Tema 3. Proceso y tecnología de combustión

1. Proceso químico de la combustión:

Balances de materia y energía, aire de la combustión

2. Características de los combustibles y Eficacia de la combustión

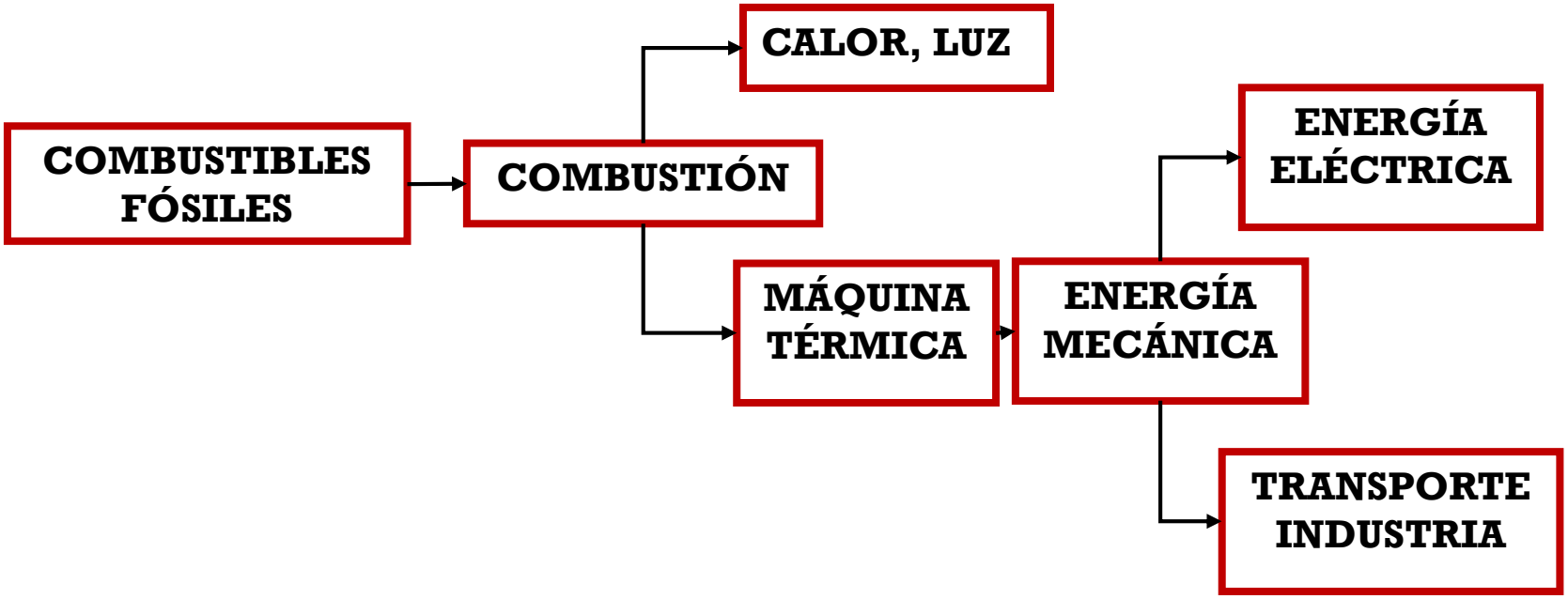
3. Tecnología de la combustión

Clasificación de los equipos para la combustión : Hornos y calderas

Introducción

1. Proceso químico de la combustión.

DEFINICIÓN: Reacción química mediante la cual se transforma la energía química contenida en los combustibles en energía térmica.



ESQUEMA BÁSICO DE COMBUSTIÓN:

COMBUSTIBLE + COMBURENTE → GASES DE COMBUSTIÓN + CENIZAS + E

- **COMBUSTIBLE** → Fuente de H y C (sustancias con alto contenido en E.Química)
- **COMBURENTE** → Fuente de O_2 (aire, aire enriquecido, oxígeno, …)
- **GASES DE COMBUSTIÓN** → CO_2, H_2O, N_2, SO_X, NO_X, …
- **CENIZAS** → Residuo sólido que contiene especies no combustibles
- **ENERGÍA TÉRMICA** → diferencia de entalpía entre productos y reactivos: entalpía de combustión

1. Proceso químico de la combustión.

Balance de materia :

- Cantidad de oxígeno (y aire) requerida
- Cantidad y composición de los humos

Tipos de combustión
- Ideal o estequeométrica
- Completa
- Incompleta

COMBUSTIBLE + COMBURENTE → GASES DE COMBUSTIÓN + CENIZAS + E

masa de productos = masa de reactivos

moles de producto ≠ moles de reactivos

Balance de materia de los combustibles elementales y combustión completa:

Carbono: $C + O_2 \rightarrow CO_2$

1 kmol de C + 1 kmol de O_2 → 1 kmol de CO_2

12,01 kg de C + 31,98 kg de O_2 → 43,99 kg de CO_2

1 kg de C + 2,664 kg de O_2 → 3,664 kg de CO_2

Hidrógeno: $H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$

1 kmol de H_2 + 1/2 kmol de O_2 → 1 kmol de H_2O

2,016 kg de H_2 + 15,999 kg de O_2 → 18,015 kg de H_2O

1 kg de H_2 + 7,936 kg de O_2 → 8,936 kg de H_2O

Azufre: $S + O_2 \rightarrow SO_2$

1 kmol de S + 1 kmol de O_2 → 1 kmol de SO_2

32,06 kg de S + 31,98 kg de O_2 → 64,04 kg de SO_2

1 kg de S + 0,998 kg de O_2 → 1,998 kg de SO_2

Combustión incompleta: Inquemados aparecen cuando hay defecto de aire o existe un mal contacto comburente- combustible.

CO, hollín (partículas), Hidrogeno libre, HC sin quemar

1. Proceso químico de la combustión.

Entalpía de combustión

$$\Delta H_R = h_P - h_R$$

- $\Delta H_R < 0$ → **Reacción exotérmica** ($Q_R > 0$)
- $\Delta H_R > 0$ → **Reacción endotérmica** ($Q_R < 0$)

Poder Calorífico

$$PC = -\frac{\Delta H_R}{M}$$

PCS:

$HC + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O$ (líquida

PCI:

$HC + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O$ (vapor)

Composición y PC de combustibles a 298 K (10^3 kJ/kg)

Sólidos

	x_C	x_H	x_O	x_N	x_S	x_W	x_a	PCS	PCI
Madera	0,5	0,06	0,44	<0,01	0	0,12-0,25	0,002-0,008	16,9	15,3
Turba	0,56	0,06	0,34	0,04	<0,01	0,25-0,50	0,01-0,04	13	10
Hulla grasa	0,887	0,049	0,041	0,016	<0,01	<0,01	<0,01	30-34	28-32
Antracita	0,918	0,036	0,026	0,014	<0,01	<0,01	<0,01	30-34	28-32
Coque	0,975	0,003	0,003	<0,01	<0,01	0,02-0,16	<0,01	30	29
Carbono (amorfo)	1							33,9	

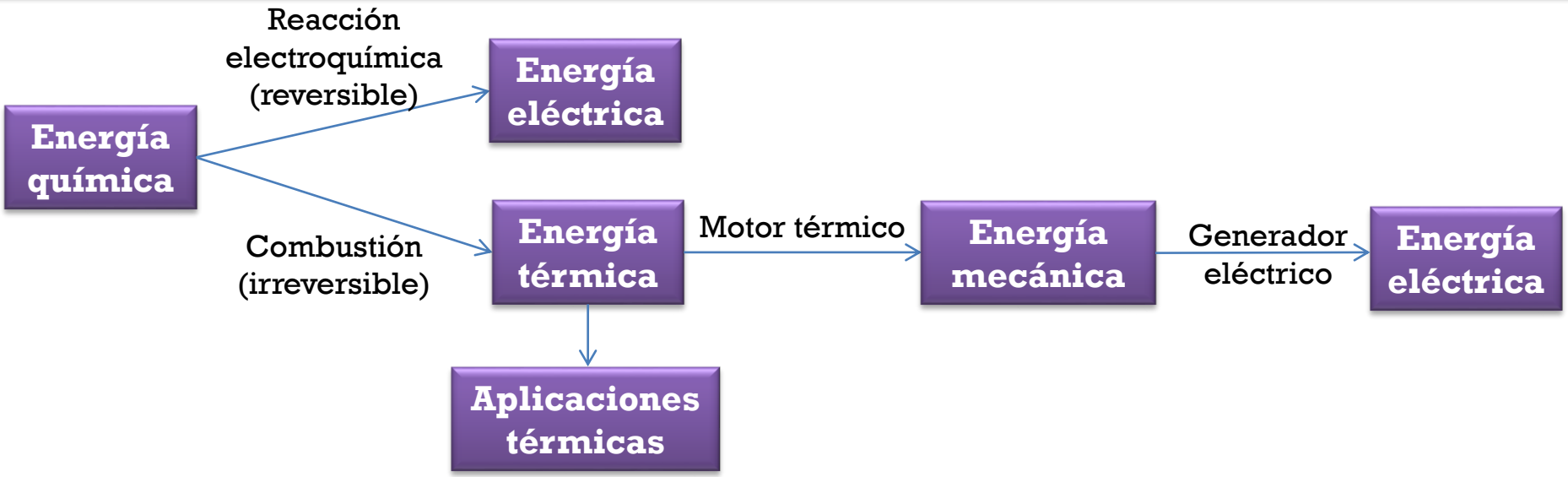
Líquidos

	x_C	x_H	x_{O+H}	x_S	PCS	PCI
Gasolina	0,850	0,1445	-	0,0005	46,5	43,6
Gasoil	0,860	0,1095	-	0,0005	44,5	42,1
Benzol	0,918	0,0820	-	0,0003	42,3	40,4
Fueloil	0,860-0,85	0,100-0,13	0,002-0,010	0,010-0,035	42,3-45,4	40,0-42,7
Alquitrán de hul	0,898	0,065	0,029	0,0008	38,9	37,7
C_6H_6	0,923	0,077	-	-	42,0	40,3
C_8H_{18}	0,842	0,158	-	-	49,5	46,0
CH_3OH	0,375	0,125	0,500	-	20,0	21,0
C_2H_5OH	0,522	0,130	0,348	-	29,7	26,8

Gases

	x_C	x_H	x_O	PCS	PCI
H_2	-	1	-	143	121
CO	0,429	-	0,571	10,1	10,1
CH_4	0,750	0,250	-	55,6	50,1
C_2H_2	0,923	0,077	-	49,9	48,3
C_2H_6	0,800	0,200	-	51,9	47,6
C_3H_6	0,818	0,182	-	50,5	46,5
C_4H_{10}	0,828	0,172	-	49,6	45,8

