

# Capacitación operadores de una para técnicos aspirantes a refinería de petróleo

MODULO 7  
CALDERAS y HORNOS



## 7A: Generador de vapor

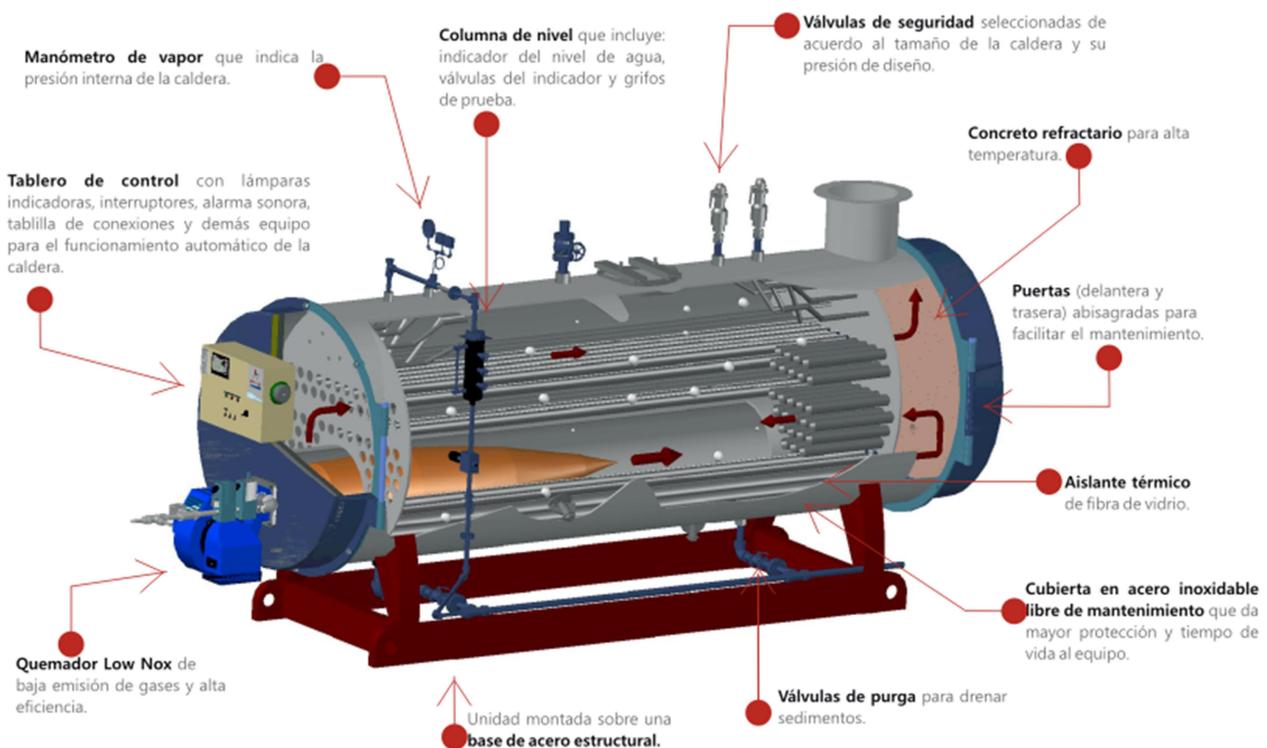
La mayoría de las industrias se vale de muchos de los procesos que hay en las Operaciones Unitarias para aprovechar el calor. Uno de estos procesos de transferencia de calor se aprovecha cuando utilizamos un generador de vapor (o caldera).

### ¿Qué es una caldera?

Son instalaciones industriales que, aplicando el calor generado por la combustión de un combustible sólido, líquido o gaseoso (puede ser una complicación desde el punto de vista del manejo de la operación), aprovechan dicho calor para vaporizar o calentar el agua para aplicaciones industriales. Esta transformación (que convierte el agua líquida en gaseosa) de alguna manera está asociado a las transferencias de calor, previamente vistas.

En una caldera están presentes estos fenómenos de transferencia de calor tanto por conducción, por convección y por radiación. Pero principalmente, los fenómenos que más se destacan son los de convección y radiación.

**¿Qué pasa?** Generalmente, este equipo de transformación consta de un formato que va a contener líquido que queremos transformar en vapor, y una zona donde se va a producir la combustión para aprovechar el calor que estamos generando.



### Generación de vapor

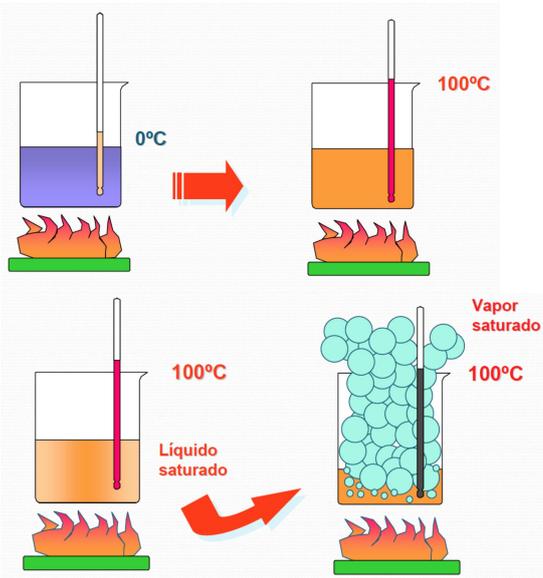
Se produce en una caldera. Básicamente es un tacho donde se hierve agua, se genera vapor que luego se va a distribuir por medio de cañerías. Esa sería la función práctica de llevar el vapor a los distintos consumidores (que pueden ser una zona de precalentamiento de otro fluido, una zona para secar otro fluido en contacto, una camisa calefactora para una reacción química en un proceso industrial, o en su defecto se lo hace pasar a través de un radiador que tiene un ventilador y así calefaccionar un ambiente).

El vapor, en general, es uno de los fluidos más versátiles para la transferencia de calor de un lugar a otro. Por eso es la gran aplicación que tiene en la industria: lo genero en la caldera y lo distribuyo en diferentes lugares alejados de ella, porque se puede conducir a través de cañerías. Entonces, cuando nosotros generemos vapor, ese vapor va a tener agua, en la mayoría de los casos, para aprovecharla en otros equipos de alguna otra manera, tanto como para calefacción, como la transformación a través de la entrega de calor que hace ese vapor.

Hay un caño principal o eje de distribución y caños que son adicionales para los diferentes equipos, que terminan generalmente en una trampa de vapor. Ésta no permite que el vapor se escape del equipo si no ha condensando convenientemente el vapor y se ha transformado en agua nuevamente. La trampa es importante para evitar que el vapor generado escape del sistema (o del equipo con que se esté trabajando) sin haber entregado totalmente su calor latente de condensación.

Los circuitos tienen un colector principal después de la trampa para recolectar el fluido condensado, que es un fluido caro industrialmente (el tratamiento de agua de calderas es caso, se gasta desde el punto de vista químico, el físico, de almacenamiento; todo eso le va agregando peso y trae como consecuencia que el fluido agua tenga un costo para nuestra industria). Por ello, hay que tomar el fluido, siempre que se justifique, y devolverlo a través de una cañería colectora para nuevamente reingresarle a la caldera o mezclarlo con agua que se está tratando. No se usa cualquier tipo de agua, el agua que se utiliza generalmente se tiene que ablandar.

### La energía del vapor



En general, el agua va a absorber calor hasta alcanzar una cierta temperatura, que a la presión atmosférica es de  $100^{\circ}\text{C}$ . Pero a partir de ahí empieza el otro proceso que sería de transformación de cambio de fase, que va desde el estado líquido al estado gaseoso, que consume muchas más Kcal que las Kcal que cambian la temperatura del agua. Esa transformación es lo que se llama "vapor saturado" (a los  $100^{\circ}\text{C}$  equivale a consumir aproximadamente unas 550-560 kcal/kg de lo que estamos transformando, contra 1 kcal/kg por  $1^{\circ}\text{C}$  que va subiendo, o sea 100kcal/kg para llevarlo de 0 a  $100^{\circ}\text{C}$ ). Esa es la importancia que tiene el vapor como medio para llevar calor hacia los otros equipos.

**¿Qué se aprovecha?** La capacidad que tiene el agua de transformarse en vapor, llevar y viajar como vapor, y entregar su calor latente de condensación en el equipo donde se requiere, devolviendo ese calor al aprovechamiento que queremos hacer: *ese vapor sale de la caldera con una cierta cantidad de calor generado por el calor latente de vaporización, es transportado al equipo y en el equipo devuelve el calor al consumidor condensándose otra vez en agua (ese vapor), y escapa a través de trampas de vapor (que son justamente colectivas) y vuelve por un retorno a la caldera.*

### Tablas de vapor

Presión (bar m)	Temperatura (°C)	hf (kJ/kg)	hfg(kJ/kg)	hg(kJ/kg)	Vol. esp. (m <sup>3</sup> /kg)
0.0	100.00	419.0	2257.0	2676	1.673
1.0	120.42	505.6	2201.1	2706.7	0.881
2.0	133.69	562.2	2163.3	2725.5	0.603
5.0	158.92	670.9	2086.0	2756.9	0.315
10.0	184.13	781.6	2000.1	2781.7	0.177
15.0	201.45	859.0	1935.0	2794.0	0.124
21.0	217.35	931.3	1870.1	2801.4	0.0906

En la medida que la presión aumenta también lo hace la temperatura del vapor, y también aumenta el calor total. Pero ese calor total está compuesto por una parte que es calor sensible y otra que es el calor latente, y a medida que aumentan las presiones, esos valores van disminuyendo de alguna manera, de forma tal de que hacen que el valor del vapor como calefactor vaya disminuyendo. **¿Qué significa esto?** Que la mayoría de las aplicaciones que queremos usar en las industrias utilizan vapor de baja presión. ¿Qué sería este vapor de baja presión? En los diseños de cualquier caldera que utilizan las industrias, está valorado de alguna forma que no más de 10 kg de presión de trabajo: sería como el máximo que puede utilizar la industria para el aprovechamiento del vapor como sujeto calefactor en los equipos. Ahora, si necesito un vapor que tenga energía para mover una turbina, por ejemplo, para generar energía eléctrica, los valores de la presión que pueda trabajar esta caldera tiene que superar ampliamente esa presión. Se hablan de presiones de 150-200 kg en las centrales termoeléctricas donde el vapor en realidad es un vapor que no se necesita para calefaccionar, aunque contiene un alto grado de calefacción pero si se necesita para producir un cambio en el movimiento de una turbina. Entonces el vapor sirve para un movimiento que cambia de energía potencial (que sería energía de presión) por energía cinética, y esa energía cinética al mover el rotor de un generador, produce energía eléctrica.

#### Factores Determinantes para la Selección de Calderas

- Aplicaciones relacionadas con la Presión de Trabajo y el Caudal de Vapor a utilizar.
  - Calefacción
  - Utilización en Procesos Industriales
  - Generación de energía Eléctrica
- Otros usos:

Usuarios pesados	Usuarios medianos	Usuarios ligeros
Comida y bebidas	Calefacción y ventilación	Electrónicos
Farmacéuticos	Cocina	Horticultura
Refinería de petróleo	Curado	Aire acondicionado
Químicos	Enfriamiento	Humidificación
Plásticos	Fermentación	
Celulosa y papel	Tratamiento	
Refinería de azúcar	Limpieza	
Textiles	Fundición	
Procesamiento de metales	Horno	
Caucho y neumáticos	Secado	
Construcción naval		
Generación eléctrica		

#### Clasificación de calderas

Uso

- Móviles
- Estacionarias

Presión

- De mínima presión
- De baja presión
- De generación de fuerza

Materiales con que están construidas

Contenido de los tubos

- Calderas de tubos humo o piro tubulares
- Calderas acuotubulares

Forma y posición de los tubos

Fuente de calor y combustión

Sistema de circulación

- Circulación normal
- Circulación forzada

Posición del hogar

Tipo de fogón

Forma general

### Tipos de Calderas

- Calderas de acero.
- Calderas del tipo igneotubulares o de tubos de humo
- Calderas del tipo acuotubular o de tubos de agua
- Calderas horizontales de tubos rectos.
- Calderas de tubos curvados de circulación normal y forzada.
- Calderas de cuerpo de acero.
- Calderas de hierro colada.
- Calderas de diseño especial.

Principal clasificación

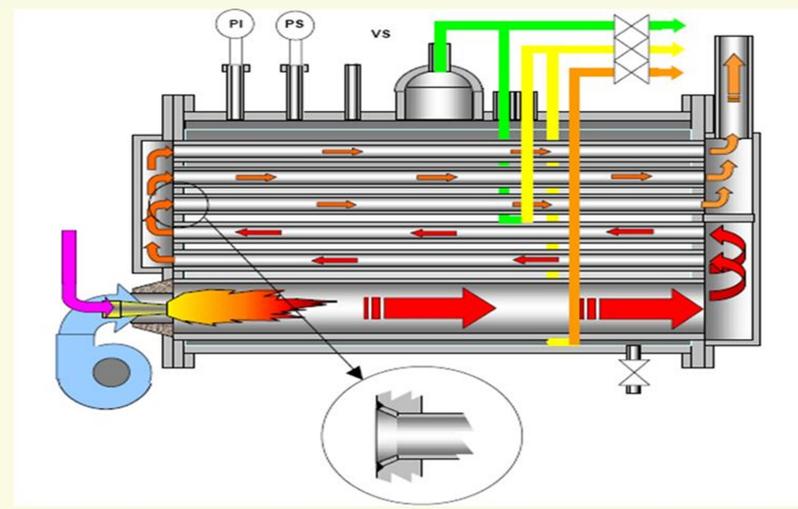
Humotubulares

Acuotubulares

### Calderas Humotubulares, Igneotubulares o Piro tubulares

Se produce la combustión de un cierto combustible. Tanto en la llama como en los humos, circulan a través de tubos. Esos tubos están rodeados por el agua que queremos vaporizar y por lo tanto ahí se produce la transferencia de calor, que en una primera parte se produce por radiación y después por convección del calor al agua. Una vez que se alcanza una cierta temperatura, se produce la vaporización.

Los gases de combustión circulan por dentro de los tubos, y el agua los rodea por fuera



Consta de:

1. Quemador.
2. Cuerpo físico (hogar): es donde se produce la combustión.
3. Tubos: por donde circulan los gases una vez producida la combustión.
4. Masa de agua: rodea a los tubos.

Esto produce efectos de transferencia:

- la radiación la llama impacta sobre el hogar que está rodeado por el agua, y se transfiere calor de radiación
- y después los humos que circulan por los tubos, por convección también transfieren calor.

Algunas paredes ofrecen una pared de choque para que, por si la llama es muy larga, no golpee la zona sensible del equipo; y por otro lado, darle una cierta turbulencia a los gases de la combustión que atraviesan los tubos y salen por chimenea.

### Ventajas:

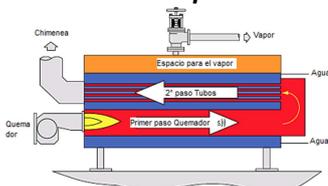
- ⇒Menor costo inicial debido a su simplicidad de diseño.
- ⇒Mayor flexibilidad de operación
- ⇒Menores exigencias de pureza en el agua de alimentación.

### Inconvenientes:

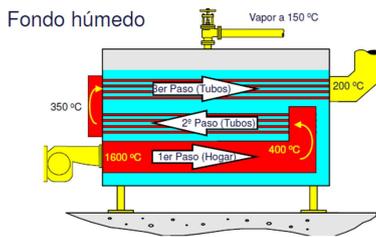
- ⇒Mayor tamaño y peso (Kg vapor/ m<sup>2</sup> sup. Calefacción).
- ⇒Mayor tiempo para subir presión y entrar en funcionamiento.
  - ⇒No son empleados para altas presiones ( $P < 12 \text{ Kg/cm}^2$ )
- ⇒Peligrosa porque es un tambor a presión, de gran diámetro, y si tiene alguna rotura y explota, hace mucho más daño que la rotura de una cañería.

Quando miramos un catálogo de calderas, vemos que encontramos de 1, 2, 3 y hasta 4 pasos. **¿Qué son los pasos?** Son la cantidad de veces que cambia de dirección el humo.

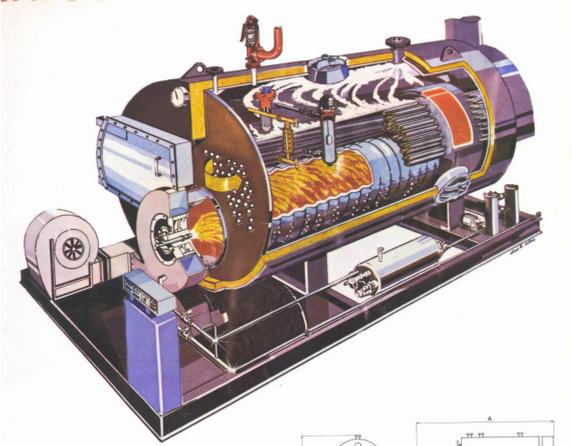
### Caldera de dos pasos



### Caldera de tres pasos



### Caldera humotubular de 3 pasos – Horno centrado



La caldera está en el centro del espacio físico, rodeada por tubos en ambos lados, y por una tapa o pared reflectora que permite el cambio de dirección, que está cerrada.

El quemador, y.....

El combustible puede llegar de un tanque líquido, puede ser gasoil o fueloil para quemar, o por medio de gas.

