

Optimización de la COMBUSTIÓN.



Ponente:



Tiempo Real SA

Formación en Control de Procesos



Tiempo Real SA

Optimización de la Combustión.

1. → Proceso de combustión. Reacciones químicas implicadas
 2. → Productos de combustión obtenidos en función de las condiciones
 3. → Rendimiento de la combustión. Factores que influyen
 - 3.1. Optimización del exceso de aire
 - 3.2. Temperatura de los gases de combustión
 4. → Mediciones que podemos hacer en la combustión
 - 4.1. Formas de realizar el análisis de los gases de combustión
 - 4.2. Componentes posibles a medir en los gases de combustión
 5. → Qué medir para optimizar el rendimiento de la combustión
 - 5.1. Oxígeno como índice de control individual
 - 5.2. Combustible total o CO como índice de control individual
 - 5.3. Control basado en combinación de % O₂ y ppm CO
 - 5.3.1. %O₂, ppm CO y carga de la caldera
 - 5.4. Control basado en combinación de % O₂ y % Opacidad
- *Bibliografía*

1. Proceso de combustión. Reacciones químicas implicadas

El proceso químico que tiene lugar...

...**Oxidación** de los componentes del combustible ⇒

⇒ Carbono (C) - Hidrógeno (H)

Se combinan con el oxígeno (O₂) del aire

...Si el combustible tiene **azufre**, su combustión proporciona óxidos de azufre ⇒ producen productos corrosivos si se permite que se condense el agua de los humos y los óxidos de azufre se disuelven en ella

...**Nitrógeno** y componentes no combustibles del fuel pasan sin sufrir ninguna modificación...

...pero una mínima cantidad de nitrógeno se combina con el oxígeno y da óxidos nitrosos (NO_x)

© 2010 Tiempo Real, S.A.

Reacciones químicas comunes en la combustión con su energía liberada:

Combustible	Reacción	Calor de combustión (Poder Calorífico Superior)
Carbón a CO	$2C + O_2 \rightarrow 2CO$	2.222 kcal/kg
Carbón a CO ₂	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	7.833 kcal/kg
Monóxido de carbono	$2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2$	2.414 kcal/kg
Hidrógeno	$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$	33.945 kcal/kg
Azufre a SO ₂	$S + O_2 \rightarrow SO_2$	2.211 kcal/kg
Metano	$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$	13.264 kcal/kg
Acetileno	$2C_2H_2 + 5O_2 \rightarrow 4CO_2 + 2H_2O$	11.945 kcal/kg
Etileno	$C_2H_4 + 3O_2 \rightarrow 2CO_2 + 2H_2O$	12.020 kcal/kg
Etano	$2C_2H_6 + 7O_2 \rightarrow 4CO_2 + 6H_2O$	12.403 kcal/kg
Sulfuro de hidrógeno	$2H_2S + 3O_2 \rightarrow 2SO_2 + 2H_2O$	3.944 kcal/kg

Como el calor latente de vaporización del agua no es útil en un proceso de combustión se le asignan al combustible dos valores de calor de combustión

HHV (Higher Heating Value) \Rightarrow Poder calorífico superior (PCS)
En los productos de la combustión el agua se extrae como líquido

LHV (Lower Heating Value) \Rightarrow Poder calorífico inferior (PCI)
En los productos de la combustión el agua se extrae como vapor

Requisitos para la combustión:

- Combustible **gasificado**

Combustible gaseoso

Combustible líquido \Rightarrow El fuel-oil debe ser atomizado para que la temperatura presente lo convierta en gas

Requisitos para la combustión:

- **Aire de combustión** suficiente pero no excesivo

...Que produzcan una mezcla dentro del rango de **inflamabilidad**

Límites de inflamabilidad

	Porcentaje del aire estequiométrico	
	Mínimo	Máximo
Gas natural	64%	247%
Fuel-oil	30%	173%
Carbón pulverizado	8%	425%

© 2010 Tiempo Real, S.A.