1. Proceso químico de la combustión.



Algunas aplicaciones del proceso de combustión

1. **Hornos y calderas**
2. **Motores de combustión interna alternativos**
3. **Turbinas de gas y motores a reacción**
4. **Motores cohete**
5. **Armas y explosivos**
6. **Procesos químicos**
7. **Incendios y seguridad**

2. El aire de la combustión.

- ✓ **Oxigeno puro** **Aplicaciones especiales** **(corte y soldadura)**
- ✓ **Aire es el portador del oxígeno (simplificación: AIRE SECO)**

Gas	Fracción molar (kmol/kmol de aire)	Fracción másica (kg/kg de aire)
Nitrógeno (N_2)	0,79	0,768
Oxígeno(O_2)	0,21	0,232

- ✓ **Cada mol de oxígeno → 0,79/0,21 = 3,76 moles de nitrógeno**
- ✓ **El N_2 es inerte (simplificación) (Elevadas temperaturas NO_x)**
- ✓ **Relación aire – combustible (AC)**

$$AC = \frac{masa\ aire}{masa\ combustible} = \frac{moles\ de\ aire \cdot Pm\ (aire)}{moles\ de\ combustible \cdot Pm\ (combustible)}; \quad \overline{AC}\frac{moles\ aire}{moles\ \ combustible}$$

$$AC = \overline{AC} \cdot \frac{Pm\ (aire)}{Pm\ (combustible)}$$

- ✓ **Relación combustible – aire (F)**

$$F = \frac{masa\ o\ caudal\ másico\ de\ combustible}{masa\ o\ caudal\ másico\ de\ aire} = \frac{1}{AC} = \frac{m_{comb}}{m_{aire}} = \frac{\dot{m}_{comb}}{\dot{m}_{aire}}$$

2. El aire de la combustión.

✓ **CANTIDAD TEÓRICA O ESTEQUIOMÉTRICA DE AIRE o Consumo mínimo específico**: Cantidad mínima de aire que proporciona oxígeno suficiente para producir la combustión completa. **NO** hay oxígeno en los productos. **SI** hay nitrógeno en los productos.

$$O_{esteq}\left(\frac{kg\ O_2}{kg_{combustible}}\right) = 2{,}664 \cdot C + 7{,}936 \cdot H + 0{,}998 \cdot S - O$$

C, H, S y O → Fracción másica correspondiente a Carbono, hidrógeno, azufre y oxígeno.

$$A_{esteq} = Aire_{estequeométrico}\left(\frac{kg_{aire}}{kg_{combustible}}\right) = AC_{esteq} = \frac{O_{esteq}}{0{,}232}$$

✓ **COEFICIENTE DE EXCESO DE AIRE** (ε o λ): Relación aire – combustible real y la teórica.

$$\frac{masa\ de\ aire\ real}{masa\ de\ aire\ esteq} = \frac{AC}{A_{esteq}} = \frac{0{,}232 \cdot AC}{O_{esteq}}$$

✓ **CANTIDAD REAL DE AIRE:** Es necesario aportar un exceso de aire en la combustión:

- Mezcla imperfecta combustible y aire.
- Tiempo limitado de permanencia en el hogar.
- Limitar la temperatura de la combustión.

- Pérdidas por entalpía sensible de humos (calentar nitrógeno)
- Posibilidad de reacciones secundarias (oxigeno libre)

$$AC\left(\frac{kg_{aire}}{kg_{combustible}}\right) = exceso \cdot AC_{esteq}$$

$$\dot{m}\ aire\left(\frac{kg_{aire}}{tiempo}\right) = AC \cdot \dot{m}\ combustible$$

$exceso$ {
- Combustibles solidos 1,5-2
- Combustibles liquidos 1-1,2
- Combustible gaseosos 1-1,1

2. El aire de la combustión.

PRODUCTOS DE COMBUSTIÓN

HUMOS

N_2 : Aire
CO_2 : oxidación de C
H_2O : oxidación de H
O_2: exceso de aire
SO_2: oxidación de S
CO: oxidación incompleta C
H_2: reacciones secundarias
Otros: NO_X, SO_X…
PARTÍCULAS: (en suspensión)
Hollin, inquemados, cenizas volantes, condensados ácidos (bajas T)

Humos secos (emisiones)

Humos húmedos o totales (Chimenea)

CENIZAS Y ESCORIAS

CENIZAS: residuo no combustible.
ESCORIAS: cenizas de bajo punto de fusión (compuestos metálicos).

Composición másica de los gases de combustión
Referidas a unidad de masa del combustible

$m_{CO_2} = 3{,}664 \cdot C$ (kg CO_2/kg combustible)
$m_{H_2O} = 8{,}937 \cdot H + w$ (kg H_2O/kg combustible)
$m_{SO_2} = 1{,}998 \cdot S$ (kg SO_2/kg combustible)
$m_{O_2} = 0{,}232 \cdot (\lambda - 1)\, A_{esteq}$ (kg O_2/kg combustible)
$m_{N_2} = 0{,}768 \cdot \lambda \cdot A_{esteq} + N$ (kg N_2/kg combustible)

$m_{humos} = m_{CO2} + m_{H2O} + m_{SO2} + m_{O2} + m_{N2}$ kg h/kg combustible

$m_{humos\ secos} = m_{CO2} + m_{SO2} + m_{O2} + m_{N2}$ kg h seco/kg combustible

$X_{CO2} = m_{CO2} / m_{humos}$
$X_{H2O} = m_{H2O} / m_{humos}$
$X_{SO2} = m_{SO2} / m_{humos}$
$X_{O2} = m_{O2} / m_{humos}$
$X_{N2} = m_{N2} / m_{humos}$

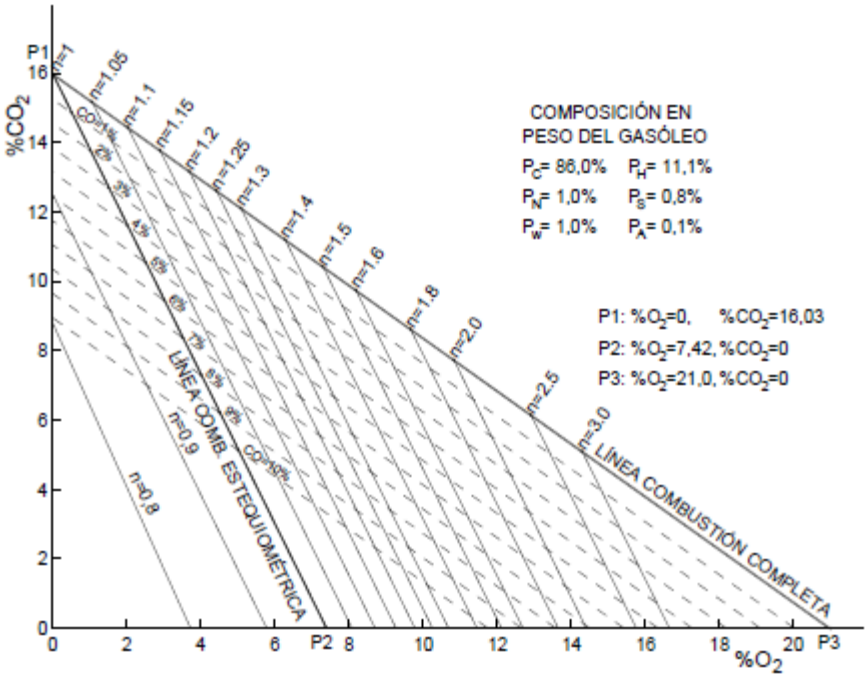
Caudal másico (kg humos / tiempo)

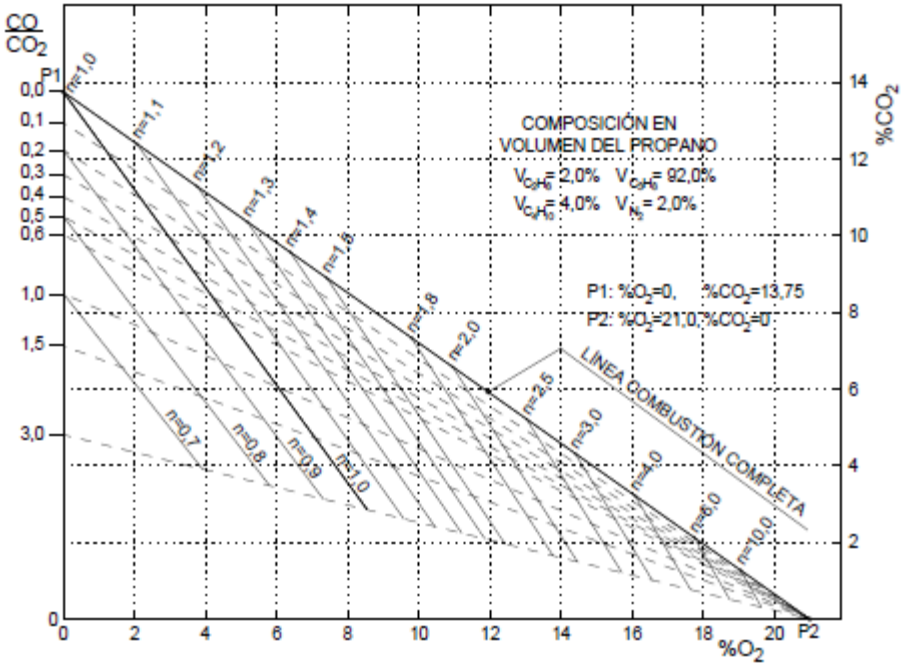
$\dot{m}_{humos} = \dot{m}_h = m_h$(kg h / kg comb) $\cdot\ \dot{m}_{comb}$ (kg combustible/tiempo)

$\dot{m}_{humos\ secos} = \dot{m}_h - \dot{m}_{H2O} = m_{hsecos}$(kg h seco / kg comb)$\cdot\ \dot{m}_{comb}$ (kg combustible/tiempo)

