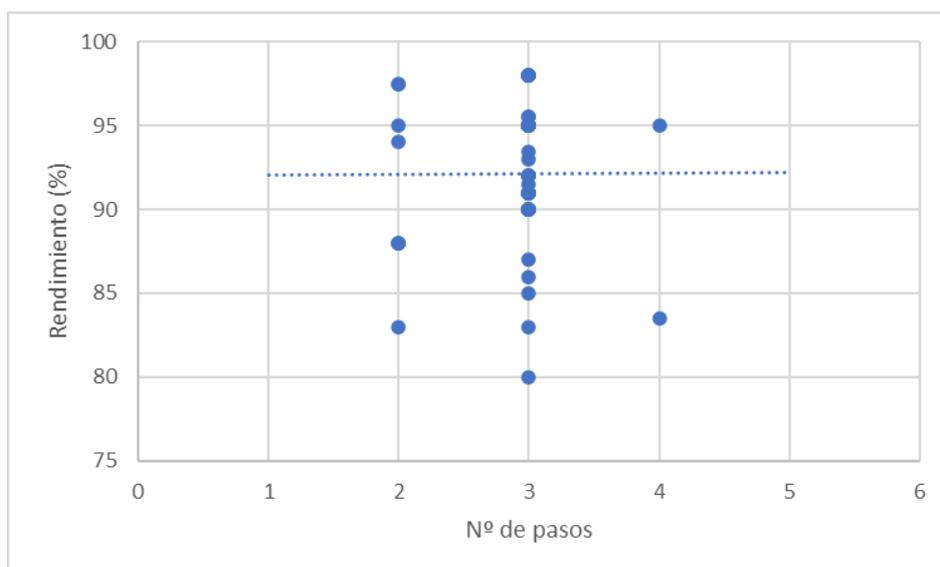


Figura 37. Rendimiento frente a Número de pasos de cada modelo de caldera pirotubular

Esto puede ser debido a que el número de calderas con número de pasos distinto a 3 es muy pequeño en este análisis (solo 5 de 2 pasos y 2 de 4 pasos), por lo que el análisis no es muy representativo al ser la gran mayoría de calderas del mismo número de pasos.

- Longitud del generador frente a Diámetro exterior

En la Figura 38 se han representado los diámetros de las calderas pirotubulares frente a sus longitudes. Como era de esperarse, se observa que son dos parámetros muy ligados y que tienen a aumentar proporcionalmente.

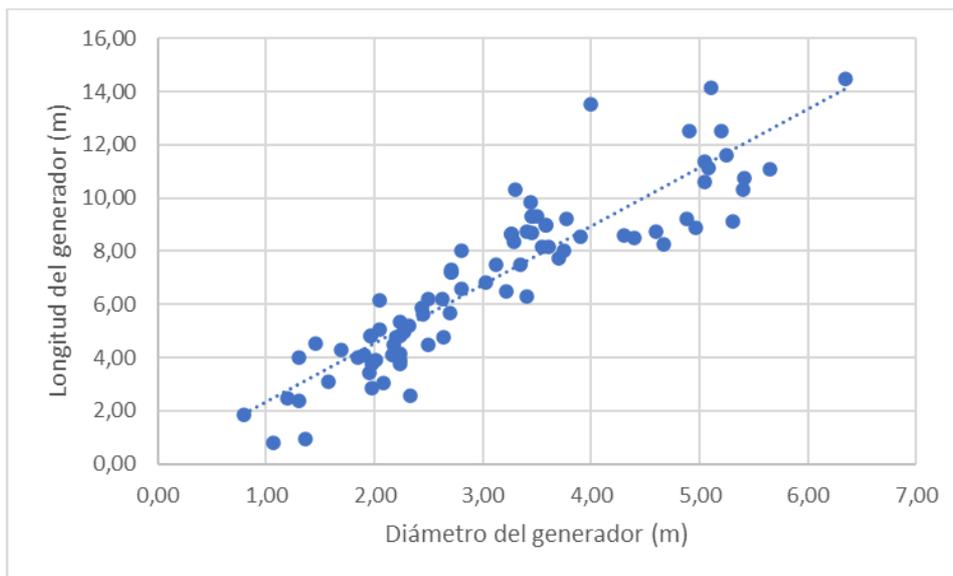


Figura 38. Longitud frente a Diámetro exterior de cada modelo de caldera pirotubular

Para meter en el análisis a las calderas verticales, se ha considerado su altura como longitud. Algunos de los modelos representados se pueden salir un poco de la relación de tamaños media debido a que emplean combustibles sólidos o son de aceite térmico.

- Peso frente a Potencia nominal

En la Figura 39 se ha representado el peso de las diferentes calderas pirotubulares frente a la potencia. El parámetro del peso sacado de los catálogos de los fabricantes ha sido el peso del generador vacío. El peso del generador lleno en funcionamiento será considerablemente superior.