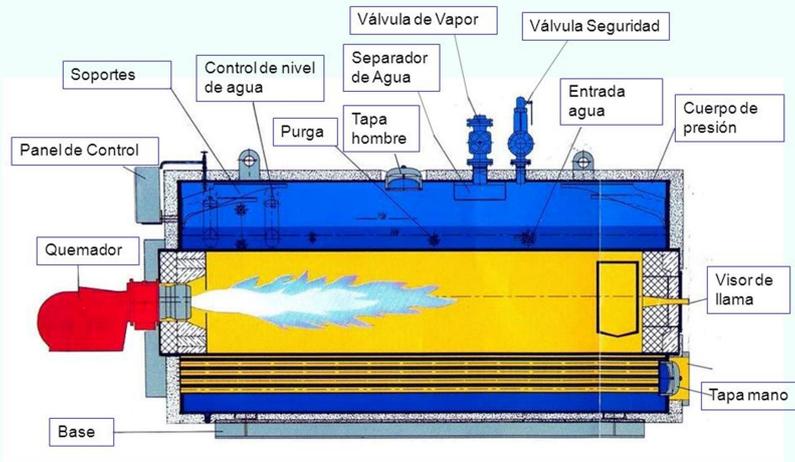
El cuerpo se encuentra sumergido hasta un cierto nivel con agua, y cuando se produce la vaporización escapa por la válvula de salida y va hacia el consumidor.

Hay otras calderas que tienen tubos corrugados: estos permiten generar una cierta turbulencia, y además le da mejor capacidad a la resistencia de aplastamiento que pueda sufrir (porque se puede aplastar por una presión que hay ahí).

NOTA: Hay dos formas de medir la presión: una es la absoluta y otra es la relativa (o manométrica).  $1\text{atm} = 1,033\text{ kg/cm}^2 = 760\text{ mmHg} = 10,33\text{ mca} = 14,69\text{ PSI} = 1,0133\text{ bar}$ . Puedo medir la presión desde un nivel del cero absoluto, desde el vacío hacia arriba; o medirlo desde su lugar que sería relativo.

Como se puede ver, el equipo consta de varias otras cosas como por ejemplo la bomba de agua que son las encargadas de alimentar el fluido que se va a ingresar en la caldera; está la parte donde se recibe el combustible, medidores de nivel para corroborar que se trabaje correctamente en un nivel que tape a los tubos, las válvulas de salida arriba, puertas para hacer el mantenimiento.

### PARTES PRINCIPALES DE LAS CALDERAS



Temperatura de trabajo: 1100-1200°C. El material con que está construido es un acero al carbono-silicio-manganeso, que es un acero especial para resistir altas temperaturas.

### Caldera humotubular de 3 pasos – Horno descentrado



Es más difícil de construir por un lado, pero mejora mucho la circulación por convección: el fluido se va a acercar a la zona más estrecha, va a pasar con una mayor velocidad y se va a llevar mucho más calor y va a producir una turbulencia mucho mejor que si el horno estuviera centrado. Esa es una ventaja para la transferencia de calor.

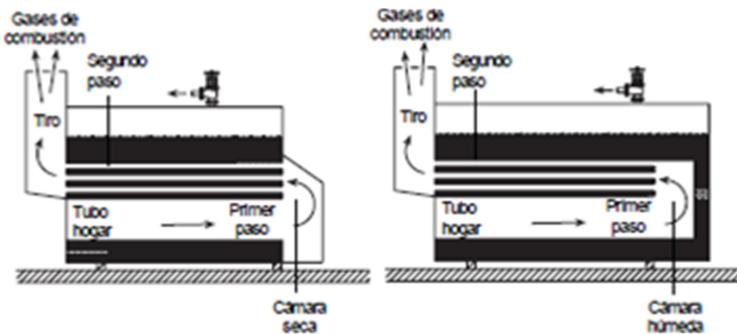


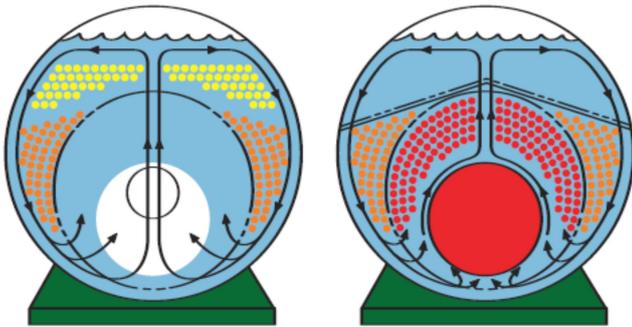
Fig. 2 Calderas con cámara seca

Fig. 2a Calderas con cámara húmeda

Caldera de fondo seco: al final del tubo hogar donde van a cambiar de dirección los tubos, hay una pared de un material que es resistente al calor. Problema: con el paso del tiempo empiezan a producirse reacciones químicas sobre el material, y después de eso hay un agrietamiento por cambios de temperatura que producen presiones diferenciales que logran que el refractario se desprenda y caiga, por lo tanto queda la chapa expuesta a la llama, eso se calienta y lleva a la destrucción del equipo.

Para evitar todos esos problemas, se utiliza una caldera de fondo húmedo: consiste en una cámara que está conectada con todo el cuerpo, en donde atrás tiene agua. Entonces, cuando se produce el choque en la pared del fondo, pasa agua que enfría permanentemente la chapa y asegura que no se deteriore. También mejora el rendimiento térmico del equipo porque se está llevando calor el agua que se utiliza como vapor. Tiene unos tensores que mantienen la chapa en su lugar, para evitar que ésta se hinche y explote.

### **Circulación de agua en una caldera humotubular**



### **Calderas acuotubulares**

El agua, en vez de circular por el tambor, ahora lo hace por los tubos y en el exterior están los procesos de combustión que le están entregando calor. Ejemplo: calefón instantáneo, consta de una camisa y un serpentín donde circula agua, se prende la llama del calefón, se calienta, entrega calor y sale agua caliente.

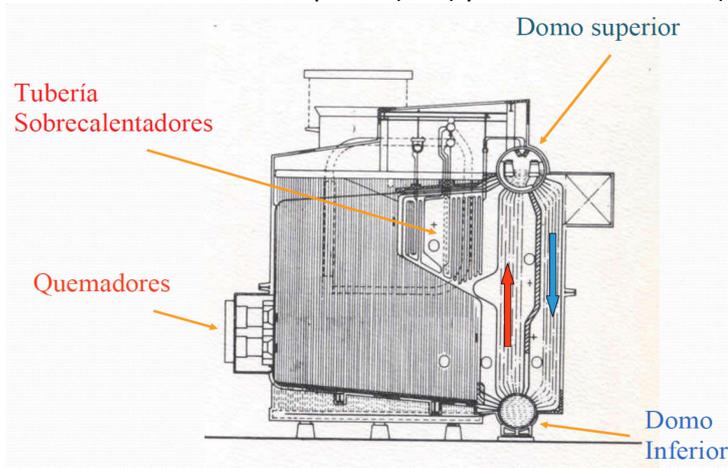
#### **Ventajas:**

- ⇒ Pueden ser puestas en marcha rápidamente.
- ⇒ Son pequeñas y eficientes con relación a la producción de vapor por unidad de superficie.
- ⇒ Trabajan a 30 o más atm.
- ⇒ Son menor peligrosas que las humotubulares

#### **Inconvenientes:**

- ⇒ Mayor costo de inversión
- ⇒ Deben alimentarse con agua de gran pureza (calidad del agua): evitar las incrustaciones

Este tipo de calderas tiene una pared recubierta por tubos por donde va a circular el agua, y esos tubos están conectados a un domo superior (D.S.) y a un domo inferior (D.I.).



Por un lado ascienden, y por el otro lado descienden por circulación natural, por convección. En la parte donde están los quemadores hay una cámara donde se producen la transferencia por radiación. Y el resto de produce por convección a través de los gases que atraviesan el cuerpo.

Este sistema tiene a su vez, para el caso de las aplicaciones industriales, un sobrecalentador en los circuitos de serpentín que recalientan el vapor para que se mantenga como vapor sobrecalentado hasta que llega a la máquina donde va a producir la generación de energía, y no condense. Eso hace que también este tipo de calderas sean mucho más caras en ese aspecto.

Hay otros diseños, donde los quemadores están al costado. También podemos encontrar calderas donde el domo superior y el inferior tienen un diseño en forma de "D" de las tuberías que están calentando, y en el centro el quemador, colecta todo al D.S. que a su vez separa y permite la salida de vapor ya más purificada.

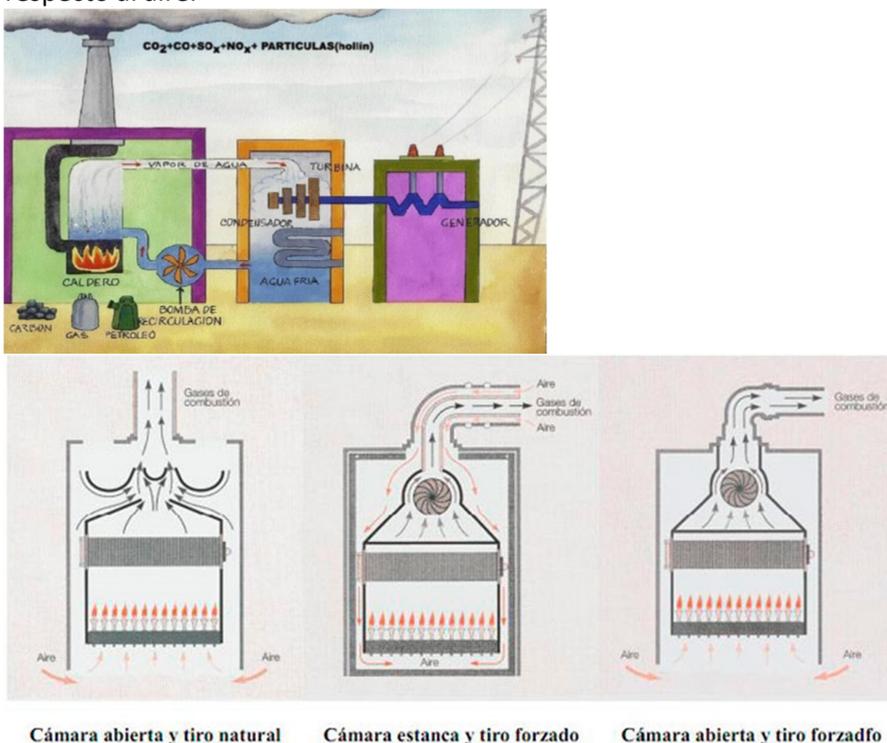
En la parte superior del domo hay separadores, que cumplen la función de separar el agua que no alcanzó el grado necesario para ser vapor (el que necesitamos aprovechar). **¿Qué significa esto?** Cuando analizamos el estado de un vapor, de alguna manera el grado de humedad está medido a través del título: cuando teníamos título 0 hasta el título 1 (vapor sin ningún tipo de condensado). Lo que pretendemos justamente es trabajar con ese vapor de título 1, pero para evitar el arrastre, que no haya gotas de líquido junto con el vapor que estamos extrayendo, utilizamos este tipo de separadores de forma tal que cuando nosotros queramos vapor, no arrastremos esas gotas de líquido que puedan viajar. Eso hace a la calidad del vapor.

Una parte del vapor llega vaporizada por un lado de los tubos hacia la cabeza, y después se vuelve como líquido hacia la zona inferior por el otro lado del ramal de la cabeza.

Estas calderas son bastante enormes y de gran inversión, por lo que tiene que estar realmente justificado su uso. La industria, en general, utiliza la mayoría de las veces la caldera HUMOTUBULAR, y las calderas ACUOTUBULARES se utilizan en algunas industrias como la petroquímica, refinería o alguna otra planta que consuma o genere su propia electricidad (que están alejadas)

### Tiro

Para completar el proceso de combustión, hay que proveer la evacuación positiva de todos los gases de combustión a través de un tiro, que no es ni nada más ni nada menos que una chimenea. Esta chimenea está relacionada con las características de lo que estamos quemando y las densidades de los gases que se producen respecto al aire.

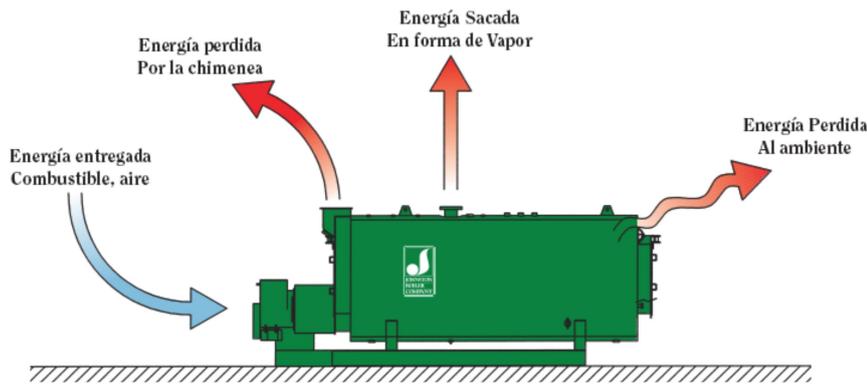


Tiro natural: se produce por el efecto generado por una chimenea. Su valor depende de la altura de la boca de la chimenea sobre el nivel del emparrillado del hogar.

Tiro mecánico o forzado: es el tiro creado por la acción de inyectores de aire, vapor o mediante ventiladores, el cual se requiere cuando deba mantenerse un determinado tiro con independencia de las condiciones atmosféricas y del régimen de funcionamiento de la caldera.

### Eficiencia

Es el porcentaje de la energía térmica del combustible (% que aprovechamos del calor) que se convierte en energía del vapor de agua.



Analizando este aspecto tenemos lo siguiente: ingresa combustible más aire a la caldera y a la salida tenemos energía sacada como vapor, que es lo principal. También tenemos energía perdida por chimenea y al ambiente. Las mayores pérdidas están por chimenea (en general, están en el orden del 23-25%).

Poder calorífico de un combustible: por ej. Gas, tiene un poder calorífico de 10500 kcal/kg aprox. El poder calorífico puede ser superior (PCS) o inferior (PCI). El que nosotros normalmente buscamos, es el PCI. ¿Qué es el PCI? Es la cantidad total de calor desprendido en la combustión completa de 1 kg de combustible sin contar la parte correspondiente al calor latente del vapor de agua de la combustión, ya que no se produce cambio de fase, y se expulsa como vapor (Cantidad de calor generada por la combustión del combustible no condense y devuelva de alguna manera su calor latente de condensación en el equipo, o sea que es lo que se va a escapar junto con los gases de la combustión).

### **Pérdidas en la eficiencia = Σ pérdidas 1 y 2**

- 1) Por combustión y transferencia: pérdida por los gases de chimenea y el estado de limpieza de las superficies de transferencia térmica.
- 2) Como equipo térmico: pérdidas por fugas, por aislación térmica, por las purgas continua y de fondo.

#### 1. Por combustión y transferencia

Volviendo al tema de la pérdida por chimenea, ¿cómo hago para reducir esa energía perdida? Podría suponer que queremos que el calor que se genere por la combustión del combustible salga a la misma temperatura a la cual entró el combustible. Eso sería lo mejor.

Para que haya movimiento de estos gases de la combustión tendrían que haber diferencias de temperaturas del aire externo y el gas del combustible, por un lado. Segundo, aprovechamos el calor del equipo, pasando por una temperatura de la llama de unos 1100°C, y va bajando gradualmente a medida que va entregando su calor quedando en unos 300°C y de ahí a la temperatura que sale por chimenea.

**¿Y por qué no bajamos más la temperatura?** Podría ser lógico decir: ponemos un intercambiador de calor, un economizador o un precalentador para aprovechar ese calor en algo que puede ser el aire que necesitamos para la combustión o la carga que va a entrar como producto final se precalienta antes de entrar al equipo. Eso podría ser un caso, sin embargo no lo hacemos. ¿Por qué? Porque hay un balance térmico económico. Sale más caro construir y tener todo ahí puesto, por cada m<sup>2</sup> que gano, la inversión no me ahorra demasiado combustible. El otro problema

es que si enfriamos demasiado esos gases de la combustión, va a condensar el agua, y si se combina con alguno de estos gases de combustión va a producir corrosión. Eso es contraproducente, lo cual me obliga a sacarlo a una temperatura que por lo menos me asegure que no va a haber condensación en el interior del equipo. Y eso también es parte de estas pérdidas por chimenea.

También está asociado el aire que necesitamos para la combustión. El O<sub>2</sub> que tenemos, lo sacamos del aire, pero también hay N<sub>2</sub> que es un gas inerte, pasa por nuestro equipo, se calienta y sale. Nos saca calorías que tendríamos que entregarle a nuestro producto. Si queremos hacer cálculos, podríamos armar una ecuación estequiométrica para saber cuánto es lo que realmente vamos a necesitar de O<sub>2</sub> para combustionar correctamente nuestro combustible, por lo tanto medir cuánto aire necesitaríamos incorporar. **¿Qué pasa en la realidad?** No se podría elegir justo los m<sup>3</sup> exactos de aire que tendríamos que meter para que se haga la combustión, porque la combustión no es exactamente completa. ¿Por qué? Porque la probabilidad de que la última molécula de vacío que ha quedado hueca por ahí vaya y reaccione con el último carbono que hay en el ambiente, es muy baja. Entonces siempre va a quedar algo de combustible sin que haga la combustión correcta, por lo tanto va a haber O<sub>2</sub> que no alcanza el objetivo de oxidación? Para esto, necesito un exceso de aire. Pero si aumento la cantidad de aire, también aumentan las pérdidas porque aumenta la cantidad de N<sub>2</sub>. Con lo cual, también hay un problema con el exceso de aire: yo necesito exceso de aire para una buena combustión, pero si me EXCEDO en el exceso también es contraproducente porque aumento las pérdidas.

La industria, ante este problema, lo que hace es:

- Para combustibles gaseosos: 5-15% de exceso de aire.
- Para combustibles líquidos: 25-50% de exceso de aire.
- Para combustibles sólidos: 50-100% de exceso de aire.