2. El aire de la combustión.

DIAGRAMA DE BUNTE - OSTWALD





2. El aire de la combustión.

Precipitaciones ácidas en los humos

$SO_2 + ½\ O_2 + H_2O \longrightarrow H_2SO_4(g)$

$2\ NO_2 + ½\ O_2 + H_2O \longrightarrow 2\ HNO_3(g)$

Si $T < T_{rocio}$ del H_2SO_4 → **condensación**

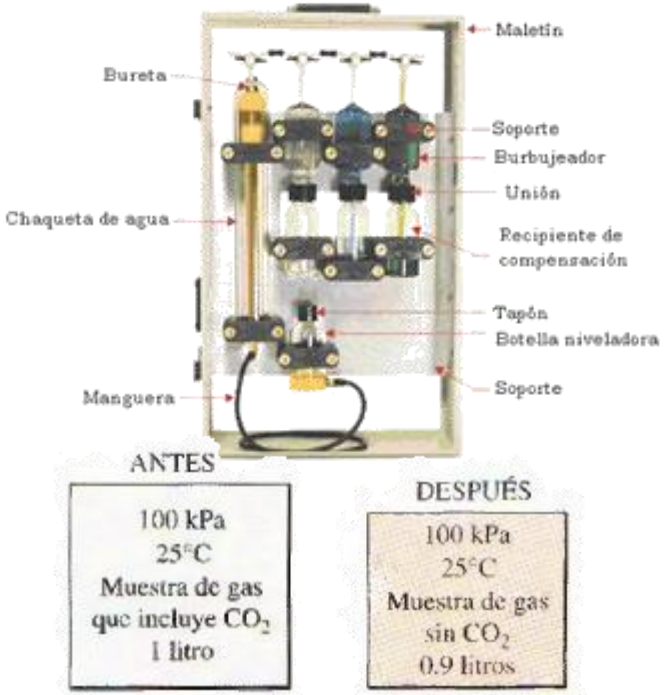
Instalaciones que usen combustible con S>0,5 %
Temperaturas de salida limitadas (200 °C)

COMPOSICIÓN DE LOS HUMOS

- a) Fracción másica
- b) Formular directamente

Analizador ORSAT

Muestra de gas sobre agua



$$y_{CO_2} = \frac{V_{CO_2}}{V} = \frac{0.1}{1} = 0.1$$

CONCLUSIONES CUALITATIVAS

- **Es deseable un alto contenido en CO_2.**
  - La combustión es completa
  - Poco exceso de aire
- **Es indeseable un alto contenido en O_2.**
  - La combustión es incompleta
  - Mucho exceso de aire
- **Los inquemados deben ser lo más bajo posible.**
- **Temperatura:**
  - Alta temperatura → Perdidas de calor
  - Bajas temperaturas → corrosión, ….

2. El aire de la combustión.

Tabla 1.2. Balance de masa en un proceso de combustión completa

Reacción	$C + O_2 \rightarrow CO_2$ + calor	$H_2 + 1/2\ O_2 \rightarrow H_2O$	$S + O_2 \rightarrow SO_2$	$CO + 1/2\ O_2 \rightarrow CO_2$	$C_mH_n + (m + n/4)\ O_2 \rightarrow m\ CO_2 + n/2\ H_2O$
Balance de masa en kmol	1 kmol C + 1 kmol $O_2 \rightarrow$ 1 kmol CO_2	1 kmol H_2 + 1/2 kmol $O_2 \rightarrow$ 1 kmol H_2O	1 kmol S + 1 kmol $O_2 \rightarrow$ 1 kmol SO_2	1 kmol CO +1/2 kmol $O_2 \rightarrow$ 1 kmol CO_2	1 kmol C_mH_n + (m + n/4) kmol $O_2 \rightarrow$ m kmol CO_2 + n/2 kmol H_2O
Balance de masa en m^3N (0 ºC y a 1 atm)	1 kg C + 1,865 m^3N $O_2 \rightarrow$ 1,865 m^3N CO_2	1 kg H_2 + 5,556 m^3N $O_2 \rightarrow$ 11,12 m^3N H_2O	1 kg S + 0,6984 $O_2 \rightarrow$ 0,6828 m^3N SO_2	1 kg CO + 0,400 m^3N $O_2 \rightarrow$ 0,800 m^3N CO_2	1 m^3N C_mH_n + (m + n/4) m^3N $O_2 \rightarrow$ m m^3N CO_2 + n/2 m^3N H_2O
Balance de masa en kg	1 kg C + 2,664 kg $O_2 \rightarrow$ 3,664 kg CO_2	1 kg H_2 + 7,937 kg $O_2 \rightarrow$ 8,937 kg H_2O	1 kg S + 0,998 kg $O_2 \rightarrow$ 1,998 kg SO_2	1 kg CO + 0,572 kg $O_2 \rightarrow$ 1,572 kg CO_2	1 kg C_mH_n + (32 m+8n/12,01m+ n) kg $O_2 \rightarrow$ (44,01m/12,01m+n) kg CO_2 + (9,01n/12,01m+n) kg H_2O

Tabla 1.3. Aire estequiométrico y composición de gases de combustion completa

A) En función de la composición del combustible en forma de fracción másica de los elementos c, h, s, o y la de agua w (combustibles sólidos y líquidos)

	Fracción molar (kmol/ kg_{comb})	Fracción volumétrica (m^3N/kg_{comb})	Fracción másica (kg/kg_{comb})
Oxígeno mínimo (O_{stq})	c/12,01 + h/4,036 + s/32,06 - o/32,00	22,4 (c/12,01 + h/4,036 + s/32,06 - o/32,00)	32,00 (c/12,01 + h/4,036 + s/32,06 - o/32,00)
Aire mínimo (A_{sto})	O_{stq}/0,21	O_{stq}/0,21	O_{stq}/0,232
Exceso de aire (λ)	$\lambda = A_{real}/ A_{sto}$	$\lambda = A_{real}/ A_{sto}$	$\lambda = A_{real}/ A_{sto}$
Composición de los gases de combustión			
CO_2	c/12,01	22,4 (c/12,01)	44,01 (c/12,01)
H_2O	h/2,018 + w/18,02	22,4 (h/2,018 + w/18,02)	18,02 (h/2,018) + w
SO_2	s/32,06	22,4 (s/32,06)	64,06 (s/32,06)
O_2	(λ-1) (c/12,01 + h/4,036 + s/32,06 - o/32,00)	22,4 (λ-1) (c/12,01 + h/4,036 + s/32,06 - o/32,00)	32,00 (λ-1) (c/12,01 + h/4,036 + s/32,06 - o/32,00)
N_2	(79/21) λ (c/12,01 + h/4,036 + s/32,06 - o/32,00)	22,4 (79/21) λ (c/12,01 + h/4,036 + s/32,06 - o/32,00)	28,01(79/21) λ (c/12,01 + h/4,036 + s/32,06 - o/32,00)
Total	(100/21) λ c/12,01 + h/4,036 + s/32,06 - o/32)+ h/4,036+ o/32	22,4[(100/21) λ c/12,01 + h/4,036 + s/32,06 - o/32)+ h/4,036+ o/32]	

B) En función de la composición del combustible en fracción volumétrica de H_2, CO, C_mH_n y w (combustibles gaseosos)

Fracción molar ó volumétrica kmol/$kmol_{comb}$ ó m^3N/ m^3N_{comb}
1/2 H_2 + 1/2 CO + $\Sigma(m+n/4)C_mH_n$
O_{stq}/0,21
$\lambda = A_{real}/ A_{sto}$
$\Sigma m\ C_mH_n$ + CO
$H_2 + \Sigma\ (n/2)\ C_mH_n$
(λ-1) (1/2 H_2 + 1/2 CO + $\Sigma(m+n/4)C_mH_n$)
(79/21) λ (1/2 H_2 + 1/2 CO + $\Sigma(m+n/4)C_mH_n$)

3. Características de los combustibles.

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS GENERALES

Densidad

Medida en condiciones normalizadas (ASTM D287 y 1298) da idea del rendimiento en productos ligeros que se puede obtener en el fraccionamiento del crudo

Densidad relativa (specific gravity)

$$d_4^{15} = \frac{peso\ de\ un\ volumen\ de\ producto\ a\ 15^{o}C}{peso\ del\ mismo\ volumen\ de\ agua\ a\ 4^{o}C}$$

Densidad relativa estándar (standard specific gravity)

$$S = \frac{peso\ de\ un\ volumen\ de\ producto\ a\ 15{,}55^{o}C\ (60^{o}F)}{peso\ del\ mismo\ volumen\ de\ agua\ a\ 15{,}55^{o}C\ (60^{o}F)}$$

$$S = 1{,}001 \cdot d_4^{15}$$

Densidad API o en grados API (American Petroleum Institute)

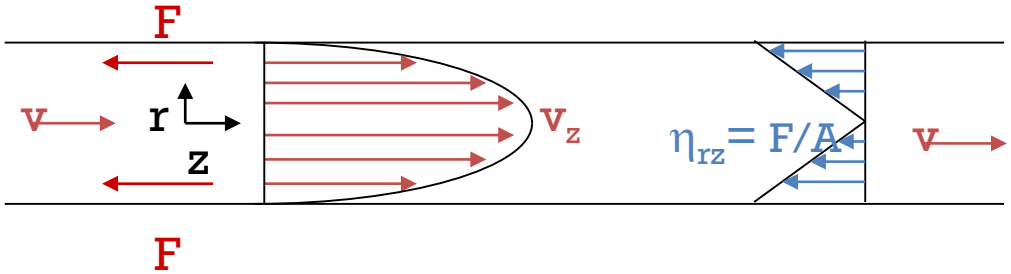
$$^{o}API = \frac{141{,}5}{S} - 131{,}5$$

Tipo de crudo	°API
Arabian Light	34
Arabian Heavy	28
Venezuela	10

3. Características de los combustibles.

VISCOSIDAD

- **Determina las posibilidades de bombeo y el régimen en las conducciones.**
- **Viscosidad absoluta o dinámica: Cociente entre la tensión rasante existente en la pared del recipiente o tubo que contiene el fluido en movimiento y el valor del gradiente de la velocidad del fluido.**



$$\mu = \frac{\eta_{rz}}{\frac{dv_z}{dr}}$$

$$\eta_{rz} = -\mu\left(\frac{dv_z}{dr}\right)$$

Ley de Newton

Unidades: 1 poise = 1 g/cm s = 100 centipoises (cp)

- **Viscosidad cinemática: Cociente entre la viscosidad absoluta del fluido y su densidad, medidos ambos a la misma temperatura.**

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

Unidades

$$Stoke = \frac{Poise}{g/cm^3} = \frac{g/cm\ s}{g/cm^3} = \frac{cm^2}{s}$$

$$Stoke = 10^{-4}\frac{m^2}{s}$$

$$cSt = \frac{mm^2}{s}$$

3. Características de los combustibles.

VISCOSIDAD

La medida de viscosidad cinemática se basa en el **tiempo** que tarda en pasar una cantidad de fluido dada entre dos muescas en un tubo **capilar calibrado.**

constante de calibrado del aparato → cSt

La viscosidad puede expresarse también como el tiempo, en segundos, empleado por una cantidad normalizada de líquido en fluir a través de un orificio calibrado.