Requisitos para la combustión:

- **Aire de combustión** suficiente pero no excesivo

...Que produzcan una mezcla dentro del rango de **inflamabilidad**

...Que la temperatura esté por encima del **punto de ignición**

Temperaturas de ignición de combustibles

Queroseno	260°C
Gasolina	390°C
Fuel-oil pesado	407°C
Carbón	455°C
Propano	857°C
Gas natural	538°C
Hidrógeno	590°C

© 2010 Tiempo Real, S.A.

Requisitos para la combustión:

- **Aire de combustión** suficiente pero no excesivo

...Que produzcan una mezcla dentro del rango de **inflamabilidad**

...Que la temperatura esté por encima del **punto de ignición**

...Las tres T de la combustión \Rightarrow **Tiempo, temperatura y turbulencia**

Corto periodo de tiempo

Alta temperatura

Llama muy turbulenta

Indican una rápida combustión

La **turbulencia** es muy importante \Rightarrow El combustible y el aire tienen que estar perfectamente mezclados para que la combustión sea completa...

...Si combustible y aire están bien mezclados y todo el combustible se quema:

\Rightarrow la temperatura de llama será alta

\Rightarrow el tiempo de combustión corto

...Si el combustible y el aire no están bien mezclados, no puede ocurrir una combustión completa:

\Rightarrow la temperatura de llama será menor

\Rightarrow el combustible tardará más tiempo en quemarse

Esta alternativa produce menos óxidos de nitrógeno (**NO_x**)

A veces se retrasa la combustión para lograr este objetivo

2. Productos de combustión obtenidos en función de las condiciones

Figura 2.1 ⇒ Composición del gas de combustión en función de la cantidad de aire presente

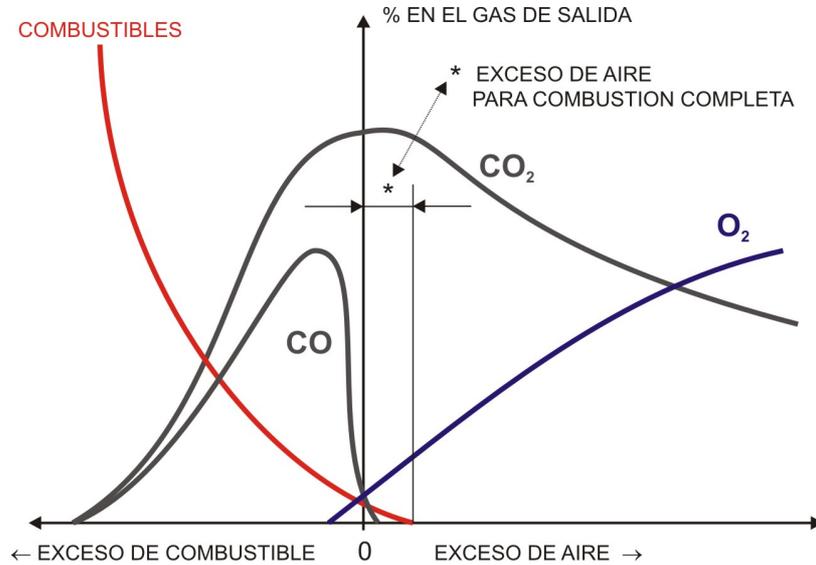


FIGURA 2.1. COMPONENTES MAYORITARIOS EN LOS GASES DE SALIDA.
Cortesía de Liptak, ref. <2>.

© 2010 Tiempo Real, S.A.

* Con exceso de aire (**exceso de oxígeno**) los gases en exceso (N_2 y O_2) hacen que disminuya la temperatura de salida.

Consecuentemente el rendimiento baja.