Estos son datos empíricos, pero reales, de las combustiones de los distintos combustibles.

## 2. Como equipo térmico

Las pérdidas como equipo térmico serían las aislaciones, que tienen la mala fama de ser las responsables de las pérdidas de calor que tiene el equipo, y que son importantes.

La caldera no es sólo la caldera, sino también todas las aislaciones de las tuberías y del cuerpo, que tienen que estar correctamente aislados para evitar pérdidas porque es un equipo caliente que va a entregar su calor al medioambiente. Sin aislación térmica, por una cañería de media pulgada (diám = 12mm), se pierden 165 kcal por m/h de sin aislación. Pero si lo aíslas, hay un ahorro del 87%, que eso es lo que tenemos que ver como ingenieros industriales.

Las incrustaciones en la zona de transferencia de calor hacen que aumenten las pérdidas por eficiencia térmica, que pueden llegar a valores bastante importantes dependiendo del espesor de esas incrustaciones.

### ***Líneas de vapor y condensado***

- 1) HACER LOS CALCULOS Y EL DISEÑO ADECUADOS PARA CADA INSTALACION.
- 2) SELECCIONAR LOS MATERIALES, SEGÚN 1).
- 3) INSTALAR LOS ACCESORIOS Y ELEMENTOS DE CONTROL, SEGÚN NECESIDADES.

### ***Pérdidas estimadas en instalaciones de vapor por:***

Aislación térmica – Cañerías ( P = 7kg./cm <sup>2</sup> )			
Sección	kcal/m/h(s/aislación)	kcal/m/h (c/aislación)	% ahorro
½"	165	20	87
¾"	203	27	87
1"	249	25	89

Incrustaciones en calderas	
Tamaño de la incrustación	% de pérdida de eficiencia en transferencia térmica
0,4 mm	4
0,8 mm	7
1,6 mm	11

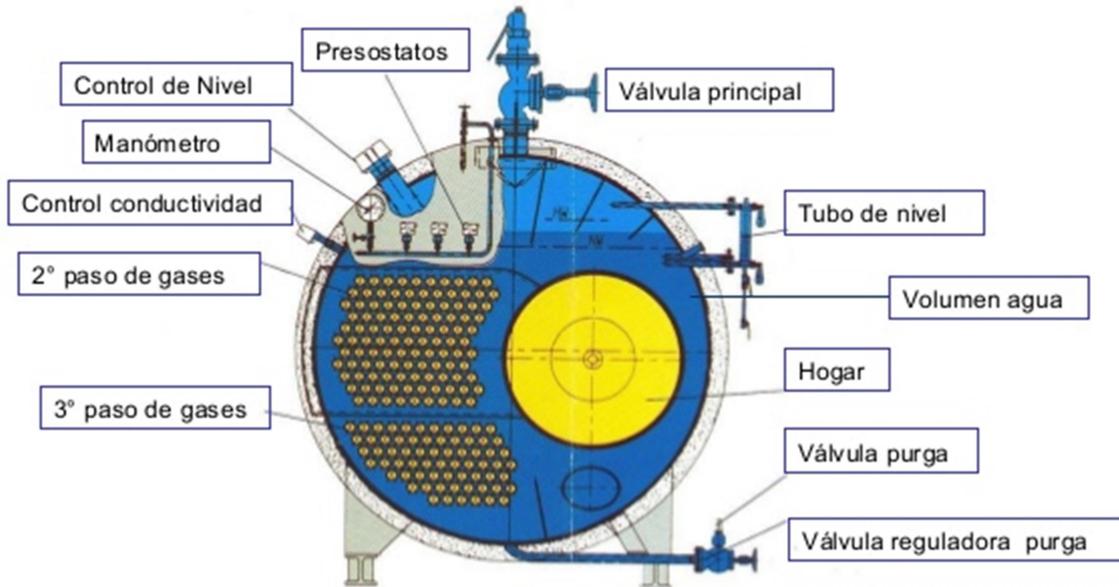
Por otro lado, hay distintas formas de controlar el buen funcionamiento del equipo, especialmente las calderas que son las más peligrosas. En el quemador, distintos dispositivos que cortan la emisión. La caldera tiene un sistema de pasos de seguridad, cuando la ponemos en contacto en ese momento arranca el ventilador. El ventilador, que es el proveedor del aire para la combustión, trabaja solo, arranca y hace un barrido de seguridad, que dura unos 30 segundos. Esto asegura que el caudal que entregó ese ventilador pase por todos los conductores que tiene la caldera, por todos los pasos que tiene, salga por la chimenea y prácticamente desplace cualquier vapor o peligrosos, corrosivos de combustible que hayan quedado previamente, etc.; de forma tal que ahí quede 1 atm.

Posterior a eso, pasado el tiempo de arranque, se produce el ingreso de una "llama piloto" por un conducto que justamente es gas piloto. Aparece gas piloto, y un chispazo que es generado por una bujía, que produce inflamación en la llama piloto. Cuando un sensor fotoeléctrico registra que hay llama piloto, manda una orden de apertura de la válvula principal de gas. Eso produce el ingreso del gas y la emisión, y arranca el equipo. Si por cualquier motivo fallase o no se produce la emisión, inmediatamente ese sensor fotoeléctrico registra que no hay llama y corta el suministro de gas principal, para el suministro de gas piloto y arranca otra vez con el ventilador para el barrido, se repite el proceso hasta que se produce la llama y la emisión. Todos estos pasos están interrelacionado, si alguno llega a fallar por cualquier motiva, o re-arranca o se apaga la caldera y se tiene que hacer todo manualmente.

Por otro lado, también hay sensores que vigilan la altura del nivel de líquido que hay en la caldera, por exceso y por defecto. El mayor problema normalmente se presenta por defecto, o sea que baje tanto el volumen del interior de la caldera que deje desprotegido los tubos, y esos tubos (si está funcionando la caldera) se calienten. Se pueden romper de por sí, porque no hay posibilidad de intercambio los caños se ponen al rojo vivo, se debilitan y terminan rompiéndose. Eso sería uno de los problemas menores.

El mayor problema, que pasa en la realidad, sería que el operador, al observar que está bajo el nivel de agua, se da cuenta que, por ejemplo, una de esas una de las válvulas estaba bloqueada de agua y la abre, (y una de las bombas estaba funcionando) ingresa agua para recuperar el nivel. Es lo lógico, pero la caldera no se salva porque recibe agua fría sobre una chapa caliente, un tubo caliente. ¿Qué se produce? Primero hay un cambio muy brusco de volumen, eso ya de por sí presuriza la caldera. Pero además, inmediatamente después que cae el agua fría sobre la chapa caliente, se produce hasta una disociación iónica: se produce  $O_2$  e  $H_2$ . Esto explota, explota la caldera, y chau operador. Entonces, esto se vigila a través de un control de nivel de alta y baja ¿Por qué alta también? Porque si esto se llenara demasiado de agua, no tendría espacio donde se generaría el vapor: hay que tener una distancia para que se pueda separar el vapor del agua.

Para el control, hay una botella que tiene un flotante, ese flotante está asociado a su vez por contactores de mercurio: si cambia la posición porque desciende el nivel, cambia la posición de esos electrodos a contacto y arranca la bomba. Si la bomba funciona correctamente, empieza a levantar el nivel del interior de la caldera, y el flotante vuelve a posición. Pero va a seguir llenando la caldera, hasta que llega a otra posición donde se indica que ha subido demasiado, despega el contactor de la bomba y deja la caldera con un nivel de agua que todavía le permite producir vapor. Si vuelve a bajar el nivel, arranca la bomba, y la bomba por cualquier motivo falla o no tiene la cantidad de agua suficiente para proveer a la caldera, o la velocidad de vaporización es más elevada que la de ingreso de agua y sigue bajando el nivel; hay un segundo contactor que es el que le está indicando a la caldera que el nivel ya quedó muy bajo, y directamente para la caldera, corta el suministro de gas, enciende una baliza para avisarle al operador y suena una sirena. Es para alertar si funciona bien la bomba, si hay agua en el tanque, si está trabajando o no el sistema.



También hay control de presión: si la presión sube demasiado, se para la caldera. Ejemplo: industria que trabaja con caldera a una presión de 8kg, y como máximo tolera 10 kg; si se supera esta presión la caldera se apaga sola, deja que baje. Cuando bajo a los 8kg, arranca nuevamente.

### Combustión

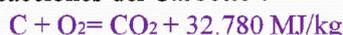
Ponemos en contacto un combustible, un comburente (oxígeno) y una fuente de ignición. Cuando la combustión se produce en forma completa encontramos en los gases de combustión CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>. El O<sub>2</sub> se obtiene del aire. Es necesario controlar la cantidad de aire que se ingresa para la combustión puesto que el contenido de O<sub>2</sub> en el aire es del 21 %, el resto es básicamente N<sub>2</sub> que no interviene en la combustión. Para asegurar una combustión completa es necesario trabajar con un cierto valor de exceso de aire, de manera general 15% cuando se quema Fuel Gas y 30% cuando se quema Fuel Oil.

- Reacción [combustible – comburente]
- Calor a un nivel térmico aprovechable.
- El quemadores el encargado de que la mezcla sea la apropiada.
- La cantidad de calor por unidad de masa que desprende un combustible al quemarse es el Poder Calorífico (kJ/kg).
- PCI (el vapor de agua de los humos no condensa)
- PCS (se condensa el vapor de agua de los humos)

Los **elementos básicos que reaccionan son:**

- ❖ El oxígeno del aire como comburente (aprox. 1m<sup>3</sup>por kWh)
- ❖ El carbono y el hidrógeno del combustible
- ❖ Otros elementos (azufre), e inertes (cenizas).

•Reacciones del **Carbono :**



•La reacción del **Hidrógeno es:**



Si el agua se condensa:



•La reacción de **Azufre es:**



En todos los casos para el diseño de la caldera utilizamos, para combustibles líquidos, el poder calorífico inferior y no el poder calorífico superior porque el primero supone que el agua que contiene el combustible se encuentra en estado de vapor.

Los valores típicos de Poder calorífico para los distintos combustibles utilizados en una refinería son:

Valores típicos de LHV (Kcal/Kg)

- Fuel oil 9400-10000
- Gas residual 9500
- Gas natural 8600

### Color de la llama

Dependerá del tipo de combustible y la cantidad de O<sub>2</sub> que utilice: las llamas producidas por los combustibles líquidos son más luminosas que las producidas por los combustibles gaseosos, debido a que hay una gran cantidad de carbonos que se queman en la parte superior de la llama. También se pueden encontrar llamas amarillas cuando usamos combustibles gaseosos, esto se debe a un alto valor de densidad originada por componentes pesados (butano y superiores) además de un bajo exceso de aire.

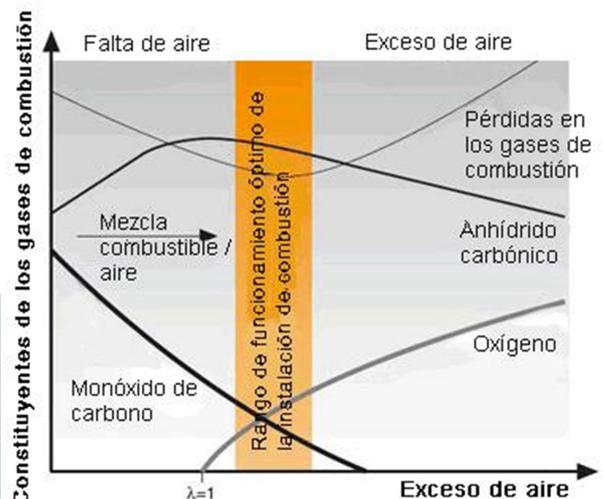
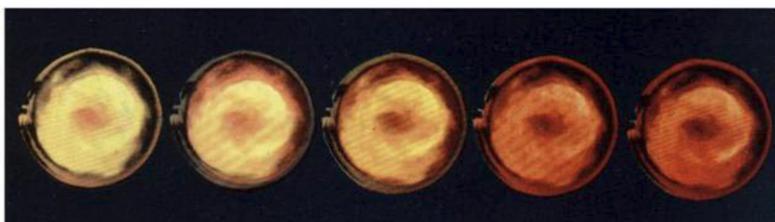
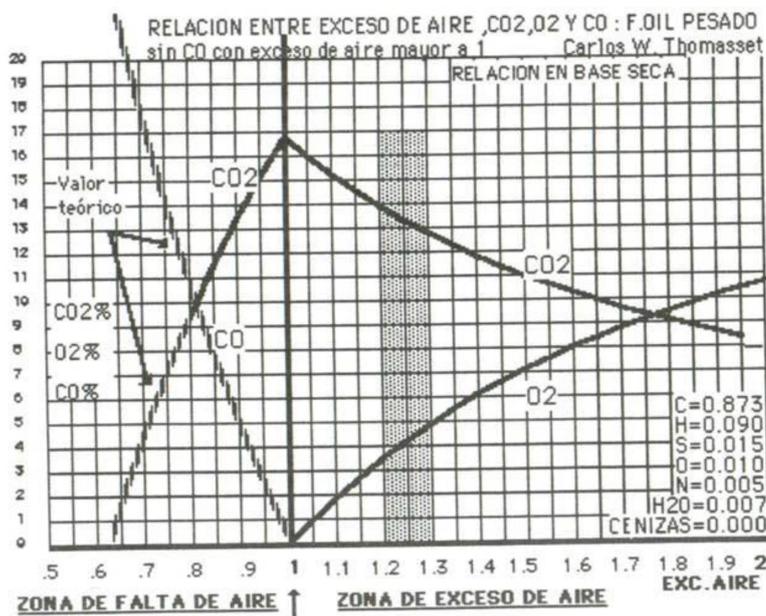
La coloración típica de la llama en función del tipo de combustible utilizado es:

Gas Natural: Llama corta con cono azul sobre la base

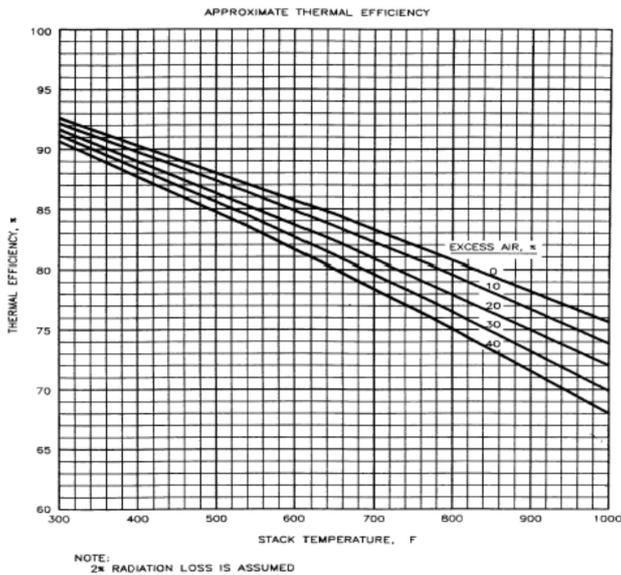
Gas Residual: Llama corta con color azul a amarillo en función del incremento de densidad.

Fuel oil: Llama amarilla/naranja

Hay un analizador de gas que me permite ver el % de CO<sub>2</sub>

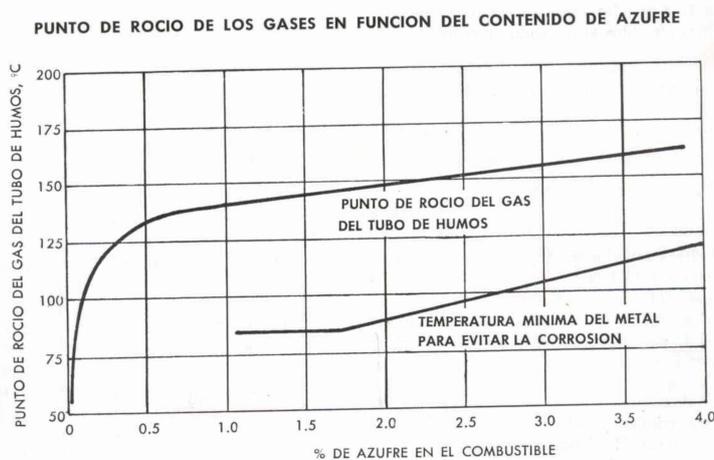


## Influencia del exceso de aire



El exceso en exceso de aire hace que la temperatura de salida de la chimenea cambie de forma tal que se pierde la eficiencia térmica. Ejemplo: para una  $T^\circ = 600^\circ\text{F}$ , si voy con 40% de exceso en aire, tengo aprox. una eficiencia del 81%; con el 30% de exceso, tengo un 83% de eficiencia, con 10% de exceso, tengo 85% de eficiencia.

También la salida de los gases de combustión tiene que cumplir este requisito:



El % de azufre contenido en el combustible tiene que cumplir que por lo menos la salida de los gases salga un poco más de los  $175^\circ\text{C}$  para evitar el punto de rocío de los gases en el tubo, y lo mismo la temperatura mínima del metal para evitar la corrosión.

## Variables a controlar en la combustión

### Atomización

Es prácticamente el eje. ¿Qué significa atomizar? Dividir algo en partes muy pequeñas, tan pequeñas como átomos. Los distintos tipos de combustibles tienen distintos grados de pulverización. Mientras más pequeña la gota, mejor comportamiento del combustible porque ha habido una atomización importante.

- Influye en la viscosidad del líquido, descomponiéndolo en gotas muy finas.
- Sistemas: - Aire - Vapor - Mecánica.
- Tamaño de partícula varía por:
  - Diámetro de la boquilla.

- Angulo de dispersión.
- Relación agente atomizador - combustible.
- Temperatura del combustible.