VISCOSIDAD CINEMATICA DE CRUDOS DE PETROLEO (cSt)

Tipo de crudo	°API	21°C	38°C	99°C
Arabian Light	34	5,6	3,8	----
Arabian Heavy	28	35,8	18,9	----
Venezuela	10	--- no fluye	---	228

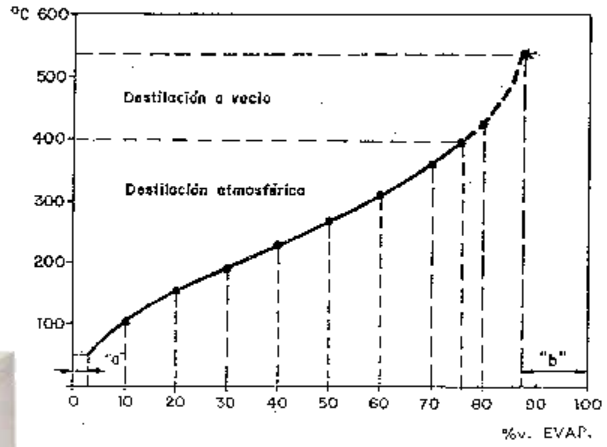
3. Características de los combustibles.

ENSAYOS DE DESTILACIÓN DE LABORATORIO

Mejor valorización del crudo petrolífero y posible rendimiento del crudo en el fraccionamiento industrial.

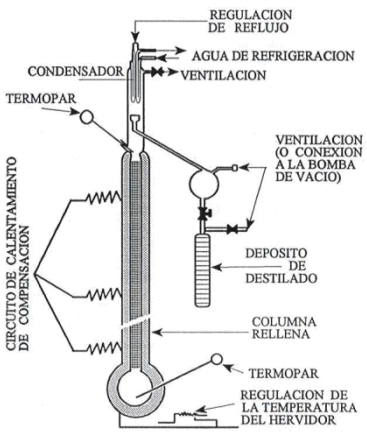
DESTILACIÓN ASTM (ASTM D-86, ASTM D-1160)

Norma ASTM D86: Productos ligeros y pesados.
Norma ASTM D-1160: Residuos y crudos

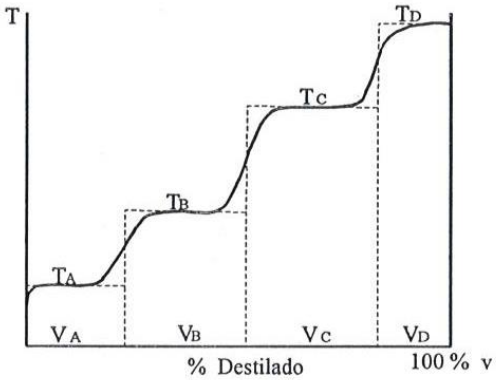


DESTILACIÓN TBP (True Boiling Point) (ASTM D 2892)

Columna de destilación con 15 a 18 platos teóricos y con una razón de reflujo 5:1. Se puede aplicar a cualquier tipo o fracción de crudo, excepto a GLP, naftas muy ligeras o fracciones con puntos de ebullición superiores a 400 °C.



EQUIPO DE DESTILACION TBP



ENSAYOS DE DESTILACIÓN DE LABORATORIO

PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE LAS CURVAS DE DESTILACIÓN

- Punto ASTM-50 y TBP-50 %. Temperatura del líquido a la que el ensayo ASTM o TBP, respectivamente, ha destilado el 50 % v de la carga: $(t_{50})_{ASTM}$ y $(t_{50})_{TBP}$

- Pendiente del tramo recto central de las curvas ASTM y TBP, concretamente entre el 70 % y el 10 % v del destilado:

$$S = \frac{t_{70} - t_{10}}{60} \quad \frac{^{o}C}{\%}$$

- Temperatura media volumétrica de ebullición ("Volumetric Average Boiling Point – VABP)

CRUDOS:

$$(VABP)_{ASTM} = \frac{(t_{30} + t_{50} + t_{70})_{ASTM}}{3}$$

FRACCIONES:

$$(VABP)_{ASTM} = \frac{(t_{10} + 2t_{50} + t_{90})_{ASTM}}{4}$$

CRUDOS:

$$(VABP)_{TBP} = \frac{(t_{20} + t_{50} + t_{80})_{ASTM}}{3}$$

FRACCIONES:

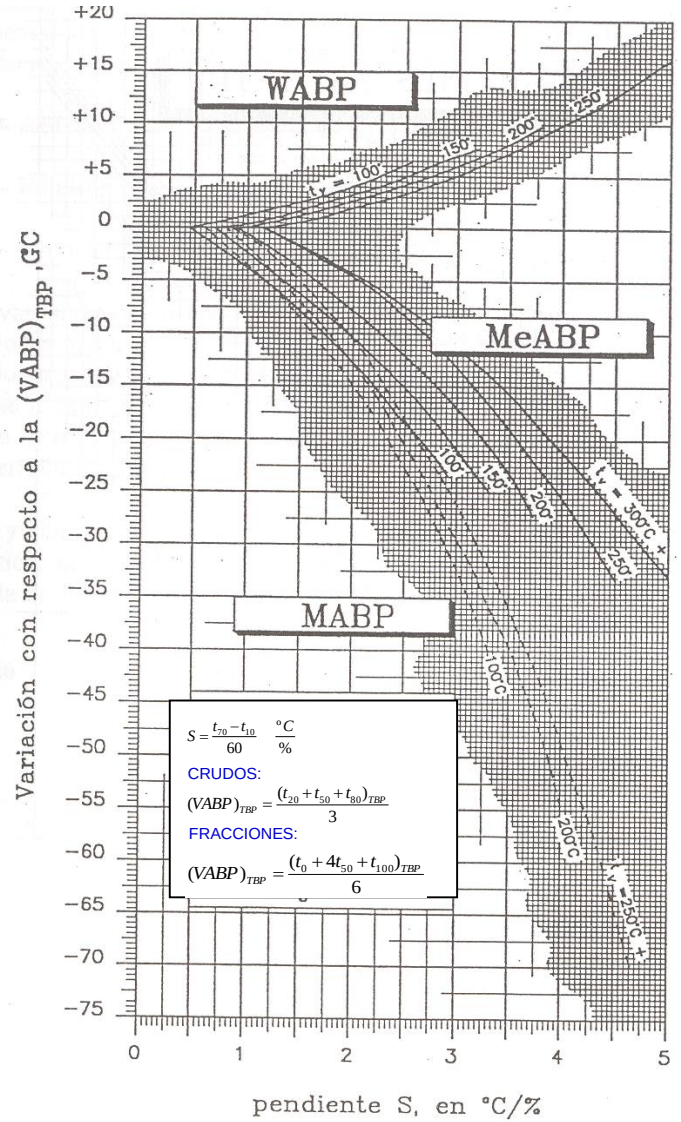
$$(VABP)_{TBP} = \frac{(t_{0} + 4t_{50} + t_{100})_{TBP}}{6}$$

- Temperatura media gravimétrica (WABP).
- Temperatura media molar (MABP).
- Temperatura media ponderada (MeABP).