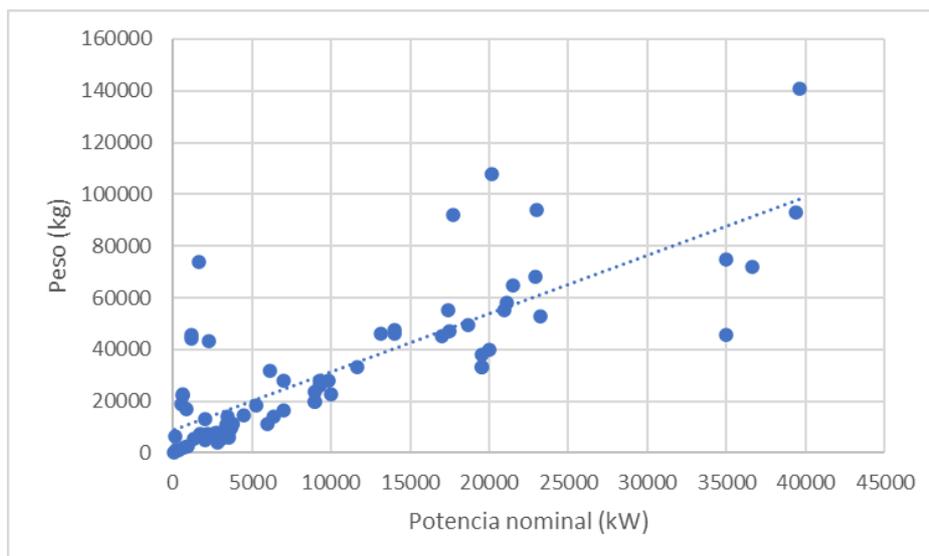


Figura 39. Peso frente a Potencia nominal de cada modelo de caldera pirotubular

Se observa que gran parte de las calderas pesan menos de 40 toneladas. Las calderas más pesadas han sido las de doble hogar y las de combustibles fósiles que requieren de la parrilla y demás equipos de limpieza de cenizas y residuos.

- Potencia nominal frente a Diámetro de salida de los gases

En la Figura 40 se ha representado la potencia nominal de las diferentes calderas pirotubulares frente al diámetro de salida de los gases. Se observa que a mayor potencia, mayor es el caudal de combustible que se quema, y por tanto mayor es el diámetro de salida de los gases de la caldera para expulsar dichos gases.

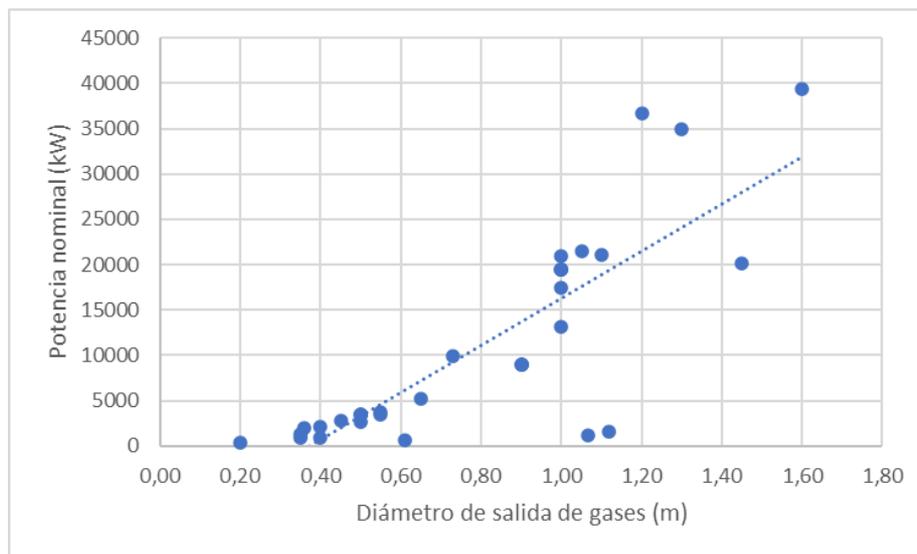


Figura 40. Potencia nominal frente a Diámetro de salida de gases de cada modelo de caldera pirotubular

# 4 RESUMEN Y CONCLUSIONES

---

## 4.1. Resumen

El objetivo del trabajo es realizar un análisis paramétrico de los modelos de mercado actuales de calderas pirotubulares.

Antes de empezar con el análisis se ha descrito qué son las calderas pirotubulares, cómo son las instalaciones en las que se encuentran y qué otros equipos forman parte de dichas instalaciones. Esta información es necesaria para posteriormente realizar el análisis paramétrico.

Una vez ya se había entendido el contexto de este tipo de equipos se ha entrado a analizar más en detalle las diferentes tipologías de calderas pirotubulares. Se ha hablado de las diferentes aplicaciones, mantenimientos necesarios para su correcto funcionamiento y parámetros más importantes.