### Vaporización

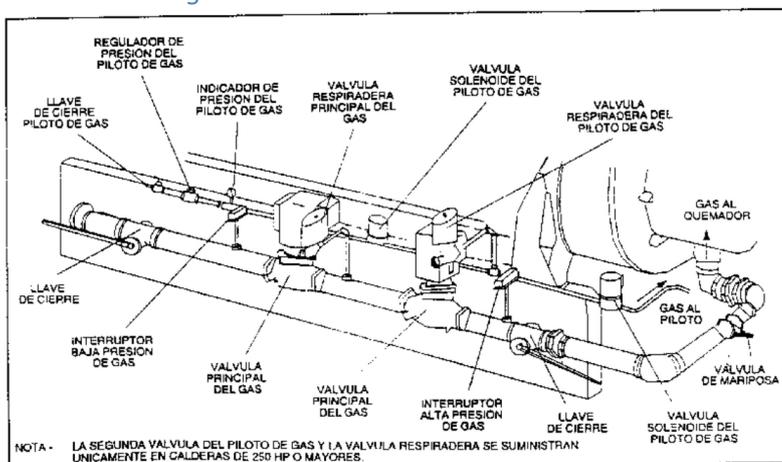
Se facilita si es:

- Menor tamaño de la partícula.
- Mayor turbulencia de los gases en el hogar.
- Mayor temperatura en el hogar.
- Es mayor el poder calorífico del combustible.

Zona de llama es más corta si:

- Es mayor la temperatura en el hogar.
- Si se aumenta la relación aire - combustible.

### Conexión del gas

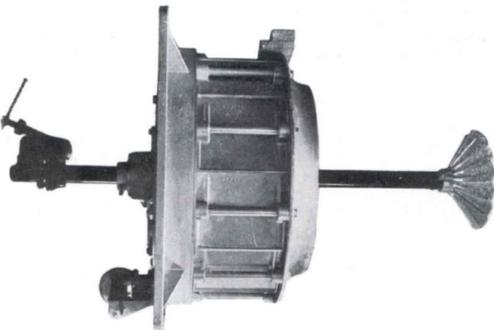


### Bombas de combustible



### Quemadores

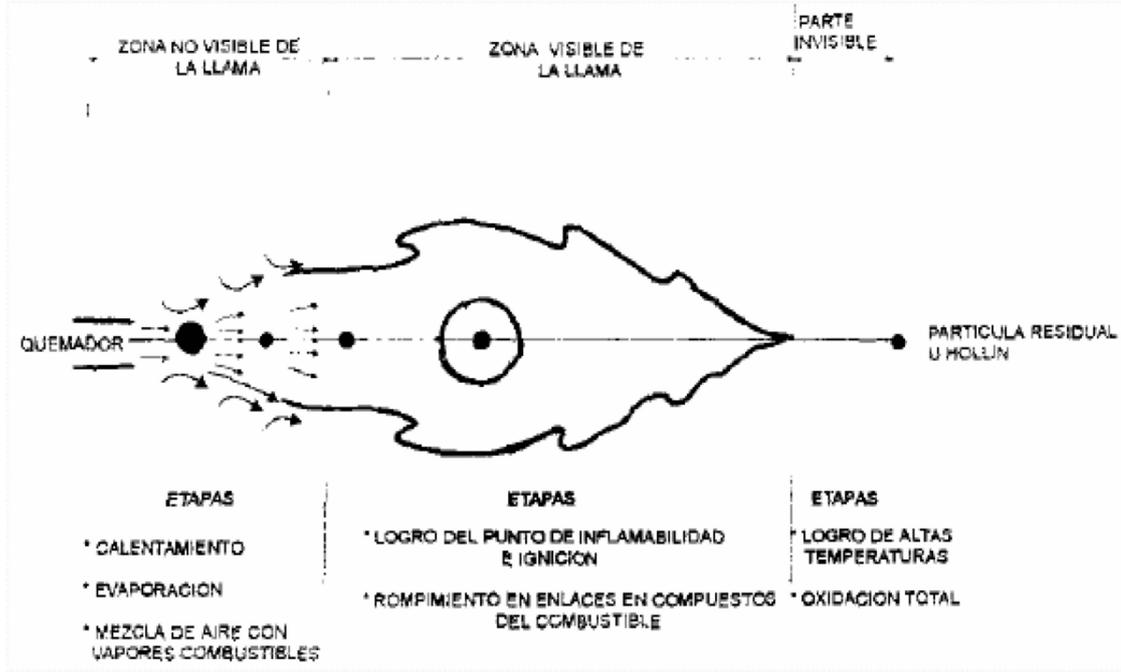
9 QUEMADOR DE PETROLEO CON ATOMIZACION MIXTA



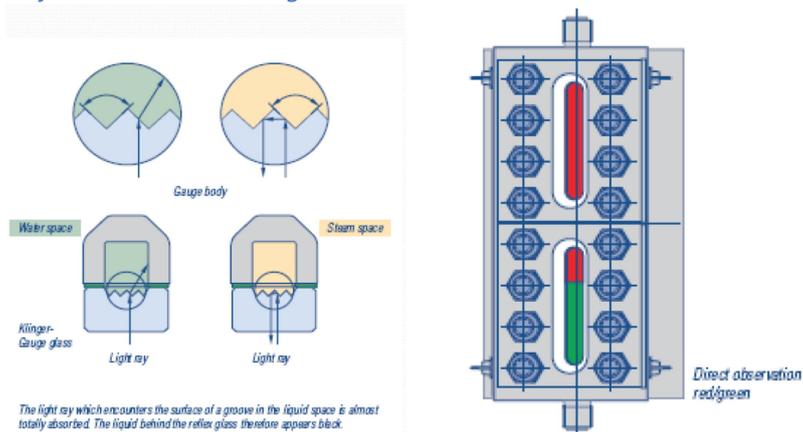
¿Por qué mixta? Muchas veces la industria utiliza un quemador que puede servir tanto para petróleo (combustible líquido) como para gas, dependiendo de lo que venga, o de las necesidades. Muchas veces en invierno

se restringe el gas, pero teniendo un quemador mixto se puede usar sin problemas un combustible líquido. Pero el quemador tiene que estar preparado para eso, sino no se puede convertir un quemador de gas a un quemador de líquido.

### Conformación de la llama

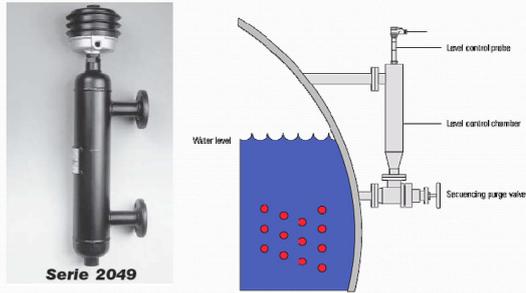


### Caja de nivel de Klinger



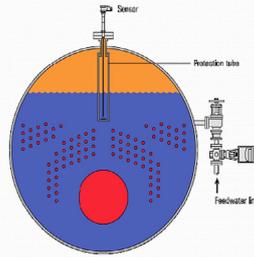
Siempre hay dos niveles, dos válvulas de seguridad, dos formas de operar una válvula (una mecánica y otra automática). Siempre hay una forma que complica la seguridad, que es lo principal. Entonces para darle seguridad, tenemos dos niveles porque si por algún motivo alguno de ellos se trabó o se ensució, el otro lo alerta.

### Control de Nivel con Flotante



Bombas de alimentación

### Control de Nivel Montado Internamente

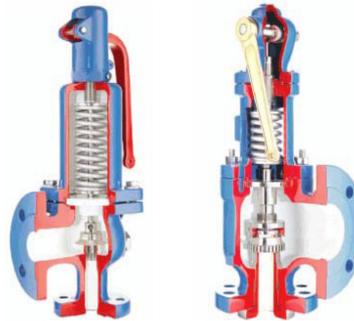


Válvulas de seguridad

### Control de Nivel por Ultrasonido

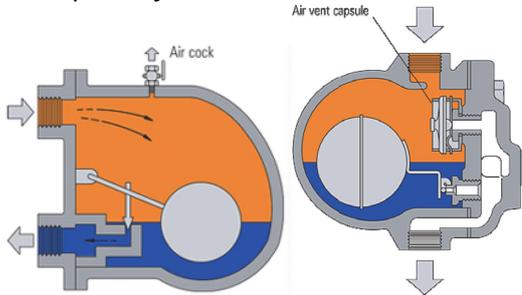


**Descripción:** Unidad compacta integral con tecnología ultrasónica por pulsos para medición alta o baja de nivel en una variedad de aplicaciones de líquidos  
**Principio de Medición:** Onda ultrasónica por pulsos

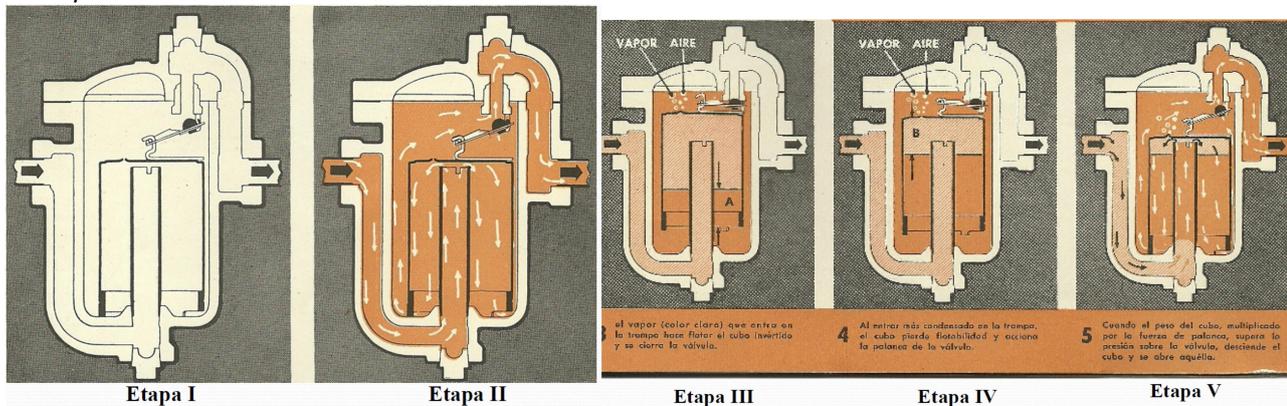


### Trampas

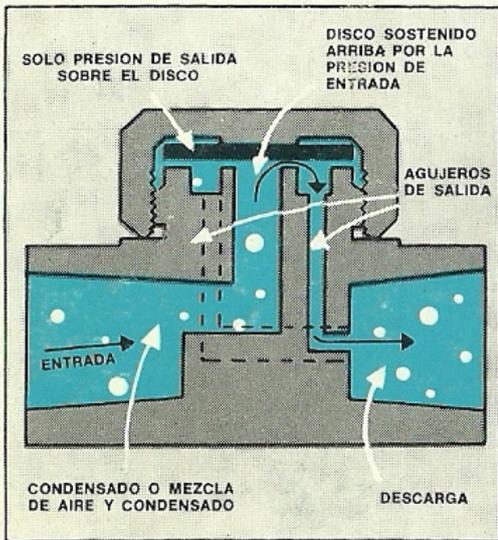
#### De vapor de flotante



#### De vapor de cubo invertido

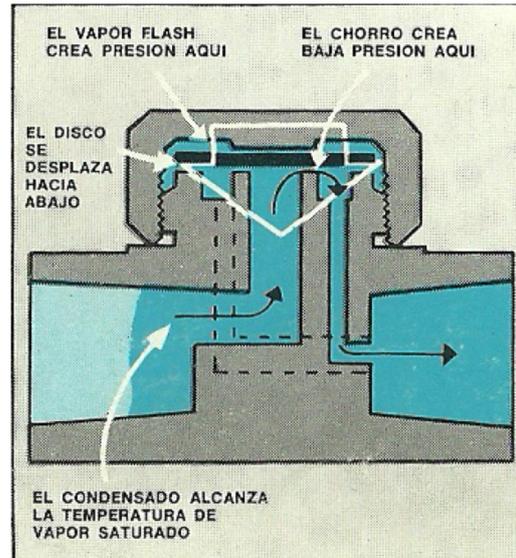


*De vapor termodinámica*



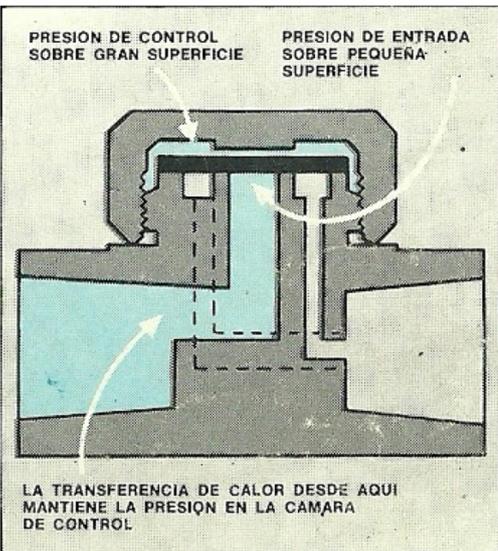
**COMIENZO**

La presión del condensado y/o aire levanta el disco de su asiento. El flujo es radial debajo del disco, hacia las salidas. La descarga prosigue hasta que el condensado se acerca a temperatura de vapor.



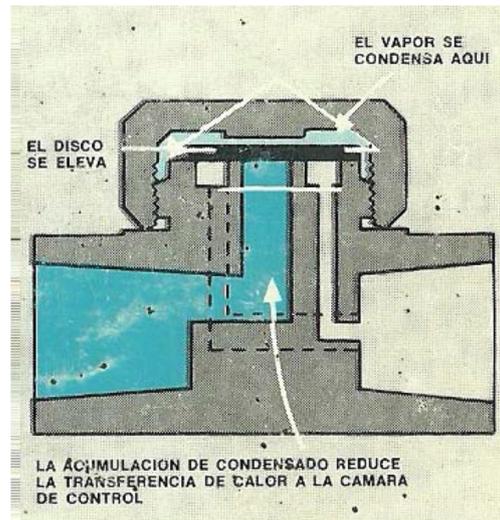
**CERRANDO**

Un chorro de vapor flash reduce la presión debajo del disco y a mismo tiempo, por recompresión origina presión en la cámara de control encima del disco, esto empuja a este último contra su asiento, asegurando un cierre perfecto sin pérdida de vapor.



**CERRADA**

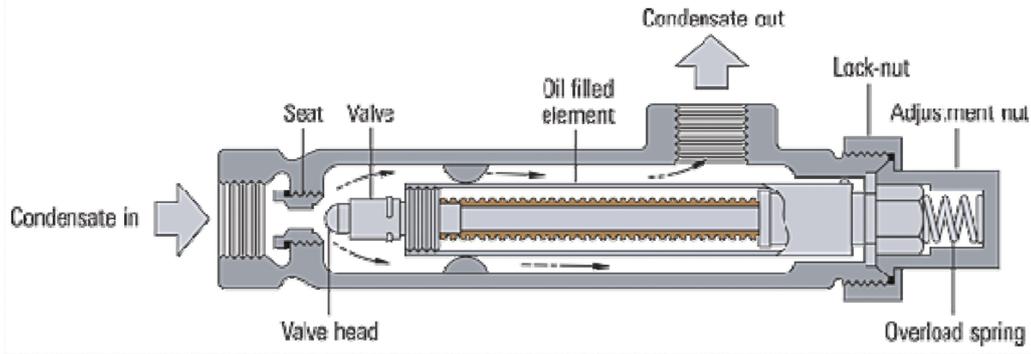
La presión del vapor en la cámara de control, actuando sobre toda la superficie del disco, lo mantiene cerrado contra la presión de entrada que actúa sobre un área menor.



**ABRIENDO**

Al acumularse condensado, se reduce el calor en la cámara de control, conforme se va condensando el vapor bloqueado en la cámara, la presión se reduce. El disco es levantado por la presión de entrada y se descarga el condensado.

*De vapor termostática*



### 3B: Hornos empleados en la industria

En general, lo que nosotros buscamos cuando realizamos estas operaciones es el aprovechamiento del calor. Se puede aprovechar de distintas maneras, una de ellas es utilizando un horno.

#### Horno

Es un equipo que, aprovechando la transferencia de calor (producida, por ej., por una combustión o por una energía eléctrica) puede transmitirle a una carga o realizar una o realizar una reacción química y darle la cantidad necesaria de calor para que se produzca esa reacción.