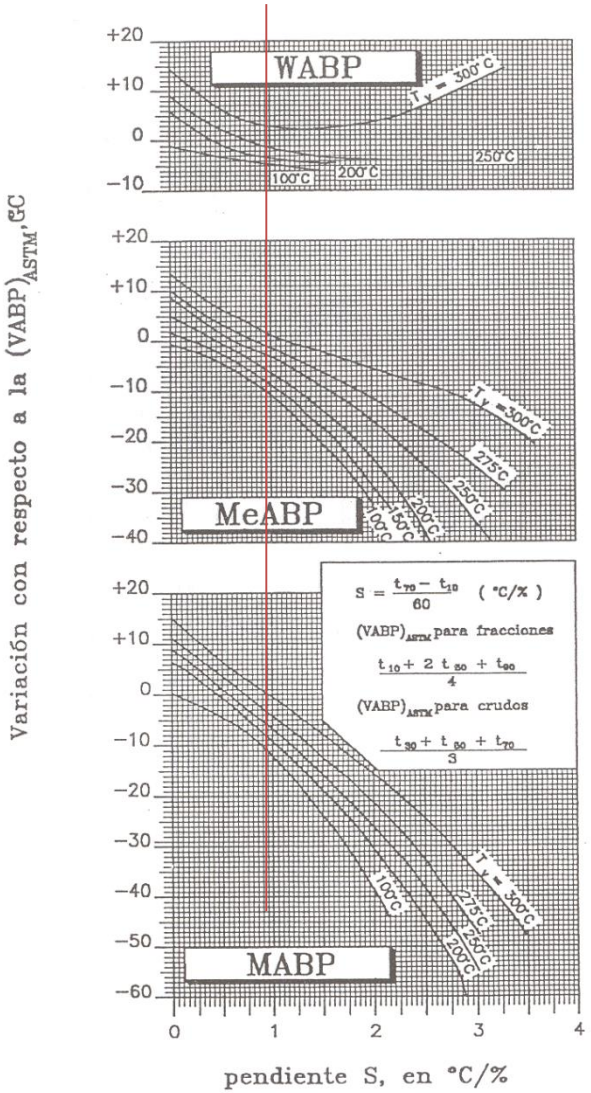
} Ábacos

3. Características de los combustibles.

DETERMINACIÓN DE LAS TEMPERATURAS MEDIAS DE EBULLICIÓN A PARTIR DE LA TBP



DETERMINACIÓN DE LAS TEMPERATURAS MEDIAS DE EBULLICIÓN A PARTIR DE LA ASTM



3. Características de los combustibles.

FACTOR DE CARACTERIZACIÓN DEL CRUDO

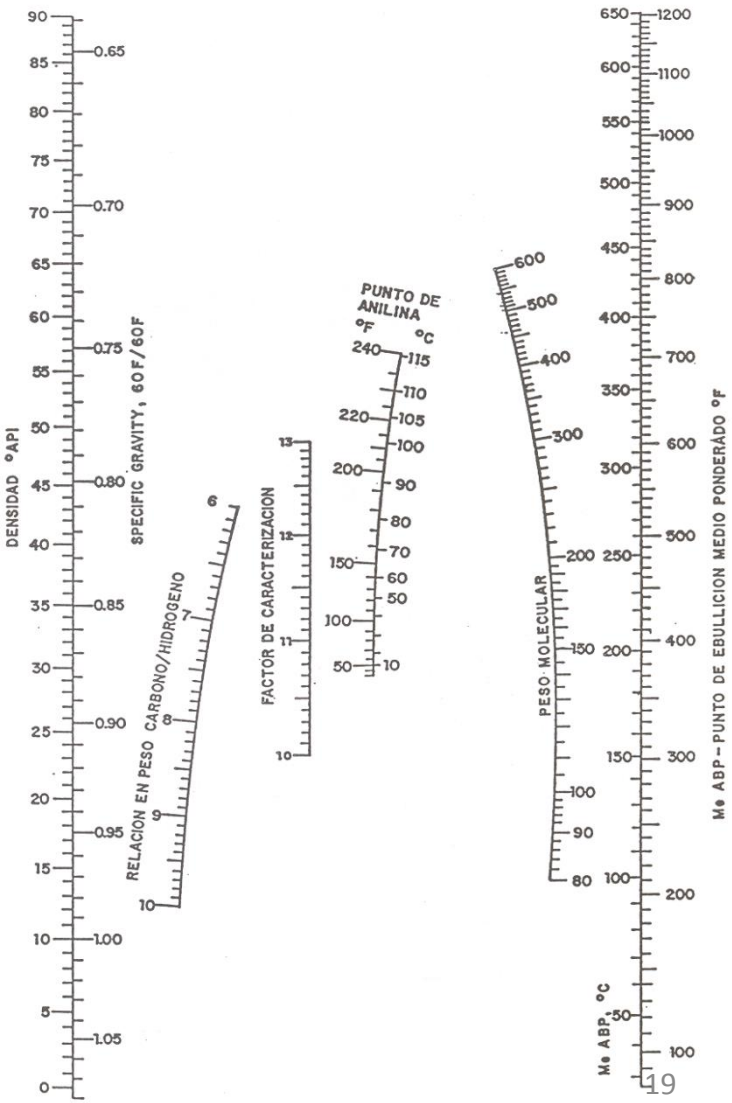
Se basa en que las densidades relativas de los hidrocarburos están relacionadas con sus razones H/C y que la temperatura de ebullición está ligada con el número de átomos de carbono en sus moléculas.

$$K_{UOP} = \frac{(MeABP)^{1/3}}{S}$$

- MeABP = Temperatura media ponderada, °R
- S = Densidad relativa standard.

K_{UOP}= 13 → parafinas
K_{UOP}= 12 → hidrocarburos cuyos pesos de cadena y anillo son equivalentes
K_{UOP}= 11 → naftenos
K_{UOP}= 10 → aromáticos

ÁBACOS PARA LA ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES



3. Características de los combustibles.

- **VOLATILIDAD:** adecuada al clima y altitud donde se consume
- **AUSENCIA DE CONTAMINANTES:** componentes corrosivos (S), poliolefinas, etc.
- **ÍNDICE DE OCTANO ADECUADO.** Evitar autodetonación de la gasolina
  - ✓ **Razón crítica de compresión:** valor máximo de la relación de compresión por encima de la cual se produce autodetonación. Depende del tipo de hidrocarburos que componen la gasolina.
  - ✓ **Índice de octano:** proporción porcentual de iso-octano en una mezcla binaria de n-heptano e iso-octano que tiene la misma relación crítica de compresión que la gasolina. Se puede aumentar con una composición adecuada en la gasolina y mediante la adición de antidetonantes (TEP, MTBE y TAME).
- **ÍNDICE DE CETANO ADECUADO.** Controlar el retraso en el encendido
  - **Índice de cetano:** porcentaje de n-cetano (C16) en una mezcla de n-cetano y α-metil-naftaleno que provoca el mismo retraso en el encendido que el gasóleo en cuestión.
- **ELEVADA RESISTENCIA A LA OXIDACIÓN**
- **PROPIEDADES EN FRÍO ADECUADAS**

Algunas aplicaciones del proceso de combustión

- **Hornos y calderas**
- **Motores de combustión interna alternativos**
- **Turbinas de gas y motores a reacción**
- **Armas y explosivos**
- **Procesos químicos**
- **Incendios y seguridad**
- **Motores cohete**

HORNOS INDUSTRIALES: equipos o dispositivos utilizados en la industria, en los que se calientan por encima de la temperatura ambiente, los materiales y las piezas o elementos colocados en su interior.

Hornos
FORMA DE CALENTAMIENTO

- **HORNOS DE LLAMA** — Gases calientes (llama) producidos en la combustión de combustibles sólidos, líquidos o gaseosos.
- **HORNOS ELÉCTRICOS**

Tipo de calentamiento	Tecnología	Fundamento físico	Densidad de potencia (kW/m^2)
Directo	Por conducción	Efecto Joule	$100 - 10^6$
	Por inducción electromagnética	C. Foucault - Histéresis	$50 - 5\ 10^4$.
	Alta frecuencia	Efecto Dieléctrico	30 - 100
	Híper-frecuencia		50 - 500
	Láser	Bombardeo electrónico	$10^5 – 10^{16}$
	Arco directo		$10^4 – 10^{10}$
Indirecto	Por resistencias	Radiación termo-eléctrico-magnética	5 - 60
	Radiación infrarroja		10 - 300
	Arco indirecto		$10^3 - 5 \cdot 10^6$
	Plasma		$10^3 -.5 \cdot 10^5$
	Microondas	Campo electromagnéticos	

5. Cámara de combustión

Cámara de combustión: Recinto donde se realiza la combustión. Forma parte de otros dispositivos térmicos (calderas, hornos, secaderos).

FUNCIONES:

- **Favorecer la buena mezcla comburente – combustible.**
  - ***Tiempo de permanencia:*** *Velocidad de circulación.*
    - ✓ *Si la velocidad es alta → aumentan los inquemados*
    - ✓ *Si la velocidad es baja → baja potencia.*
  - Espacio para la llama (***Dimensiones***): *Si la llama toca la pared de producen inquemados y se destruye el refractario.*
  - ***Temperatura*** adecuada para la combustión.
  - ***Forma***:
    - ✓ *Distribución del combustible mediante pulverización.*
    - ✓ *Turbulencia*

- **Evitar perdidas.**

- **Confinar la llama.**

- **Contribuir al intercambio térmico** para el aprovechamiento de la combustión.

5. Cámara de combustión

PARTES

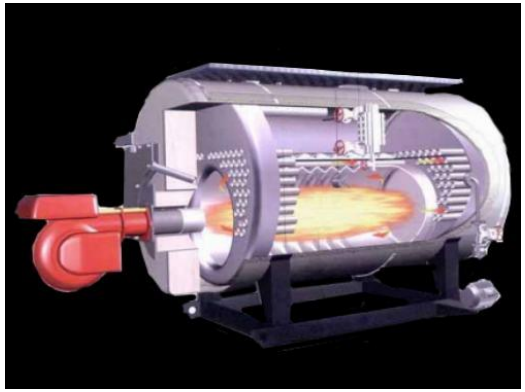
- **Alimentación del aire:**
  - ***Combustibles sólidos*:** Ventilador.
  - ***Combustibles liquidos o gaseosos o pulverizados*:** El propio quemador incorpora sistema de impulsión de aire.
- **Alimentación del combustible:**
  - ***Combustibles sólidos:*** cintas transportadoras o tornillos sin fin.
  - ***Combustibles pulverizados:*** impulsores neumáticos.
  - ***Combustibles liquidos o gaseosos:*** propio quemador (bomba o compresor).
- **Almacenamiento de combustible:** Depositos (liquidos o gases) o silos (solidos)
- **Sustentación del combustible:** Sólo para sólidos. Parrillas o lecho fluidizado.
- **Quemador:** dispositivo para impulsar y quemar combustible y aire. **TOBERAS**
- **Paredes:** Capa interior de refractario y exterior de aislante.
- **Recipiente para cenizas (o cenicero)**
- **Salida de gases**

5. Cámara de combustión

Quemador: mezclar y dirigir el flujo de combustible y de aire de tal manera que se asegure un *encendido rápido y combustión completa*.

•*mezcla previa*: el combustible y el oxidante se mezclan antes del encendido.

•*Quemador directo*: donde el combustible y el oxidante se mezclan en el punto de ignición o encendido.



TIPOS

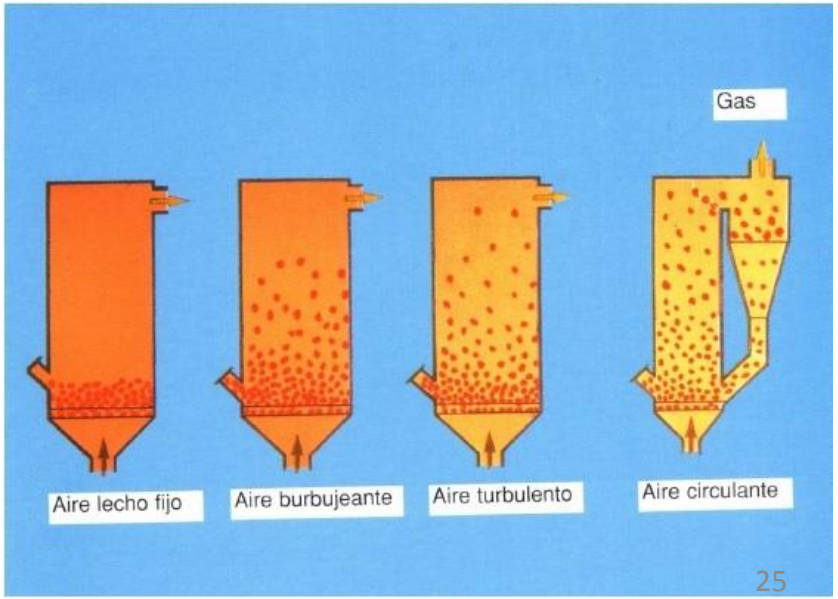
- **Combustible:**
  - *Solido*
  - *Liquido*
  - *Gaseosos*
- **Presión interior:**
  - ***Depresión (-100 a 0 kPa)***
  - ***Ligeramente presurizado (0 a 250 kPa)***
  - ***Sobrepresión (250 a 1500 kPa)***
  - ***Combustión intensiva (> 1500kPa)***
- **Refrigeración**
  - ***Paredes refrigeradas***
  - ***Paredes no refrigeradas.***
- **Situación:**
  - ***Exterior :*** El hogar es independiente del receptor de calor.
  - ***Interior :*** El hogar esta dentro del receptor de calor.
  - ***De combustión sumergida:*** llama se produce en el seno del fluido a calentar.
- **….potencia térmica (kW), densidad térmica (kJ/m^3·h), capacidad (m^3)**

5. Cámara de combustión

COMBUSTIBLES SOLIDOS

- **HOGARES DE PARILLA:** El combust. se deposita sobre una parrilla, que facilita el paso del aire.
  - ✓ **Sencillez de diseño.**
  - ✓ **Gran abundancia de inquemados.**
  - ✓ **Alto exceso de aire.**
  - ✓ **Generación de escorias.**
- **HOGARES DE CARBÓN PULVERIZADO:** El combust. se proyecta en una corriente de aire.
  - ✓ **Mayor rango de combustibles utilizados.**
  - ✓ **Mayor eficiencia (menores inquemados y menor consumo de aire)**
  - ✓ **Mayores potencias generadas por unidad de volumen.**
  - ✓ **Mayor cantidad de cenizas volantes.**
  - ✓ **Mayor gasto en potencia y equipamiemnto de molienda, manipilación e impulsión.**
- **COMBUSTIÓN EN LECHO FLUIDIZADO:** El combust. se sustenta por una corriente de aire.