Dentro de dichos parámetros, se han estudiado más a fondo aquellos que son determinantes a la hora de seleccionar un modelo de caldera para una instalación.

Por último, se ha realizado el estudio paramétrico con los diferentes parámetros y se han obtenido unos resultados.

## 4.2. Conclusiones

Las conclusiones obtenidas en este estudio están basadas en la base de datos de calderas pirotubulares, que ha sido recopilada a partir de los catálogos y webs de unos fabricantes preseleccionados. Dichas conclusiones son:

- Más del 75% de los fabricantes analizados cuenta en su catálogo con al menos 5 modelos diferentes de calderas pirotubulares. Esto incluye diferentes fluidos y combustibles.
- Solo un 22% de los parámetros estudiados han sido obtenidos para una representación de más del 75% de los modelos. Y 39% de los parámetros solo han sido obtenidos para menos del 25% de los modelos.
- Más del 90% de los modelos estudiados presenta entre el 20 y el 50% de los parámetros analizados.
- El 85% de los modelos analizados son fabricados en Europa, siendo un 22% del total en España.
- El vapor saturado representa un 54% de los modelos. Le siguen agua sobrecalentada, agua caliente, vapor sobrecalentado y aceite térmico.
- El gas natural y el gasoil constituyen más del 60% de los combustibles. El combustible verde con más modelos es el biogás con un 6% del total. Si se agrupan los combustibles fósiles y los verdes, los primeros representan un 83% del total de los modelos.
- El 94% de los modelos estudiados cuenta con haz tubular en posición horizontal.
- El 61% de los modelos de los modelos analizados incluye al menos una bomba de alimentación entre los extras de la caldera.
- La tendencia de la potencia de los modelos analizados es a aumentar con la presión de generación. Lo mismo se puede decir del caudal nominal.

- La tendencia del rendimiento nominal de los modelos analizados es a aumentar con la presión de generación.
- La tendencia del rendimiento nominal de los modelos analizados es a aumentar con la potencia nominal.
- La tendencia de la potencia nominal de los modelos analizados es a aumentar con el número de pasos de humos en la caldera.
- La tendencia de la presión nominal y del rendimiento de los modelos analizados no se ven afectadas por el número de pasos de humos de la caldera.
- La tendencia de la longitud del generador de los modelos analizados es a aumentar con el diámetro exterior.
- La tendencia del peso de los modelos analizados es a aumentar con la potencia nominal.
- La tendencia la potencia nominal de los modelos analizados es a aumentar con el diámetro de salida de humos.



# REFERENCIAS

---

- [1] AENOR y Kawarna, «Eficiencia Energética en el Sector Industrial».
- [2] Fenercom, «Guía Básica Calderas industriales Eficientes». 2013.
- [3] Spirax-Sarco, «Guía de Selección de Calderas».
- [4] J. Suárez, «Retrofit del Desaireador». [En línea]. Disponible en: <https://www.mrfpr.com/post/retrofit-del-desaireador>
- [5] Spirax-Sarco, «Accesorios de Calderas».
- [6] «Steam Traps | Watson McDaniel». <https://www.watsonmcdaniel.com/Products/Steam-Traps> (accedido 9 de septiembre de 2023).
- [7] Spirax-Sarco, «Generación de Vapor».
- [8] «Used Volcano Low Pressure Steam Boiler for Sale at Steep Hill Equipment Solutions». <https://www.steephillequipment.com/listings/4041982-used-volcano-low-pressure-steam-boiler> (accedido 4 de septiembre de 2023).
- [9] I. B. Noguera, «La destilación flash», *Ingeniería Química Reviews*. <https://www.ingenieriaquimicareviews.com/2020/07/destilacion-flash.html> (accedido 9 de septiembre de 2023).
- [10] Centro para el Ahorro y Desarrollo Energético y Minero, «Calderas de vapor». 1996.
- [11] A. M. Lahijani y E. E. Supeni, «Evaluating the Effect of Economizer on Efficiency of the Fire Tube Steam Boiler», en *Innovative Energy & Research*, 2018. doi: 10.4172/2576-1463.1000193.
- [12] D. Aguilar Vizcarra, D. Esenarro, y C. Rodriguez, «Three Steps Mixed (Fire Tube–Water Tube) Vertical Boiler to Optimize Thermal Performance», *Fluids*, vol. 6, n.º 3, p. 93, feb. 2021, doi: 10.3390/fluids6030093.
- [13] «El futuro de la biomasa». <https://www.hogarsense.es/calefaccion/futuro-biomasa> (accedido 7 de septiembre de 2023).
- [14] D. Velázquez, «Apuntes de la asignatura de Instalaciones Térmicas del Grado de Ingeniería de la Energía de la Universidad de Sevilla».
- [15] «Cogeneration». <https://technicalcircular.files.wordpress.com/2015/12/2-7-cogeneration-revised-table-format.pdf>