Hay hornos que se pueden considerar de:

-Fuego directo: fuego que golpea directamente sobre la caldera

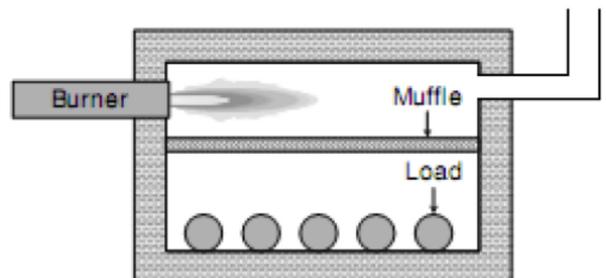
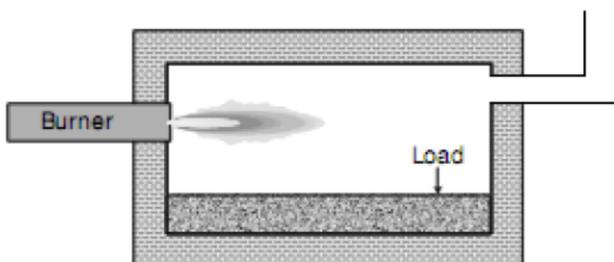
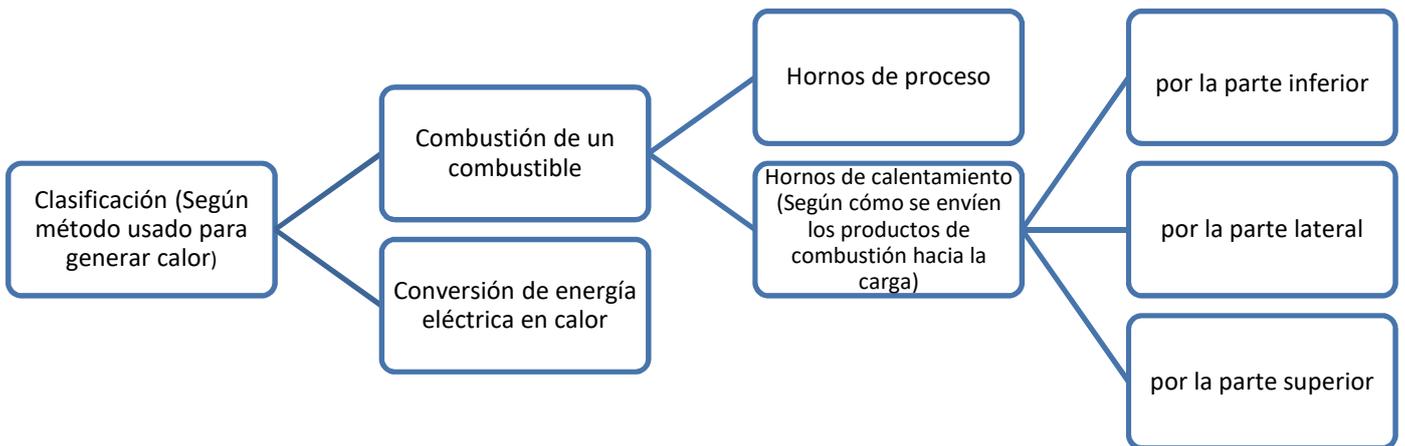
-Llama indirecta: aprovecha otro tipo de calor puesto en este proceso para que la carga.....

A veces el término Horno se refiere a calentadores de fuego directo, usados en calderas, hervidores o intercambiadores en la industria Petrolera o Petroquímica.

#### Aplicaciones industriales

- Tratamientos térmicos
- Fundición de metales
- Industria cerámica, porcelana, tejas, ladrillos
- Industria del vidrio
- Industria de la construcción, del cemento, cal
- Industria química, petroquímica y petróleo
- Industria alimenticia, panadería, secado de frutas, cervecería, tostados de granos
- Agricultura, secadero de granos, calefacción de invernaderos
- Tratamientos de desechos municipales, hospitalarios, sustancias contaminantes

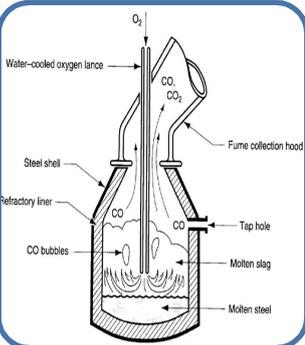
Es evidente la amplia gama de hornos con distintas aplicaciones, pero todos tienen cosas en común.



### Ejemplos de hornos

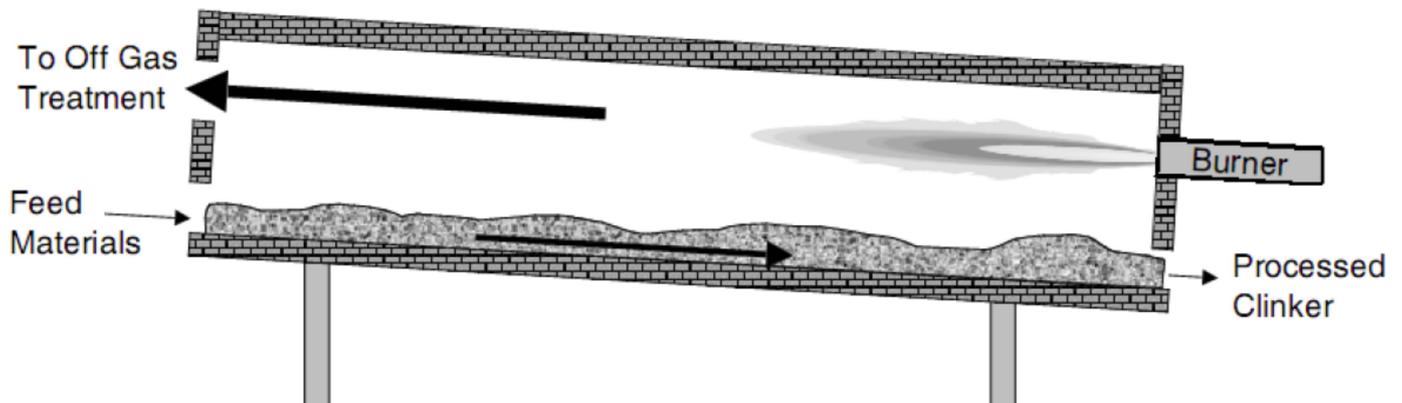


Horno de inducción: sirve para calentar una pieza, hacer un tratamiento térmico o modificar de alguna manera la estructura cristalográfica.



Se utiliza para convertir un acero agregándole ciertos componentes que producen mejoras en su calidad, como puede ser el caso de convertir un acero común en un acero inoxidable: utilizar un espacio, que sería en este caso, un horno de conversión, un horno convertidor en el cual este metal fundido se le agrega determinados componentes, se realizan las reacciones químicas y se produce el fenómeno de incorporar algunos metales como vanadio, cromo, molibdeno, que le dan características especiales al acero.

### Fábrica de cemento



El cemento se produce a partir de una piedra que se transforma en un horno. En este caso, la reacción de combustión colabora en la transformación de una materia prima para convertirla en clinker (piedra la cual, molida, se obtiene el cemento de portland). En este proceso, la carga entra por un extremo y va en contracorriente de lo que produce el quemador cuando su llama se genera con los gases de combustión. Se va calentando y transformando, para llegar al final y hacer un clinker procesado (que sería la piedra base, para que cuando se muele se obtenga cemento de portland).

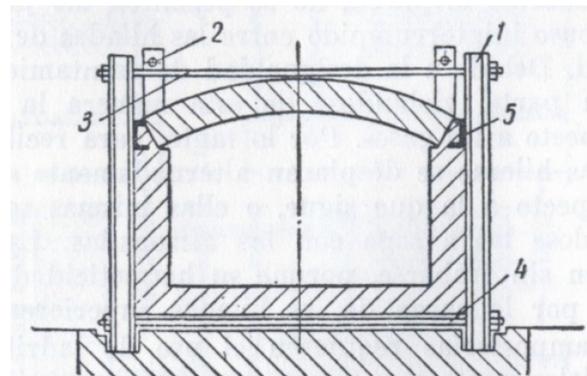
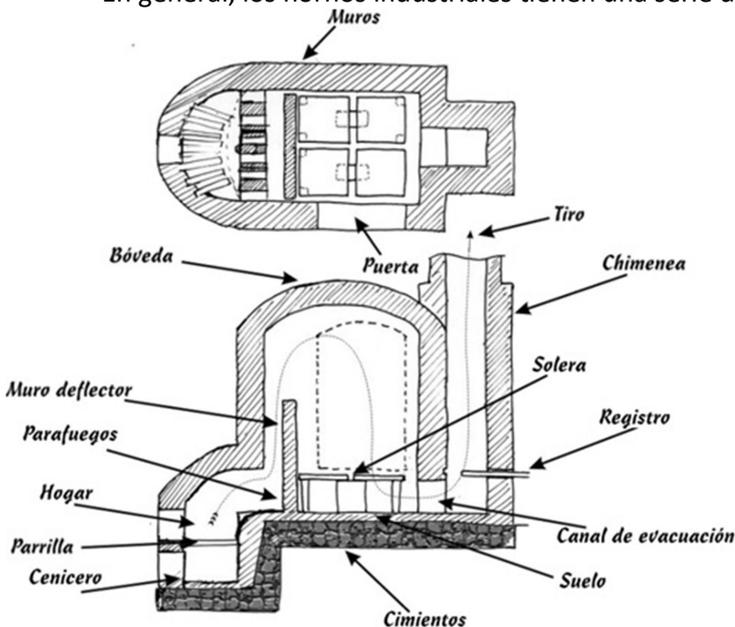
Es un horno relativamente simple, pero es rotativo y continuo. Tiene ciertas características y las cuales, la materia prima, en este caso, se pone prácticamente en contacto primero con los gases y después con la llama directa para alcanzar el grado de conversión que necesita dicha materia prima para convertirse en clinker. La piedra sale muy caliente del horno, por lo que hay que dejarla al aire libre y esperar a que se enfríe para luego convertirla en cemento.

En cada caso, tenemos distintos diseños, distintas formas y distintos calores puestos en juego. Analizando cada uno de estos elementos, vamos a encontrar que los hornos tienen algunas partes en común y otras que son específicas para cada carga.

Para el sector alimenticio, muy rara vez la llama directa es buena para lograr la conversión de algo: cocinar pan, pizzas, pastel de papas, etc. En general, ese diseño de horno de la cocina es muy diferente al horno industrial y sin embargo es un horno. Pero tiene un grado de aprovechamiento, en este caso, únicamente restringido al calor de convección. Por eso la transformación es paulatina, no se termina quemando tan rápido desde el producto inicial al final.

### Partes principales de los hornos

En general, los hornos industriales tienen una serie de elementos:



Nombres de las diferentes partes de un horno

- Cimientos: son la parte del horno que se apoya directamente en el suelo. Lo único que se requiere de estos es su absoluta robustez para soportar toda la carga de la estructura del horno.
- Plataforma: es la parte inmediatamente superior a los cimientos e inferior a la mampostería. Se puede colocar la solera.
- Solera: es la parte del horno donde se coloca el material a calentar. Colocamos el productor a utilizar.
- Paredes: rodean la bóveda. En la zona de trabajo, son ladrillos refractarios o ladrillos que permiten conservar el calor del interior. En la parte externa es un ladrillo de mampostería común que le da solidez, porque generalmente los ladrillos refractarios que se colocan en el interior en el horno no tienen la suficiente rigidez mecánica para soportar cargas. Entonces son elementos de revestimiento para evitar que escape el calor y se mantenga en el interior, mientras que el ladrillo de mampostería común es el que le da la rigidez estructural al cuerpo a través de una pared sólida que se hace con cemento y ladrillo común.
- Bóveda: es una parte muy importante del horno. Se encuentra en la parte superior. Soporta elevadas temperaturas y debe estar construida de tal manera que impida el escape de los gases de la combustión (que serían los gases de convección).
- Canales: por donde se producen ingresos y egresos de aire. Los canales que conducen los gases de combustión hasta la chimenea son de sección rectangular.
- Mampostería de ladrillos: debe asegurar la estabilidad y la hermeticidad de la zona de trabajo.
- Juntas térmicas: para compensar la dilatación de la mampostería por el calor.
- Esqueleto metálico: estructura metálica que sujeta todas las partes del horno y absorbe todos los esfuerzos que se originan en la mampostería durante su funcionamiento. Es como un marco que mantiene al cuerpo rígido para evitar que se caiga o se rompa el horno.



Horno típico de una industria cerámica o de un laboratorio. La carga se coloca en el interior y alrededor generar el calor, dicha carga puede recibirlo de manera directa o indirecta.

La parte curva del horno es la bóveda. Está construida por ladrillos en forma de cuña que se traban y se colocan de manera tal que terminan dando rigidez sobre la pared. Hay un empuje de un lado de la pared y un empuje del otro lado, que mantiene a esa parte estable y evita que colapse. Generalmente son ladrillos tipo cuña o con medidas especiales que se colocan y van apoyados porque, como no tienen mucha rigidez o resistencia mecánica porque están soportando calor y dilatación también, es factible que se pueda desprender al dilatarse o contraerse. El montaje que hace el constructor de hornos le da una posición tal que evita que se desprendan y que caigan los ladrillos. Queda formado el cuerpo curvo en la parte superior. Eso ayuda que se mantengan los gases (que se pueden hacer recircular y aprovechar en el sistema).

Hay hornos con muy buena estructura, en la parte central está el horno propiamente dicho, los apoyos para las cargas (parte de la solera) y lugares por donde circulan los gases de la combustión, que pudieran generarse para dar uniformidad a todo el conjunto: que una parte no se caliente más que otra y que se cocine parejo. Puede ser, por ej., un horno típico de porcelana tipo mug, que viene generalmente de China, cerámica para tomar peso, etc.

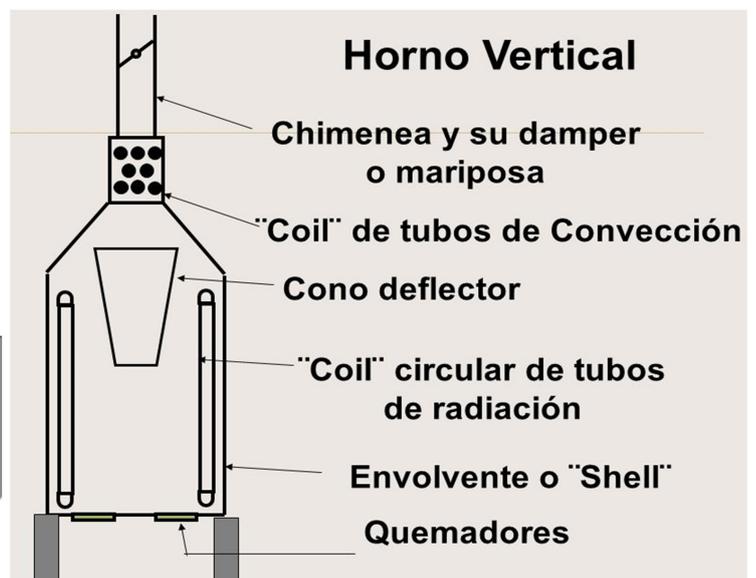
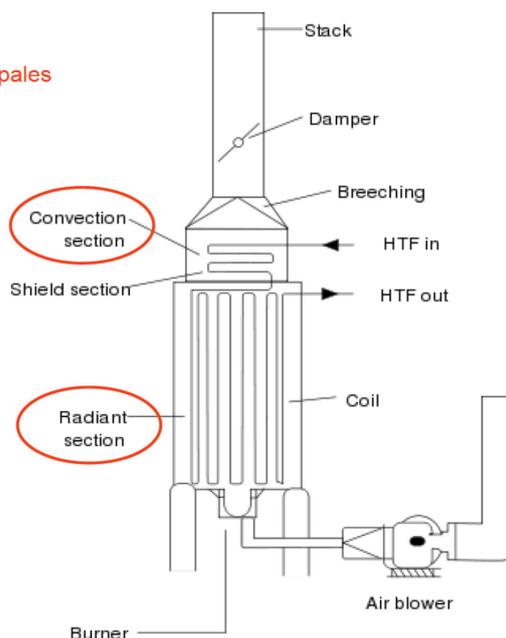
### Horno vertical

Es otro tipo de horno muy común que se encuentra en la industria petrolera. Es un clásico horno de proceso industrial.

Generalmente, en este tipo de horno lo que se busca es calefaccionar o calentar una carga: petróleo. El petróleo que circula viene de un tanque o reservorio donde lo tenemos acumulado. Lo que hacemos es precalentarlo en un proceso industrial, como puede ser una destilería, donde hago una separación o en su defecto, precalentarlo para transportarlo, bajándole la viscosidad que tiene.

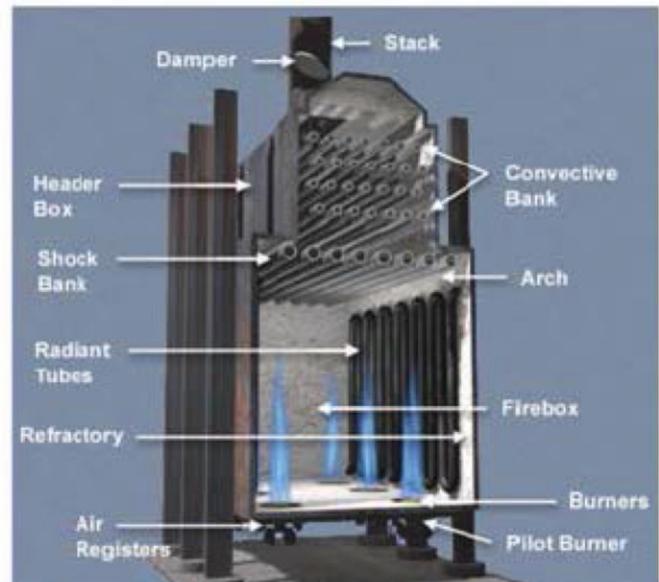
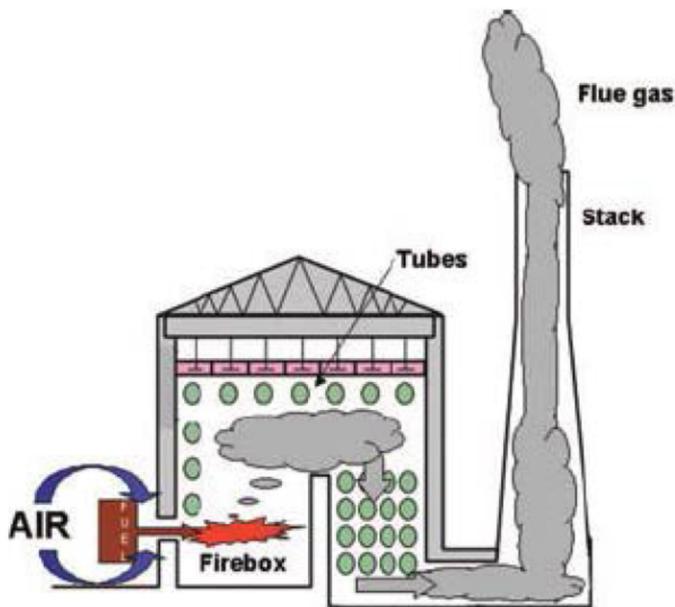
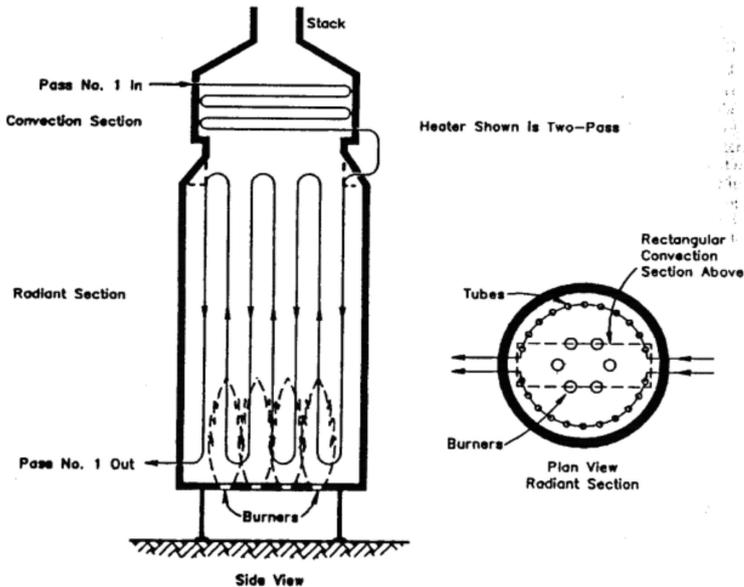
El petróleo es un fluido relativamente viscoso, difícil de manejar, de transportar, de bombear. Si buscamos la manera de que baje la viscosidad del fluido para la bomba, es un rendimiento energético más bajo, es más fácil transportarlo y llega a lugares más lejos, por decirlo de una manera, con una sola carga de bomba que podemos hacer.