- ✓ **Alta eficiencia térmica(menor exceso de aire, alta transferencia)**
- ✓ **Diversidad de combustibles .**
- ✓ **Temperatura de combustión menor (900 °C) NOx**
- ✓ **Mejores características medioambientales (capacidad de desulfuración de los gases de combustión)**
- ✓ **Erosión y abrasión**
- ✓ **Necesidad de ciclones, molienda e impulsión.**
- ✓ **Instalación compleja y costosa.**



6. Hornos

Horno: Dispositivo que tiene por objeto la transformación físico-química de un producto, llamado carga, mediante la aplicación de calor.

OBJETIVOS:

- **Realizar un tratamiento térmico de un producto para conseguir un producto final .**
- **Preparar la carga para un tratamiento posterior.**
- **Mejorar la productividad en alguna etapa posterior.**
  - ***Características físicas de la carga:***
    - ✓ *Calor sensible: calentamiento o enfriamiento.*
    - ✓ *Calor latente: Cambio de fase.*
  - ***Características fisico-químicas de la carga:***
    - ✓ *Sin interacción entre carga y fluido calefactor.*
    - ✓ *Con interacción carga – gases de combustión y/o fluido calefactor.*
    - ✓ *Otros procesos: Oxidación, Reducción, Carburación,…..*

TRANSMISIÓN DE CALOR

- **Convección y radiación de los gases de combustión.**
- **Radiación de los propios cerramientos calientes.**
- **Conducción en el propio producto.**
- **Generación interna.**

6. Hornos

PARÁMETROS:

- **Velocidad de calentamiento.** Distribución de temperaturas
  - ✓*Lenta: Permite alcanzar temperatura homogénea en toda la masa.*
  - ✓*Rápida: No hay uniformidad, mayor calentamiento en la superficie (depende del material).*
- **Potencia de calentamiento.** Será necesaria la determinación de:
  - ✓*Cantidad de calor necesaria.*
  - ✓*Transferencia de calor.*
  - ✓*Perdidas de calor.*

Cantidad de calor, temperatura y tiempo necesario para compensar pérdidas.

PARTES

- **Precalentador**: Aprovechar la energía térmica de los gases de escape.
- **Cámara de combustión (hogar).**
- **Solera:** Plataforma donde se coloca el producto que se pretende tratar (material refractario) .
- **Cerramientos:** Carcasa aislante + Boveda.
- **Ventanas de trabajo.**
- **Cimentación, plataforma, estructura metálica, juntas térmicas y chimenea.**

MATERIALES REFRACTARIOS

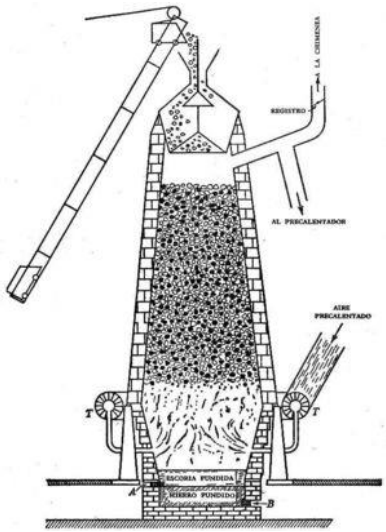
Producto fabricado a partir de una materia prima mineral no metálica cuyo punto de reblandecimiento sea superior a 1500 °C.
Alumina, Silice, Oxidos Fe y Cr,….

CLASIFICACIÓN DE LOS HORNOS

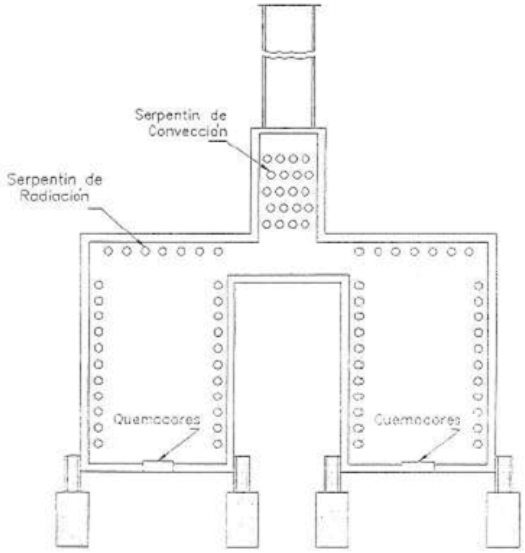
- **Naturaleza de la carga**
  - ✓ *Solida*
  - ✓ *Líquida*
  - ✓ *Gaseosa*
  - ✓ *Mixta*
- **Fuente de energía**
  - ✓ *Combustibles*
  - ✓ *Energía eléctrica*
  - ✓ *Mixta*
- **Geometria**
  - ✓ *Relación altura/anchura*
  - ✓ *Forma del canal*
  - ✓ *Tambor,…*
- **Desarrollo de la combustión**
  - ✓ *Chorro libre*
  - ✓ *Llama refrigerada*
- **Temperatura**
  - ✓ *Baja (<500 °C)*
  - ✓ *Media (500 - 1000 °C)*
  - ✓ *Alta (> 1000°C)*
  - ✓ *Variable (ciclo progamado)*
- **Ciclo de trabajo**
  - ✓ *Continuo*
  - ✓ *Discontinuo*
- **Disposición de la carga**
  - ✓ *Desnuda*
  - ✓ *En contenedores (Abiertos o cerrado)*
  - ✓ *A granel*
- **Movimiento de la carga**
  - ✓ *Estacionaria*
  - ✓ *Movil contra/equicorriente carga-gases.*
  - ✓ *Por gravedad o forzada*
- **Carga del material en el horno**
  - ✓ *Por vertido*
  - ✓ *En vagonetas*
  - ✓ *Sobre rodillos,…*
- **Extracción del material**
  - ✓ *Tirando*
  - ✓ *Empujando*
  - ✓ *Basculando*
  - ✓ *Bombeando*
  - ✓ *Transportadores de cinta*
  - ✓ *Tornillo sin fin, …*
- **Circuitos de gas de salida**
  - ✓ *Sin recuperacióm*
  - ✓ *Con recuperación*
  - ✓ *Con regeneración, …*