#### Partes Principales



La idea de esto es calentar el fluido (petróleo) y prepararlo para una posible destilación o en su defecto, para disminuir la viscosidad y poderlo bombear. Esto se hace en un horno de tipo vertical con tubos interiores (alambique). En ese alambique circula el petróleo que ingresa por la parte superior. Esa zona pareciera ser redonda, pero en realidad es cuadrada. Allí, los tubos están colocados de forma horizontal, hacen un circuito como si fueran un serpentín, y después bajan al interior de los tubos largos, al cilindro. En ese cilindro se produce la calefacción y la salida del petróleo.

En el diagrama de horno vertical, tenemos una sección con tubos horizontales y otra sección con tubos verticales formando un circuito de tipo serpentín.



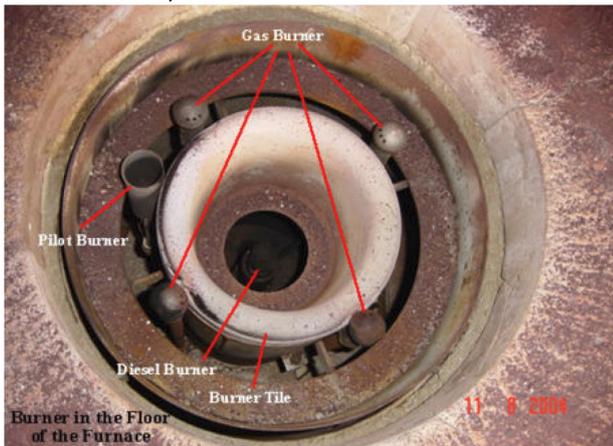
Hay hornos cuadrados, que tienen los tubos horizontales, recorriéndolos.

En todos los hornos, se pueden ver las partes constitutivas principales:

- Estructura metálica, como siempre
- Quemadores, caja de fuego
- Ladrillos refractarios
- Zona de tubos radiantes (serpentín)
- Zona de tubos de convección (está cruzada)
- Zona donde "se golpean los gases" hacia la chimenea

- Soplante, que suministra el aire para la combustión
- Zona de desvío, de protección para que los gases o la llama no golpeen sobre la zona de convección
- Salida de la chimenea
- Damper o plaqueta, que maneja la cantidad de gases que vamos a sacar a la atmósfera y de alguna manera permite retener en mayor y menor medida los gases que se producen de la combustión para aprovecharlos mejor.
- Aislante

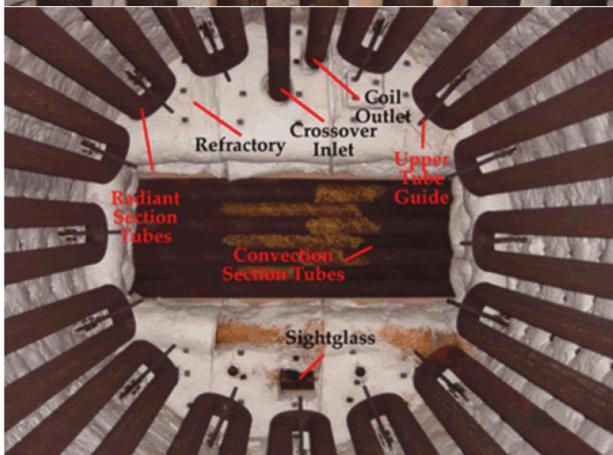
Desde el punto de vista del equipo, éste aprovecha el calor por radiación y por convección. ¿Y en la caldera? También hay una zona de radiación y de convección. Básicamente son similares en su estructura, en su aprovechamiento, en su forma de sacarle calor al combustible y aprovecharlo para la carga.



Típico quemador de horno en el piso. Tiene una boquilla para combustible diesel en el medio, o en su defecto pequeños quemadores de gas a los costados. Dependiendo del tipo de combustible que utilicemos, vamos a utilizar uno u otro. Es intercambiable (dual). A veces hay disponibilidad de diesel más que gas (invierno, o la empresa restringe la cantidad de gas, etc.). El quemador tiene una forma tipo flor, se coloca en el piso, y así permite que el horno trabaje verticalmente.



Esta sería la sección del alambique. Es una tubería continua, que está apoyada: hay pequeñas pilas que permiten que el caño no esté cargado totalmente sino que en una parte apoyan al piso, y en otras están colgados por una percha a la pared (evita que la carga total del cuerpo, que es una tubería pesada, no cargue sobre la estructura que no tiene calidad de soporte, que sería la mampostería del refractario). En estos diseños vemos que las tuberías no se apoyan directamente sobre el suelo.



Superficie vista de la parte de arriba. Pueden visualizarse mejor las “perchas” donde se cuelgan los tubos dentro del alambique, esto rodea a todo el perímetro del alambique. Arriba se puede ver la sección de convección donde los tubos están cruzados de manera horizontal.

¿Esto qué permite? Por un lado, le da posibilidad de calentar parejo a toda la carga; por otro lado, este tipo de continuidad hace que el fluido entre por un conducto y salga por el otro.

Separado de la pared, en esa zona radiante, la radiación de la llama llegue tanto de frente al tubo como por el lado de atrás, rebotando en la zona de la pared: hay un efecto de emisión tanto del lado directo (llama) como el indirecto (rebote en la pared). Eso permite, en este diseño, aprovechar gran parte de la superficie del tubo para la calefacción y para la radiación.

Zona radiante en operación: está al rojo. Por ello, la resistencia de los tubos tiene que ser especialmente diseñada para soportar altas temperaturas, y altas presiones sobre todo. Tiene la presión propia del fluido que está viajando por el interior, sumada a la pérdida de resistencia por el calor.

### *Consideraciones para el cálculo*

Cuando hacemos el cálculo, en especial para el horno de petróleo, lo que hay que tener en cuenta es ver dónde está el receptor del líquido que estamos calefaccionando en el horno. Si es mucha distancia, hay una posibilidad de que ese líquido se vaya enfriando en el trayecto por las pérdidas propias de éste mismo. Cuando hay que estimar de alguna forma el sobrecalentamiento adicional que le deberíamos dar (el que requiere el líquido cuando viaja desde el horno hasta la torre de fraccionamiento, por ejemplo), llega a la T° de requerimiento de la torre de enfriamiento, porque en el medio no hay nada que lo caliente, y evidentemente lo que va a pasar es que va a ir perdiendo calor y va a poder hasta cambiar la calidad del producto. Eso tiene que ver con destilación: a través del método gráfico se analizan las ecuaciones que participan en fraccionamiento y eso cambia la cantidad de platos en la zona de separación, etc. Tiene influencia importante el estado térmico de la carga a las condiciones operativas de la torre, hay que calentarlo y darle un adicional --->que es esa pérdida de cálculo de  $\Delta T$  lineal (tantos metros que separan de la torre, va a producir tanta pérdida de calor, hay que darle tanto calor de más a esa carga).

$\Delta t$  lineal de transferencia = f (L, Vfrío, % vaporización, tipo de producto)

L = longitud de la cañería

Vfrío = velocidad del líquido

**¿Qué es lo que se busca?** Se busca calcular el “servicio de alambique”: calcular la cantidad de calor que requeriría una determinada carga para entrar a la torre de fraccionamiento, una parte vaporizada y otra parte como líquido ya precalentado. Entonces hay que calcular las Kcal/h ó BTU/h. Utiliza la curva ASTM (no hay un punto de ebullición bien definido en todo el crudo, y evidentemente parte de la carga va a entrar vaporizada porque los puntos de ebullición son más bajos que el promedio, y parte va a entrar como líquido porque todavía no alcanzaron la temperatura de ebullición para ser vaporizado. O sea que la carga va a entrar parcialmente vaporizada y el grado de vaporización va a dar como resultado distintos grados de separación dentro de la torre. Para ello vamos a usar un calor sensible y un calor latente de esos líquidos, pero hay que estimarlos.

Servicio de alambique: cantidad de calor suministrado al crudo (BTU/ h)

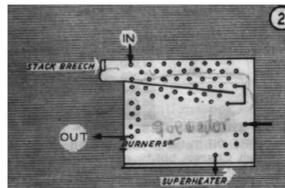
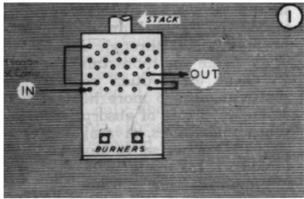
El horno que estamos calculando sirve para calentar un hidrocarburo complejo, este es una mezcla y por ello no tiene un punto de ebullición definido, sino que tiene una curva de destilación (ASTM).

$$Q_{sa} = Q_s + Q_l = \sum M c_i \rho_i \Delta t_{ci} + \sum C l_i M_i$$

Donde  $Q_s$  = calor sensible que se debe entregar al producto

$Q_l$  = calor latente de vaporización.

Con ello, definimos el tipo de horno y el combustible a utilizar según las características del proceso que tenemos. Hay diferentes tipos de hornos para petróleo. Por ejemplo:

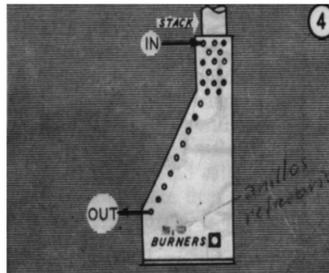
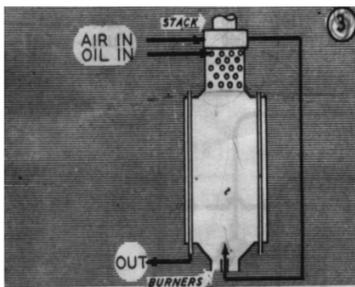


**Convección**

Muy baja capacidad  
Barato  
Chimenea corta  
Poca transferencia de calor

**Convección superior**

Baja capacidad  
Tubos cortos  
Chimenea corta  
Pobre distribución del calor



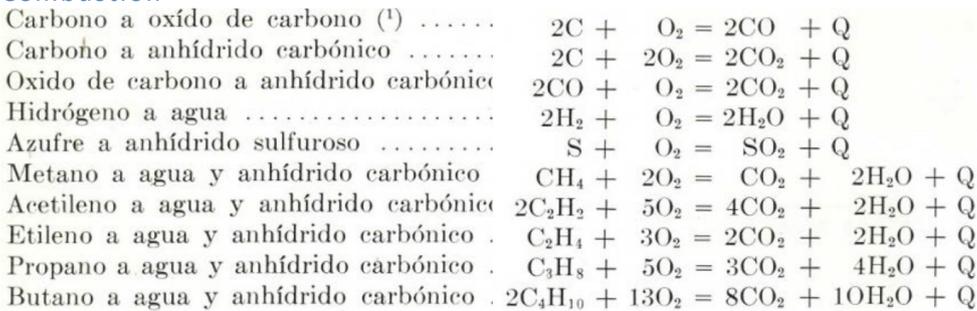
**Circular**

Amplia capacidad  
Caro  
Estructura elevada  
Excelente distribución de la radiación  
Chimenea muy corta

**Single upfire**

Muy baja capacidad  
Mediano costo  
Chimenea corta

**Combustión**



Reacción Química de la combustión	Poder calorífico		Aire requerido para la combustión de 1 kg de combustible	
	Sup. kcal/kg	Inf. kcal/kg	kg	m <sup>3</sup>
C a CO <sub>2</sub>	7,751	7,751	11,53	9,40
H <sub>2</sub> a H <sub>2</sub> O	33,605	28,392	34,34	27,99
S a SO <sub>2</sub>	2,191	2,191	4,29	3,50
CH <sub>4</sub> a SO <sub>2</sub> y H <sub>2</sub> O	13,133	11,836	17,27	14,07
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> a CO <sub>2</sub> y H <sub>2</sub> O	11,825	11,427	13,30	10,84
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> a CO <sub>2</sub> y H <sub>2</sub> O	11,904	11,162	14,81	12,07
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> a CO <sub>2</sub> y H <sub>2</sub> O	11,913	10,969	15,70	12,80
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> a CO <sub>2</sub> y H <sub>2</sub> O	11,719	10,824	15,49	12,62

### Datos básicos para los cálculos de la combustión

Reacción Química de la combustión	Poder calorífico		Aire requerido para la combustión de 1 kg de combustible		Productos de la combustión de 1 kg de combustible							
	Sup. kcal/kg	Inf. kcal/kg	kg	m <sup>3</sup>	En peso kg/kg				En volumen m <sup>3</sup> /kg			
					CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
C a CO <sub>2</sub>	7,751	7,751	11,53	9,40	3,66	—	—	8,86	1,95	—	—	7,42
H <sub>2</sub> a H <sub>2</sub> O	33,605	28,392	34,34	27,99	—	8,94	—	26,41	—	10,82	—	22,13
S a SO <sub>2</sub>	2,191	2,191	4,29	3,50	—	—	2,00	3,29	—	—	0,72	2,76
CH <sub>4</sub> a SO <sub>2</sub> y H <sub>2</sub> O	13,133	11,836	17,27	14,07	2,74	2,25	—	13,28	1,46	2,72	—	11,13
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> a CO <sub>2</sub> y H <sub>2</sub> O	11,825	11,427	13,30	10,84	3,38	0,69	—	10,22	1,80	0,83	—	8,56
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> a CO <sub>2</sub> y H <sub>2</sub> O	11,904	11,162	14,81	12,07	3,14	1,29	—	11,39	1,67	1,56	—	9,54
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> a CO <sub>2</sub> y H <sub>2</sub> O	11,913	10,969	15,70	12,80	2,99	1,63	—	12,07	1,59	1,97	—	10,11
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> a CO <sub>2</sub> y H <sub>2</sub> O	11,719	10,824	15,49	12,62	3,03	1,55	—	11,91	1,61	1,87	—	9,98

Los volúmenes son a 15° C y 760 mm. c. a.

### Composición química de los combustibles. Porcentaje teórico de CO<sub>2</sub>. Valores prácticos.

Combustible	Composición porcentual base seca						% CO <sub>2</sub> con 100 % aire	Valores prácticos		
	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	S <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> a		% CO <sub>2</sub>	% O <sub>2</sub>	% Exc. aire
Fuel-Oil . . . . .	87,7	12,0	0,2	—	—	0,1	15,7	12/13	3/4	15/25
Carbón R. Turbio <sup>(1)</sup> . . . . .	67,1	4,9	0,7	0,8	12,5	14,0	18,7	14/16	4/8	20/40
Carbón R. Turbio <sup>(2)</sup> . . . . .	—	—	—	—	—	—	—	15/16	4/6	20/25
Gas natural <sup>(3)</sup> . . . . .	76,0	23,0	—	1,0	—	—	12,1	10/11	1/2	5/10
Celulósicos <sup>(1)</sup> . . . . .	50,2	70,0	—	—	42,0	0,8	20,8	13/15	4/8	20/40

(1) Quemando en trozos sobre grillas.

(2) Quemando pulverizado.

(3) La composición del gas natural en volumen es:

- CH<sub>4</sub> — 90 %
- C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> — 7 %
- C<sub>3</sub>H<sub>4</sub> — 2 %
- Inertes — 1 %

### Pérdidas

Al calor total generado del servicio de alambique, se le agrega un adicional debido a las pérdidas. Esas pérdidas son tanto en la radiación como en la convección.

Cantidad de calor:  $Q_t = Q_s/\eta$

$\Sigma$ pérdidas (radiación + convección)

**Pérdidas por radiación:** se estiman en el orden de un 3-5% del  $Q_t$

- |                                       |  |
|---------------------------------------|--|
| Ejemplo: 5% de pérdidas por radiación | - 4% de pérdidas a través de las paredes del horno |
|                                       | - 1% de pérdidas de la convección de la radiación  |

**Pérdidas por convección:** dependen de la T° a la que salen los gases. Los gases que salen por chimenea son los que se llevan el mayor % de pérdidas en la zona de convección. El orden puede llegar a ser del 25%. Eso implica \$\$\$\$. Por el otro lado, hay que cuidar el medioambiente, el calentamiento global. La temperatura de salida de los gases no tiene que ser excesiva → reducción de pérdidas, mayor eficiencia de hornos, intercambiadores de calor, etc.

### Cálculo en la zona de radiación

$\%R = f$  (tipo de combustible, exceso de aire,  $q.De/C$ )

$q$  = densidad de absorción de calor radiante por unidad de tiempo y de superficie.

$D_e$  = diámetro exterior del tubo del horno.

$c$  = distancia de centro a centro de los tubos.

El valor de “ $q$ ”- debería ser alto: significa que el área de intercambio, con la cantidad de tubos que necesitamos para realizar un cierto intercambio de calor, que requiere ese producto va a ser menor. Va a salir más barato el horno. Pero la realidad es que, en el caso del horno de petróleo, tenemos una limitación: si aumentamos “ $q$ ” porque queremos que el horno sea con pocos caños, lo que estamos haciendo es recalentar el producto, y mucho porque va a ser la máxima capacidad que van a tener los caños esos de soportar calor. El petróleo se va a coqueificar (se va a convertir en una piedra de coque) dentro del caño. Es un gran tapón de coque, muy duro. Ya de por sí el caño sufre el efecto de la no refrigeración por parte del líquido.

“ $q$ ” está tabulada para diversos tipos de servicio (en base a la experiencia), y además obtenemos una velocidad recomendada. Ejemplo: ingresamos para un servicio de topping de 600°F y obtenemos  $q = 31000$  a  $47000$  BTU/h.ft<sup>2</sup> y una  $v = 2$  a  $5$  m/s.

Cálculo del  $D_e$ : Una vez que adoptamos una velocidad, relacionando ésta con el caudal volumétrico obtenemos el  $D_i$ , y con el  $D_i$  y el espesor obtenemos el  $D_e$  de los tubos.

$$Q_{vol} = M / \rho \text{ (caudal másico)}$$

$$A = M / \rho \cdot v$$

$$Q_{vol} = A \cdot vel$$

Reemplazando encuentro  $D_i$

$$A = \pi \cdot D_i^2 / 4$$

$$D_e = D_i + 2t$$

$$t = f(D_e, P, T^\circ, \text{tipo de acero})$$

$$c = f(D_e, \text{tipo de cabezal}, n^\circ \text{ de serie})$$

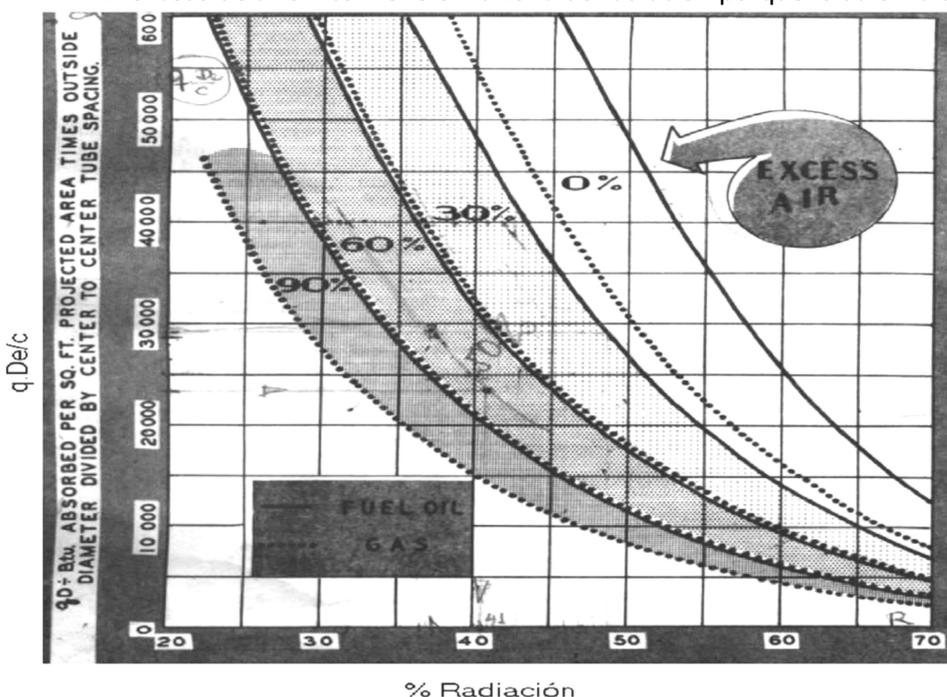
Calculamos  $q \cdot D_e / c$ : Con este valor y el exceso de aire entramos en la tabla nº 112 (para gas y fuel oil) y obtenemos el %R.

Ahora podemos calcular el área proyectada y con ésta el nº de tubos  $N$ .

$$A_p = Q_r / q$$

$$N = A_p / L_e \cdot D_e$$

El exceso de aire interviene en la zona de radiación porque le da el valor de “ $q$ ”.



Del  $Q_t$  que calculamos del servicio de alambique obtenemos el %radiación que se genera en la zona de radiación, con la cantidad de tubos que tenemos.

$$Q_r = Q_t \cdot \%R$$

### Cálculo de la zona de convección

Todo lo que no se intercambió en la zona de radiación se intercambia en la zona de convección.

$$Q_c = Q_t \cdot \%C$$

$Q_c = Q_t - (Q_r + P_r + P_c)$  Calor a entregar al crudo en la zona de convección.

$$A_c = \frac{Q_c}{U \cdot \Delta t_{ml}}$$

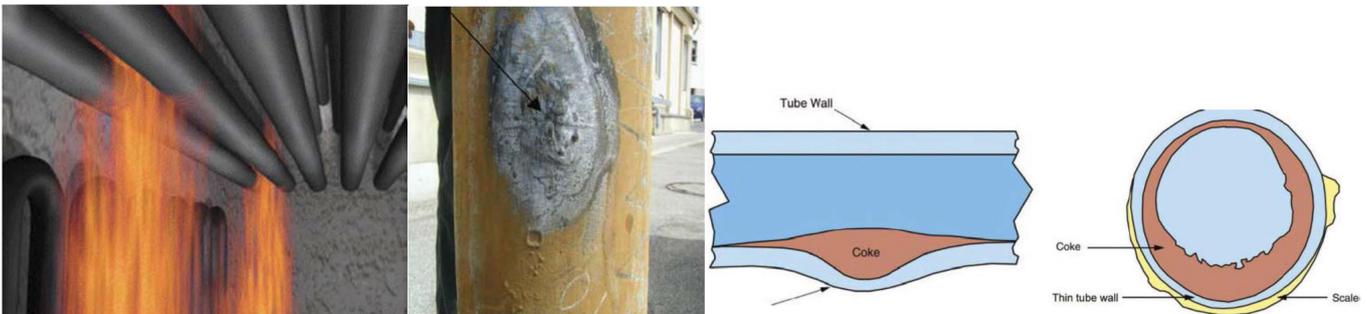
Por experiencia sabemos que en este tipo de equipos los valores aceptables de  $U$  están entre 7 y 10 ( Btu / h .supproy . °F ).

$$U = f( De, T_{mg}, v_g )$$

$\Delta t_{ml}$  = podemos obtenerlo ya que conocemos las temperaturas que intervienen en el proceso.

### Impacto de llama

Efecto que muchas veces sucede, por mala operación: es una llama que sobrepasa las dos terceras partes de la longitud total del cuerpo. La llama debería desarrollarse hasta las dos terceras partes, pero por una mala maniobra puede alcanzar la zona de convección (donde teóricamente esa zona sólo debería recibir calor de los gases). Por lo tanto, en ese impacto de llama se produce un efecto no deseado que, por supuesto, deforma el tubo afinándolo por un lado y sacándole circulación al equipo. Esto en el corto plazo es un accidente industrial muy grave porque puede producir una explosión, un incendio y pérdidas tanto de equipos como de vidas, entonces hay que evitarlo.

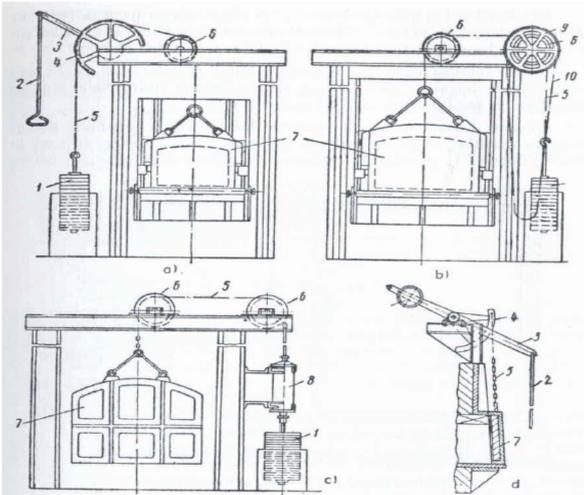


En las imágenes se puede ver lo que sucede en la realidad. El espesor del tubo disminuye a causa del impacto de llama. En la zona de contacto donde golpea la llama se produce una “coquificación” de petróleo (sería como una transformación no deseada donde se forma una piedra de coque que es un sólido que evita que se enfríe correctamente la pared, y produce ese efecto de adelgazamiento y deformación porque se sobrecalienta esa zona).

¿Cómo controlamos que no pase la llama? Vigilando su altura, tratando de mantenerla dentro de las dos terceras partes de la altura del cilindro. Es difícil que haya un sensor para este proceso, generalmente se encarga un operador de vigilar la altura a través de mirillas o visores. Controla la altura regulando el aire y combustible que se necesitan para la combustión.

Las partes dañadas se pueden reemplazar por nuevas pero en este tipo de procesos, parar un horno industrial implica costos económicos y de producción: normalmente se diseñan para trabajar en régimen continuo, entonces al parar el horno se para toda la producción.

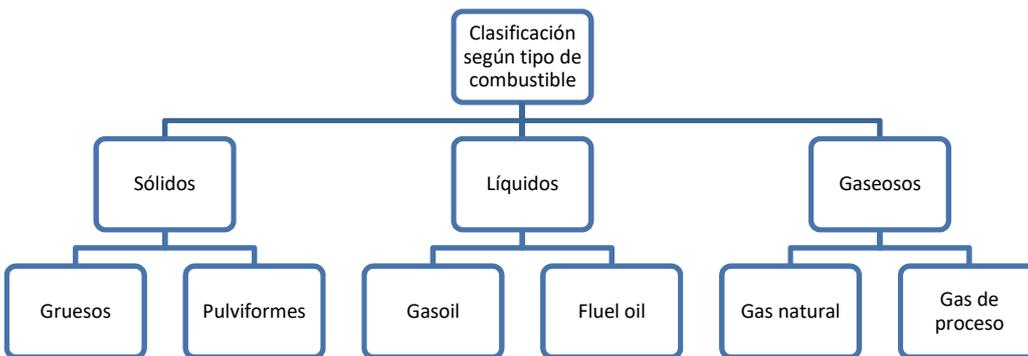
Otros accesorios



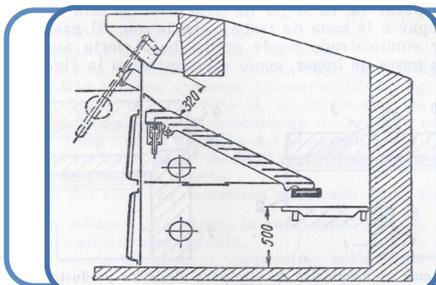
Ventanas de trabajo: aberturas que se practican en las paredes del horno.

Puertas o compuertas: son lugares por donde se perdería calor, por lo tanto el diseño de estos es importante porque se busca la mínima cantidad de pérdida de calor. Por más que el proceso sea continuo, estoy metiendo y sacando cargas a través de estas puertas y sin apagar el horno, entonces se pierde una importante cantidad de calor. Es por ello que aparecen los diseños tipo guillotina o con contrapeso, donde se levanta rápidamente la puerta, se coloca una carga y se saca la otra, y baja la puerta como si fuese una guillotina. También pueden ser puertas de bisagras.

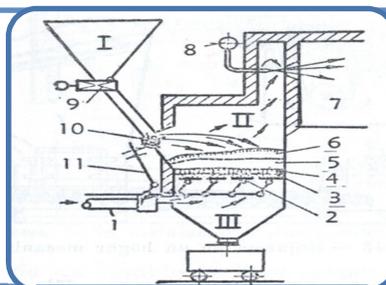
*Instalación para la ignición (combustión) de los combustibles*



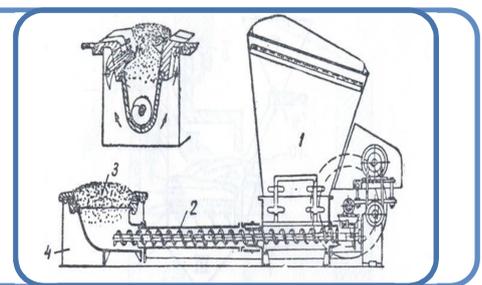
- Instalaciones para los sólidos: se busca que el sólido se parezca lo más posible a alguno de los ..... que combinan mejor, que serían los gases o los líquidos. Por lo cual, los hogares pueden ser:



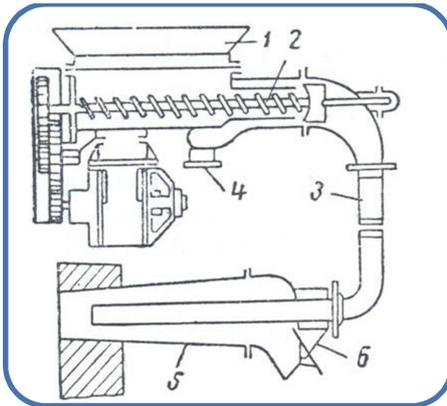
Hogar sencillo: plataforma con una rampa donde el sólido se ubica y por debajo se insufla el aire necesario para la combustión. En la medida que el sólido se va quemando, avanza hasta descargar en una zona que se llama "cenicero" que es donde se extraen las cenizas



Hogar semigasificador: la carga ingresa a través de un lecho que se denomina "lecho fluidizado", donde puede aprovecharse el fenómeno de la fluidización de un sólido para combinarlo con el aire de la combustión.



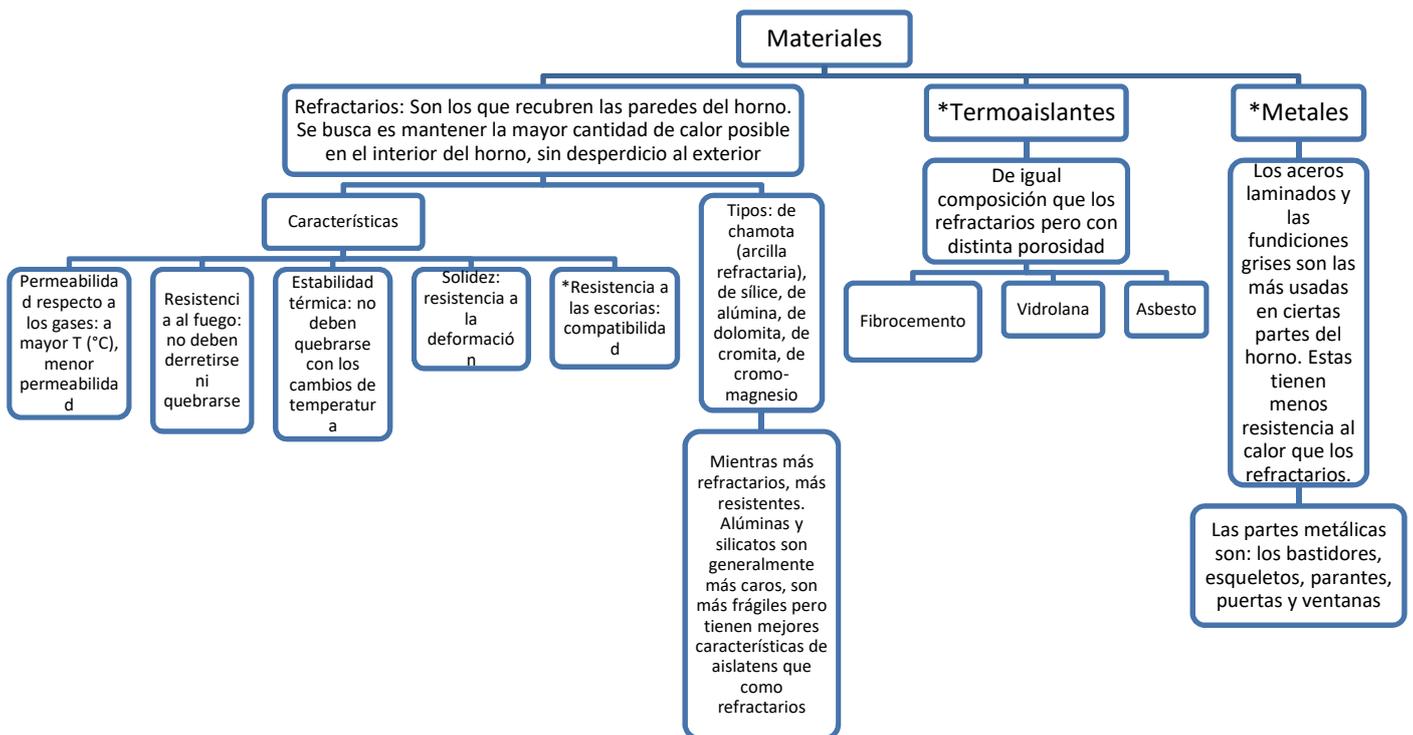
Hogar mecanizado: la carga ingresa por un tornillo sinfín que va empujando y llevando el sólido hacia el interior del horno.



Pulviformes: administración de la carga a través de un tornillo sinfín, acompañado de aire que lo mezcla en una tobera. En esa tobera sale el fluido como si fuera un gas pero en realidad es un polvo mezclado con aire suficiente para lograr la combustión.