6. Hornos

HORNOS VERTICALES O DE CUBA

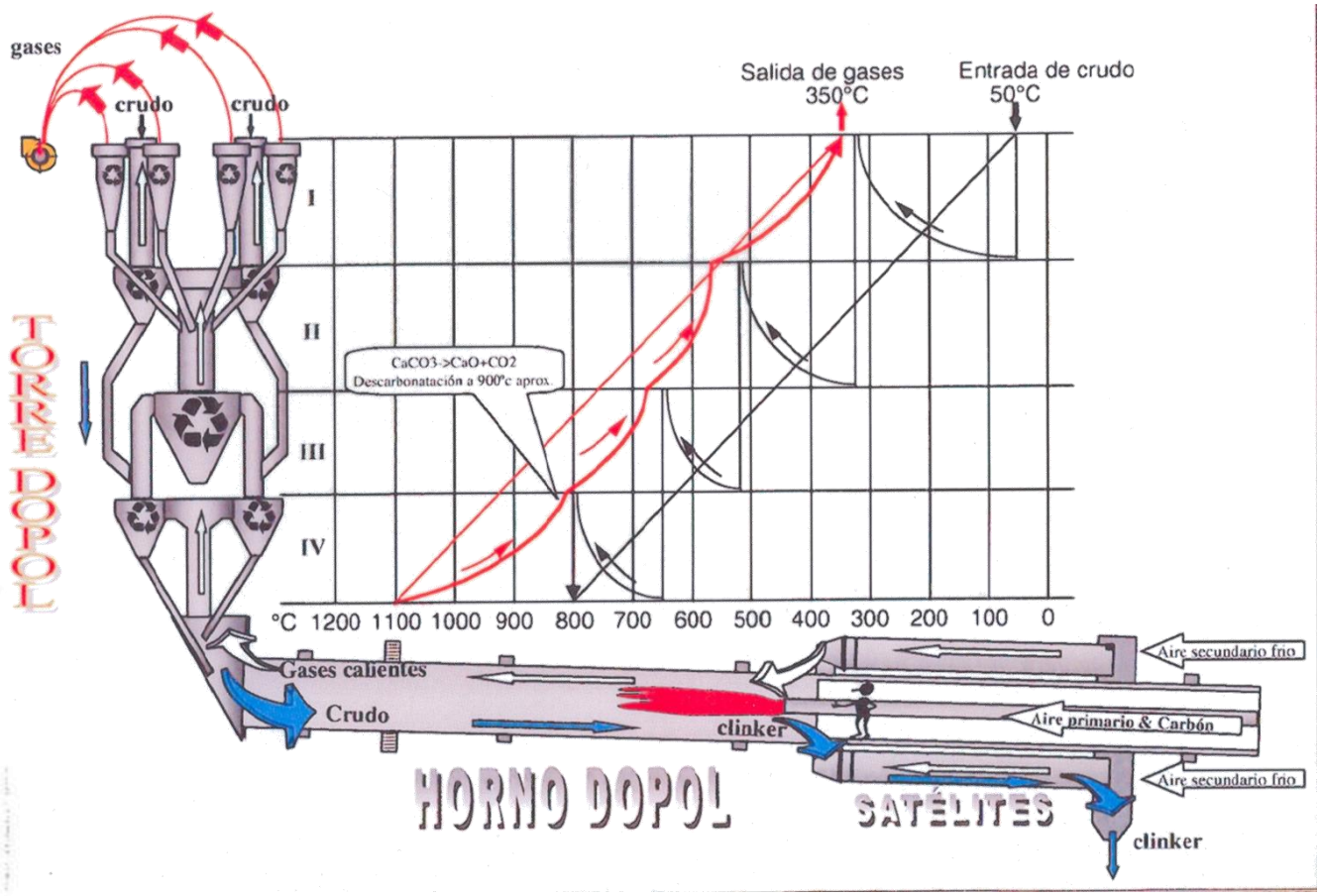


HORNOS HORIZONTALES



b) Rectangular con tubos horizontales de doble celda

HORNOS ROTATORIOS



BALANCE ENERGÉTICO EN UN HORNO

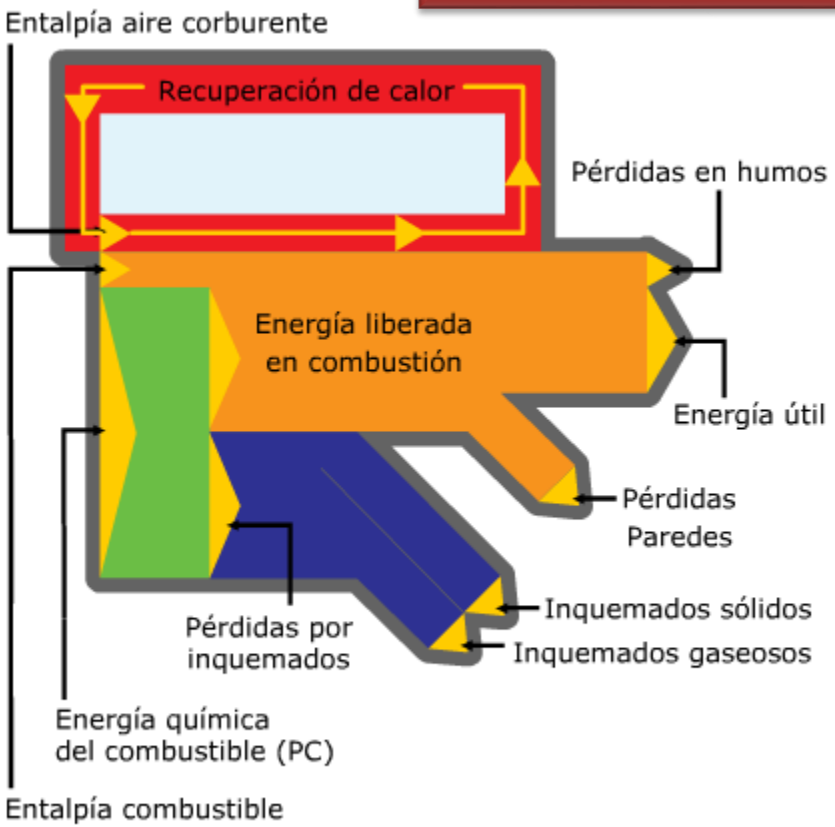


Diagrama de Sankey

MATERIALES REFRACTARIOS

Tipo	Refractario	Base	Temperatura fusión (°C)
	Silicio	Si	1.700
Ácidos	Arcilla	$2SiO_2 \cdot Al_2O_3 \cdot 2H_2O$	1.700
	Silimanita	Al_2SiO_5	1.800
	Alúmina (Bauxita)	Al_2O_3	2.050
	Cromita	$FeCrO_4$	2.000
Básicos	Cal viva	CaO	2.200-2.570
	Magnesia	MgO	2.800
	Dolomita	$CO_3Ca.CO_3Mg$	2.300
	Carbono	C	3.000
Especiales	Carburo de silicio	CSi	2.500
	Circón	SiO_4Zr	2.000
	Badeleyita	ZrO_2	2.400-2.500

Tabla 5.1 Temperaturas de fusión de algunos refractarios

BALANCE ENERGÉTICO EN UN HORNO

$$\dot{H}_f + \dot{H}_a + \dot{H}_{car} = \dot{H}_{pr} + \dot{H}_h + \dot{H}_{inq} + \dot{H}_{cen} + \dot{H}_{fug} + \left|\dot{Q}_{VC}\right| = (\dot{H}_{pr} - \dot{H}_{car}) + (\dot{H}_h - \dot{H}_a) + \dot{H}_{inq} + \dot{H}_{cen} + \dot{H}_{fug} + \left|\dot{Q}_{VC}\right|$$

Energía útil del horno

$$\Delta\dot{H}_u = \dot{H}_{pr} - \dot{H}_{car} = \sum_{pr} \dot{m}_s h_s - \sum_{car} \dot{m}_e h_e \cong \sum_{car} \dot{m}_{car} \cdot \left[c_{p_{car}} \left| \Delta T + h_{fg} + q_{reac} \right. \right]$$

$$\dot{H}_f \cong \sum_{car} \dot{m}_{car} \cdot \left[c_{p_{car}} \left| \Delta T + h_{fg} + q_{reac} \right. \right] + (\dot{H}_h - \dot{H}_a) + \dot{H}_{inq} + \dot{H}_{cen} + \dot{H}_{fug} + \left|\dot{Q}_{VC}\right|$$

Método directo

Rendimiento energético de un horno: cociente entre el incremento de entalpía experimentado por la carga (energía útil) y la energía liberada en la combustión.

$$\eta = \frac{\Delta\dot{H}_u}{\dot{m}_f \cdot PC}$$

$$\nu = \frac{\Delta\dot{H}_u}{\dot{H}_f - \dot{Q}_{rec}} = \frac{\dot{m}_{car} \cdot \left[c_{p_{car}} \left| (T_{c_{mix}} - T_a) + h_{fg} + q_{reac} \right. \right]}{\dot{m}_f \cdot PC - \left(\dot{m}_{pr} \cdot h_{pr} + \Delta\dot{H}_{h,rec} \right)}$$

Método indirecto

Determinación separada de las pérdidas del horno (coincide con el directo si sólo se considera el calor de reacción)

$$p_h = \frac{\dot{m}_h c_{p_h} (T_h - T_a)}{\dot{m}_f PCI}; \quad p_{prod} = \frac{\dot{m}_{pr} h_{sens,pr} - \dot{m}_{car} h_{sens,car}}{\dot{m}_f PCI}$$

$$p_{inq} = \frac{\dot{m}_{inq} h_{inq}}{\dot{m}_f PCI}; \quad p_{cen} = \frac{\dot{m}_{cen} h_{cen}}{\dot{m}_f PCI}$$

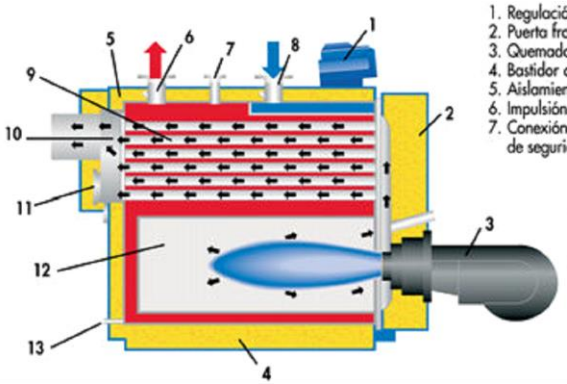
$$p_{fugas} = \frac{\dot{m}_{fug} h_{fug}}{\dot{m}_f PCI}; \quad p_{VC} = \frac{\left|\dot{Q}_{VC}\right|}{\dot{m}_f PCI}$$

$$\eta = 1 - \sum p_i = 1 - (p_h + p_{pr} + p_{inq} + p_{cen} + p_{fug} + p_{VC})$$

7. Calderas y generadores de vapor

CALDERA

Recipiente a presión en el que el calor se transforma en utilizable a través de un medio de transporte en fase liquida o vapor (AGUA o FLUIDOS TÉRMICOS)
Amplio rango de potencias : 10 kW-1500 MW. Aplicac. Industriales y Domesticas.



1. Regulación
2. Puerta frontal de caldera
3. Quemador
4. Bastidor autoportante
5. Aislamiento
6. Impulsión de caldera
7. Conexión para válvula de seguridad
8. Retorno de caldera
9. Superficie intercambio Composit
10. Colector de gas de escape
11. Orificio de limpieza
12. Cámara de combustión
13. Vaciado de la caldera

La sección de la caldera con tecnología Thermostream y con cámara de inversión, muestra la corriente optimizada de los gases de combustión y del agua de la ida y del retorno.

PARTES

- **CÁMARA DE COMBUSTIÓN Y QUEMADOR**
- **INTERCAMBIADOR (carcasa y tubos)**
- **DEPÓSITOS Y CHIMENEA**
- **EQUIPOS COMPLEMENTARIOS (Economizador, precalentador y sobrecalentador)**

Calor adsorbido por la superficie de intercambio
Radiación
Convección

Q (camara de combustión)