- Instalaciones para los líquidos: mecheros de alta presión, de baja presión y combinados. Otros accesorios que hay en los hornos son las cañerías que pueden inyectar aire, o el combustible líquido o gaseoso. También hay válvulas para permitir el paso del aire o el combustible.

*Materiales para hornos de combustión*



\*Resistencia a la escoria: los combustibles generan reacciones químicas no deseadas que muchas veces producen un ataque químico sobre el refractario, lo degrada y se va deteriorando. Por ello tiene que haber una cierta compatibilidad química.

Diagrama de la pared del horno:

Q → Interior	Refractario	Termoaislante	Aire (o en su defecto agua) para refrigeración	Metal	Exterior
--------------	-------------	---------------	--	-------	----------

La característica más importante es el grado de resistencia de calor

\*Los termoaislantes se colocan a continuación de los refractarios porque en esa zona es menor la temperatura. Se colocan sin que haya deterioro apreciable. De todas maneras, la mayoría de esos materiales tienen problemas:

El fibrocemento, por sus características, es pariente cercano de los asbestos; y los asbestos gozan de la triste característica de ser cancerígenos. El manejo de ellos tiene que ser cuidadoso en la industria porque los operarios no pueden estar expuestos a este tipo de contacto con esos materiales. Cuando los compramos, en realidad es un material que viene compactado y no ofrece disgregación que se pueda desarmar o provocar polvos; pero pasado cierto tiempo se degradan, se quiebran, se rompen y se pulverizan. Entonces al estar en contacto con ese polvo, es lo que produce las enfermedades, como por ejemplo cáncer de pulmón.

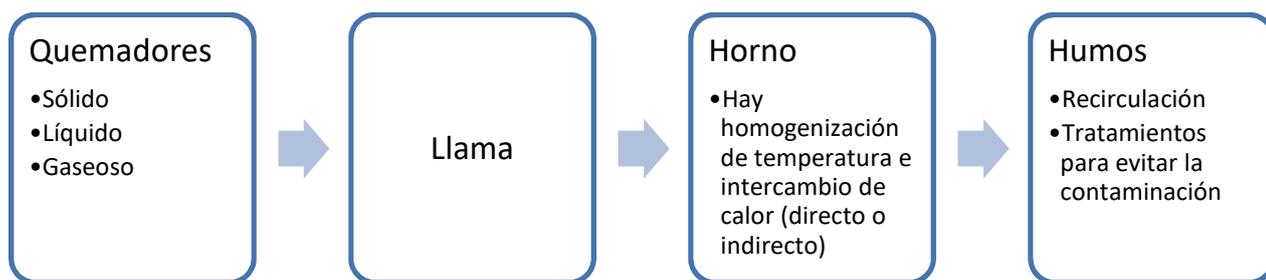
La vidrolana es un material que parece una esponja de lana, pero en realidad está hecha por fibras de vidrio sintético. Si se maneja inadecuadamente, produce un polvo que se puede ver en el ambiente, o también se puede detectar porque empieza a picar la mano (las agujas de vidrio están pinchando en la piel), y si se siente en la piel también se puede sentir en los pulmones.

\*Los metales son los que le dan la rigidez mecánica y resistencia que soportan todas las cargas de los otros aislantes de la pared del horno.

- Nuevos materiales: Son más económicos pero menos resistentes. Algunos son ladrillos con mayor porcentaje de alúmina, manta cerámica, papel cerámico, hormigón refractario (menor % de cemento).

### *Funcionamiento del horno de combustión*

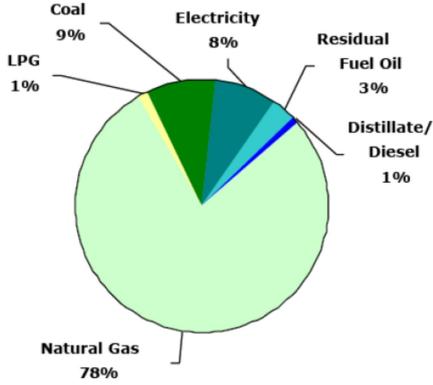
Es muy similar al funcionamiento de la caldera:



El diseño del horno es particular para cada carga. Es experimental.

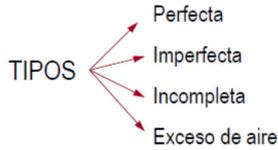
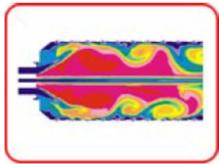
Hay industrias que deben quemar los desechos que producen. Es por ello que los quemadores en estos casos se diseñan acorde al material que se debe quemar. Requiere información, traer datos de otros lugares donde se haya hecho algo parecido y ver qué resultado da. Algunas industrias “les pagan” a estas empresas para que les quemen la basura industrial que generan.

### Tipos de Combustibles para Calentamiento Industrial

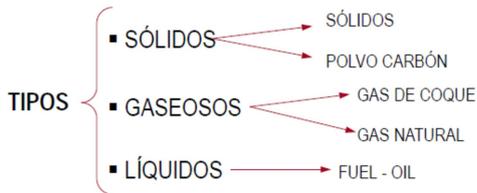
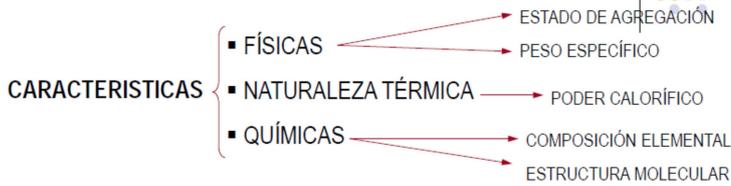


Source: EIA, 1997

### COMBUSTIÓN



### COMBUSTIBLES

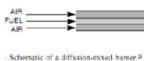
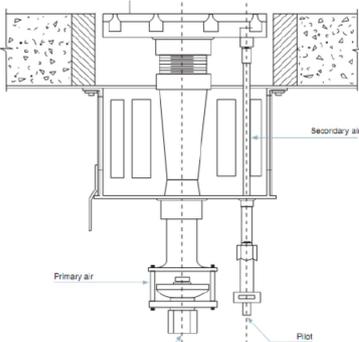


### QUEMADORES

Los quemadores pueden ser de:

- Gas
- Fuel - Oil
- Carbón Pulverizado
- Combinados (Gas y Fuel - Oil)

### QUEMADORES GAS



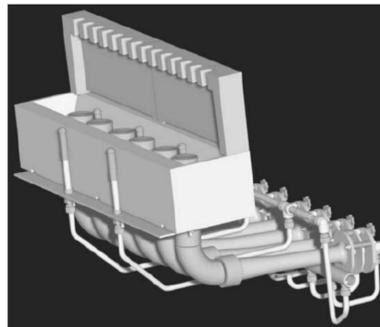
**PREMEZCLADO TOTAL**

### QUEMADORES GAS

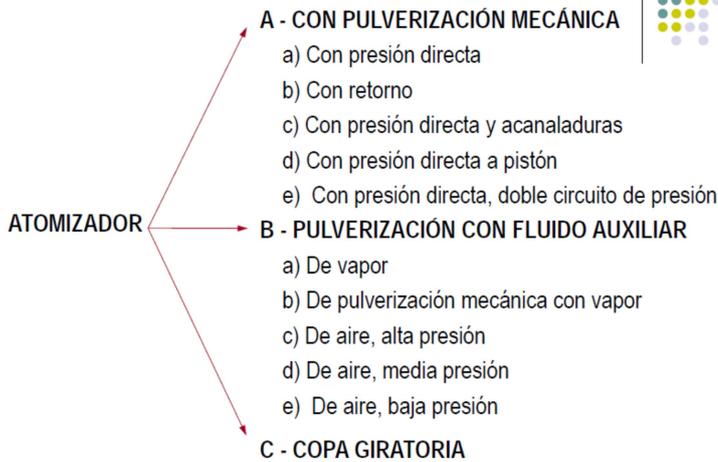
**PREMEZCLADO PARCIAL**



FIGURE 1.23 Schematic of a partial-premixed burner.

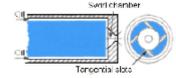
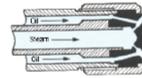


## QUEMADORES FUEL - OIL: ATOMIZACIÓN DEL COMBUSTIBLE

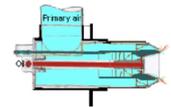


## QUEMADORES FUEL - OIL

ATOMIZADOR CON PULVERIZACIÓN MECÁNICA



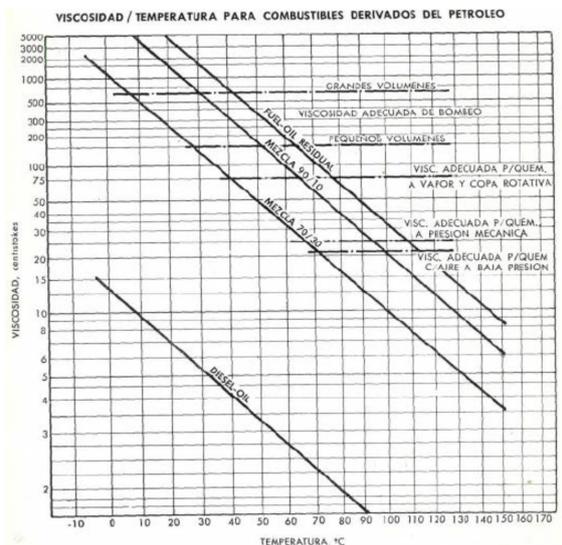
ATOMIZADOR CON FLUIDO AUXILIAR



ATOMIZADOR DE COPA GIRATORIA



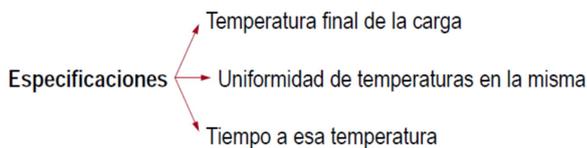
## INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA SOBRE LA VISCOSIDAD DEL COMBUSTIBLE



## CALENTAMIENTO DE SÓLIDOS EN HORNOS INDUSTRIALES

### ▪ Cantidad de calor a impartir a la carga:

Generación de calor → Transmisión de calor al material → Distribución del calor



También se especifica la velocidad de calentamiento y la velocidad de enfriamiento.-

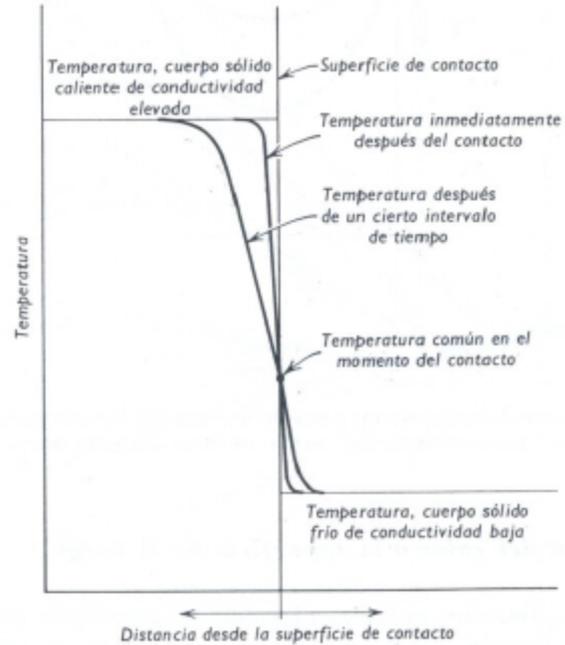
El calor que ha de impartirse a la carga es:  $Q = G \cdot C_p \cdot \Delta T$

## TRANSMISIÓN DEL CALOR A LA SUPERFICIE DE LA CARGA

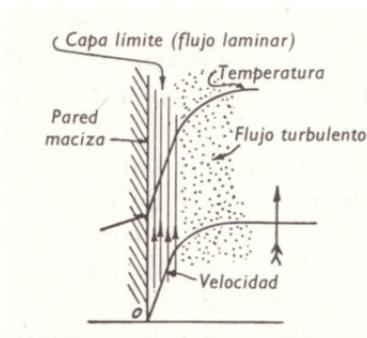
Teórica: transmisión por conducción, convección y radiación.

Práctica: transmisión por una combinación de las tres formas.-

**Por conducción:** Se produce al dejar un material frío sobre una solera caliente. La cantidad de calor transmitido en la unidad de tiempo depende no solamente de las temperaturas de los dos cuerpos, sino también de la difusibilidad térmica y de las formas de los cuerpos.-



**Por convección:** Por atracción molecular y de masas se mantiene una capa de fluido en la superficie de cada sólido. El calor se transmite por conducción a través de esta capa estacionaria. Si una corriente de un fluido gaseoso fluye paralelamente a la superficie del sólido, las moléculas vibrantes de ambos gases se mezclan. La película de la capa quieta se acelera y la de la corriente móvil se frena. El espesor de la capa limite quieta (que conduce mal el calor) se reduce y la transmisión del calor aumenta.



**Por radiación entre sólidos:** Los cuerpos sólidos calientes irradian calor. El calor transmitido por radiación de un sólido caliente a un sólido más frío es igual a la diferencia entre el calor radiado por el cuerpo caliente al cuerpo más frío y el calor radiado desde el cuerpo más frío al más caliente.

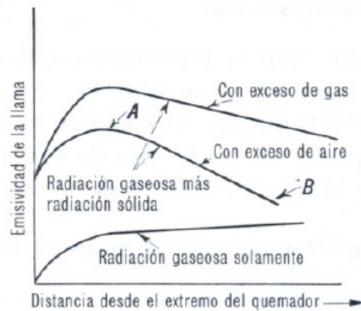
$$Q/A = \text{Coeficiente} \times (T/100)^4$$

Para cualquier cuerpo sólido, el coeficiente es igual a  $4,92 \times 10^{-8}$  multiplicado por la emisividad. La emisividad es igual a la absorbencia. Se entiende por absorbencia el calor que es absorbido por un cuerpo como fracción de la absorción máxima posible de calor en la unidad de tiempo y por unidad de superficie, pero el calor transmitido realmente es la diferencia entre el calor emitido y el calor recibido por radiación.

**Radiación entre gases puros y sólidos:** La radiación de los gases puros no sigue la ley de la cuarta potencia de la temperatura ni ninguna otra ley exponencial. Los únicos gases puros que radian calor de forma apreciable son los que poseen tres o más átomos por molécula, como  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_2$ ; el monóxido de carbono, aunque diatómico también da algo de radiación. Los cálculos de la transmisión del calor se basan únicamente en la observación.

▪ **Radiación de llamas luminosas:** La transmisión del calor de una llama es mayor que la de un gas puro que tiene la misma temperatura. La diferencia es tanto mas pronunciada cuanto más elevada es la temperatura. En cambio, la radiación de los gases puros no puede crecer tan rápidamente como la radiación de sólidos.

La radiación de la llama es una función de muchas variables, siendo las más importantes: composición del combustible, relación combustible – aire , espesor de la llama, distancia del quemador.



## INTERACCIÓN TÉRMICA EN LOS HORNOS

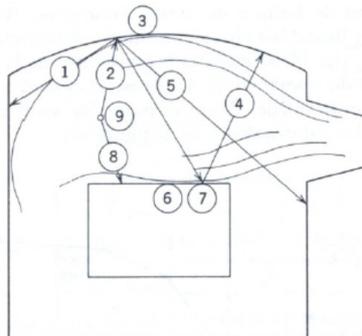
Convección por gases → paredes y carga (3 y 6)

Radiación en todas direcciones → moléculas (2 y 8)

Elementos superficiales → radian en todas las direcciones

La exactitud del cálculo de la transmisión es muy compleja y está proporcionada por las variables influyentes:

- Temperatura
- Composición productos de combustión
- Espesor de la cámara de gases
- Relación entre superficie de pared y expuesta de la carga
- Emisividades de las paredes y de la carga.



## DISTRIBUCIÓN DEL CALOR EN UN HORNO

La mayor parte del calor se libera en la zona de combustión.

1- Paso de calor a la carga.

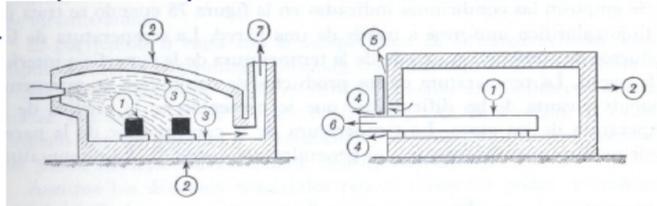
2- Pérdidas en el ambiente por radiación y convección desde la superficie exterior de las paredes o por conducción al suelo.

3- Paredes del horno y a través de la solera incrementando la temperatura de estas partes.

4- Radiación a través de grietas u otras aberturas.

5- Gases del horno que salen por la puerta.

Existen, además, pérdidas especiales que son características de diversos tipos de hornos .

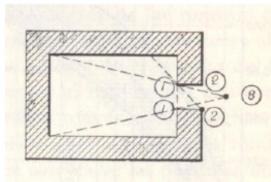


### PÉRDIDAS

▪ **Pérdidas por las paredes:** son las que más afectan a la economía del horno. Estas dependen del tipo de funcionamiento del horno:

- funcionamiento continuo
- funcionamiento intermitente

▪ **Pérdidas de calor por radiación a través de las aberturas**



▪ **Pérdidas de calor por los gases que escapan por las puertas**

## PÉRDIDAS ESPECIALES



- *Pérdidas de calor debidas a que la carga sobresale fuera del horno*
- *Pérdidas de calor en las tenazas y máquinas de cargar*
- *Pérdidas de calor en las bateas, cadenas transportadoras y rodillos*

## OTRAS PÉRDIDAS

- *Calor sensible sacado del horno por los productos de combustión*
- *Pérdidas de calor por combustión incompleta*