Calor residual de los humos

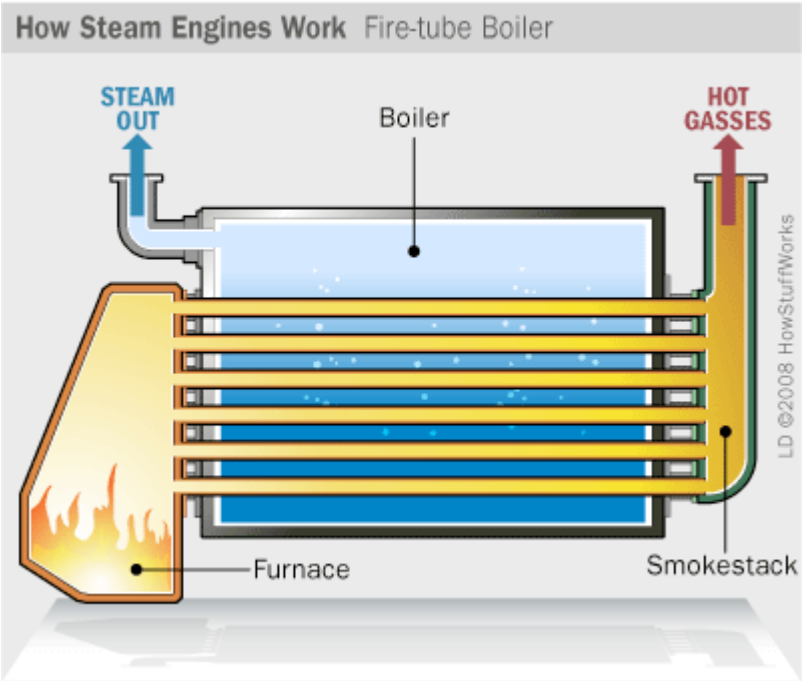
CLASIFICACIÓN

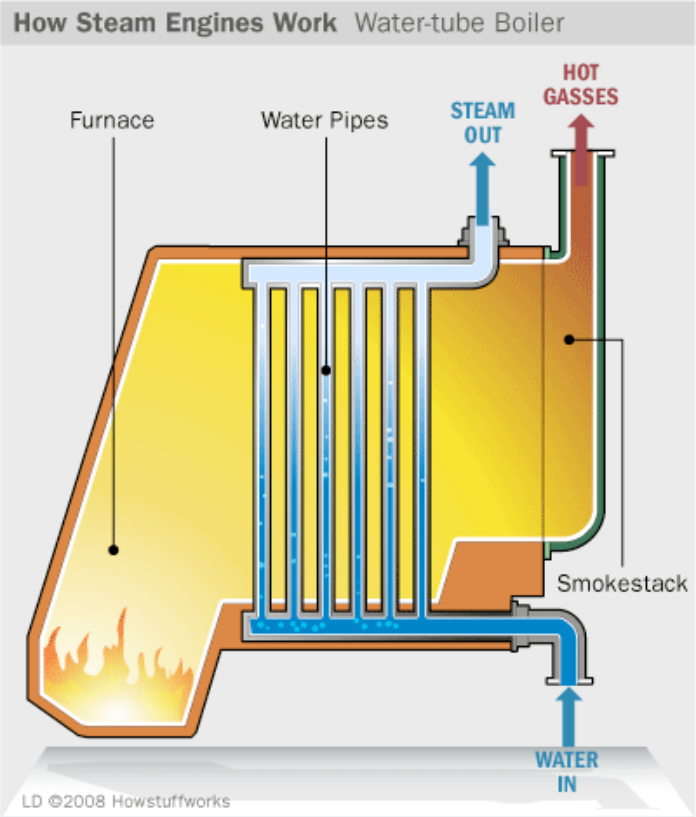
- **Circulación de los fluidos:** *Pirotubulares (humos) o Acuotubulares (agua).*
- **Número de pasos:** *Uno o varios.*
- **Posición de los tubos:** *Horizontales o Verticales*
- **Situación del hogar:** *Interior, Exterior, Delantero o Inferior*
- **Presión del hogar:** *Tiro Natural o Presurizadas*
- **Circulación del agua:** *Natural o Forzadas*
- **Material:** *Fundición, Acero o Especial*
- **Nivel:** *Definido o sin definir.*

7. Calderas y generadores de vapor

Pirotubulares: el fluido en estado líquido se encuentra en un recipiente atravesado por tubos, por los cuales circulan gases a alta temperatura (proceso de combustión)
El agua se evapora al contacto con los tubos calientes productos a la circulación de los gases de escape.

Acuotubulares: son aquellas calderas en las que el agua circula por el tubo interior de los tubos que conforman un circuito cerrado a través del calderín o calderines que constituyen la superficie de intercambio de calor de la caldera.

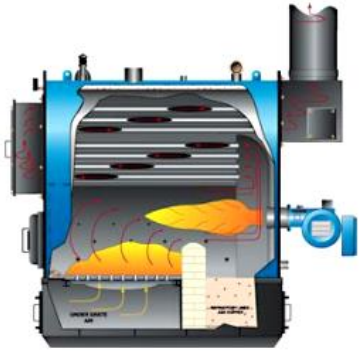


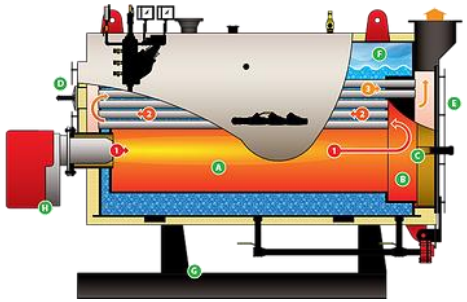


7. Calderas y generadores de vapor

Pirotubulares:

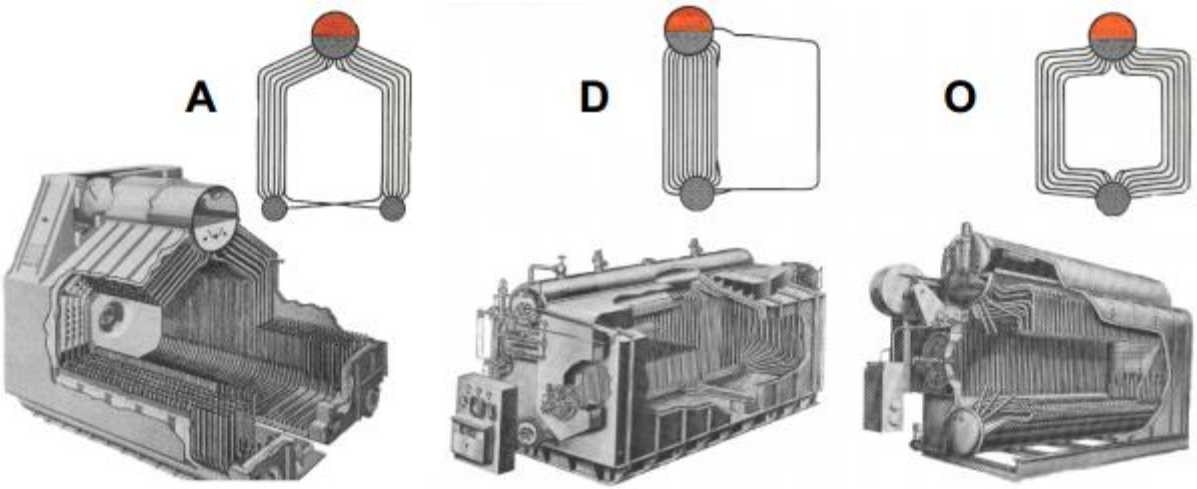
De retorno horizontal





Horno interno

Acuotubulares:



7. Calderas y generadores de vapor

CRITERIOS	CALDERA PIROTUBULAR	CALDERA ACUOTUBULAR
Calidad del agua de alimentación	Menores exigencias y posible funcionamiento con salinidad del agua.	Mayores exigencias, siendo necesario un bajo nivel de salinidad para su funcionamiento.
Mantenimiento	Fácil de limpieza y acceso a todas las partes de la caldera.	Más difícil de limpiar y acceso más complejo a todas las partes de la caldera.
Rendimiento	Mayor rendimiento y coste menor de mantenimiento.	Menor rendimiento y coste mayor de mantenimiento.
Contenido de agua	Mayor	Menor
Presiones	Menor	Mayor
Tiempo de puesta en marcha	Menor	Mayor
USOS	Industria en general (hasta 32 bar)	Generación de vapor para producción eléctrica.

8. Tiro y chimeneas

TIRO **Fenómeno natural que se produce en todas las cámaras de combustión como consecuencia del movimiento ascendente de los gases formados.**

Objetivos: producir la entrada de aire adecuada y evacuar los productos.

- **Tiro Natural**
  - ✓ *Diferencia entre la temperatura ambiente y la de los gases.*
  - ✓ *Altura de la chimenea muy elevada.*
  - ✓ *Puede ser insuficiente.*
- **Tiro Artificial** Provocado por medios macánicos y reducen las temperaturas de los humos y /o la altura de la chimenea.
  - ✓ *Tipo forzado: ventilador impulsa el aire de combustión al interior (sobrepresión)*
  - ✓ *Tipo aspirado: ventilador extractor impulsa los gases hacia la chimenea (depresión)*
  - ✓ *Tipo compensado; Combinación de los anteriores.*
  - ✓ *Tipo inducido: basado en el efecto Venturi empleando una soplante a que trabaje con aire atmosférico o con los propios gases.*

CHIMENEA **Conducto por el que los gases de combustión salen a la atmosfera. Es la unión de la cámara de combustión y la atmosfera. Dilución de los gases en la atmosfera (altura y ubicación)**

Base (hormigón), pedestal y fuste (metálica).
Sección circular (mínima resistencia a la presión del viento, menor fricción y radiación)

Diseño:

- **Sección =** $\frac{Caudal\ volumétrico(\frac{m^3}{s})}{Velocidad\ (\frac{m}{s})}$ Dispersión de los humos→ velocidad >15 m/s.
- **Altura:** tipo de tiro y de contaminante
- **Elementos de impulsión**

8. Tiro y chimeneas

Tabla 6.2 Normativa para la determinación de altura mínima en chimeneas

Tamaño	Disposición legal	Forma de cálculo
Pequeñas $H_0 < 10 \div 15$ m	Orden del Ministerio de Industria de 21/6/1968 (BOE nº 159 del 3/7/1968)	Las bocas de la chimenea estarán situadas por encima de tejados, muros u obstáculos por lo menos a 1 m por encima de tejados, muros u obstáculos existentes en un radio de 10 m
Medianas $15 \div 20$ m $< H_0 < 50 \div 60$m - Instalaciones de combustión de potencia global inferior a 100 MW - Emisiones de hasta 720 kg/h de cualquier gas - Emisiones de hasta 100 kg/h de partículas sólidas	Anexo II de la Orden Ministerial de 18 de Octubre de 1976. Corrección de errores de fórmula anterior (BOE 46 del 23-2-77)	$H_0 = \sqrt{\frac{AQF}{C_M}\sqrt[3]{\frac{n}{V\Delta T}}}$ - A= 70·Io ; Io: índice climatológico. - Q= caudal de contaminante (kg/h) - F=1 (gases); F=2 (partículas) - C_M= contaminación admisible (mg/m3N) - n = número de chimeneas - V = caudal gases en chimenea (m3/h) - ΔT: T_s - temperatura media anua Parámetros y coeficientes tabulados en OM
Grandes $50 \div 60$ m $< H_0 < 360$ m - Instalaciones de combustión de potencia global superior a 100 MW - Emisiones de más de 720 kg/h de cualquier gas - Emisiones de más de 100 kg/h de partículas sólidas	Artículo 10 de Orden Ministerial de 18 de Octubre de 1976	Estudio de dispersión de contaminantes que tenga en cuenta: - Estudio meteorológico de la zona. - Topografía de la misma - Contaminación de fondo existente en ella - Aplicación de modelo físico matemático: o Fórmula de Pasquill-Gifford para el cálculo de la dispersión o Fórmula de Briggs para el cálculo de la sobreelevación del penacho - Determinación de la altura efectiva de la chimenea para que se respeten los niveles de inmisión aplicables.