(Figura 2.2.a)

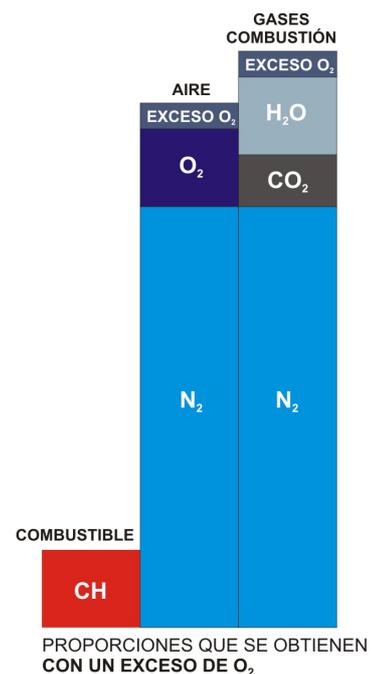


FIGURA 2.2. COMPOSICIÓN DE LOS GASES DE SALIDA EN FUNCIÓN DEL EXCESO DE O_2 .

* Con defecto de aire (**defecto de oxígeno**), queda combustible sin quemar y se derrocha. Se obtienen inquemados en los gases de combustión. Combustión insegura (**Figura 2.2.b**)

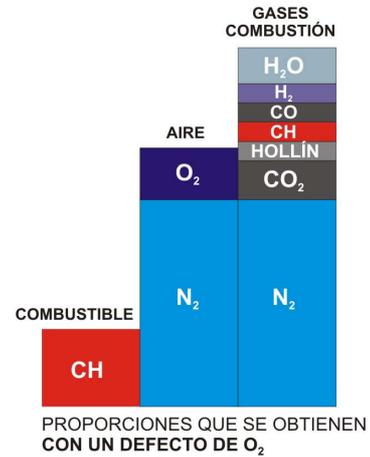


FIGURA 2.2. COMPOSICIÓN DE LOS GASES DE SALIDA EN FUNCIÓN DEL EXCESO DE O₂.

© 2010 Tiempo Real, S.A.

* **Relación estequiométrica** justa. Con el oxígeno justo:

- Tendría que dar: (**Figura 2.2.c**)

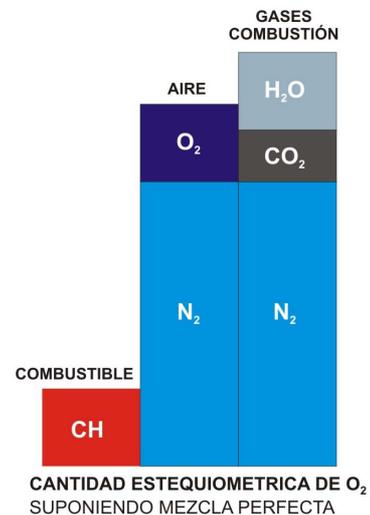
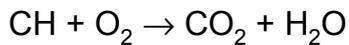
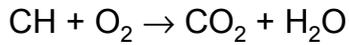


FIGURA 2.2. COMPOSICIÓN DE LOS GASES DE SALIDA EN FUNCIÓN DEL EXCESO DE O₂.

© 2010 Tiempo Real, S.A.

* **Relación estequiométrica** justa. Con el oxígeno justo:

- Tendría que dar: (**Figura 2.2.c**)



- Pero, debido a que la mezcla no es perfecta, realmente da:

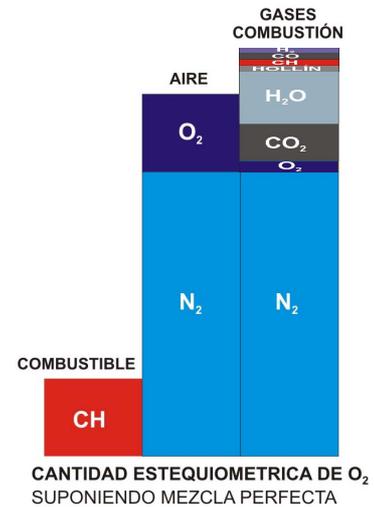
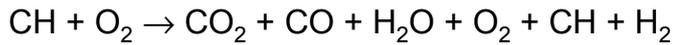


FIGURA 2.2. COMPOSICIÓN DE LOS GASES DE SALIDA EN FUNCIÓN DEL EXCESO DE O₂.

© 2010 Tiempo Real, S.A.

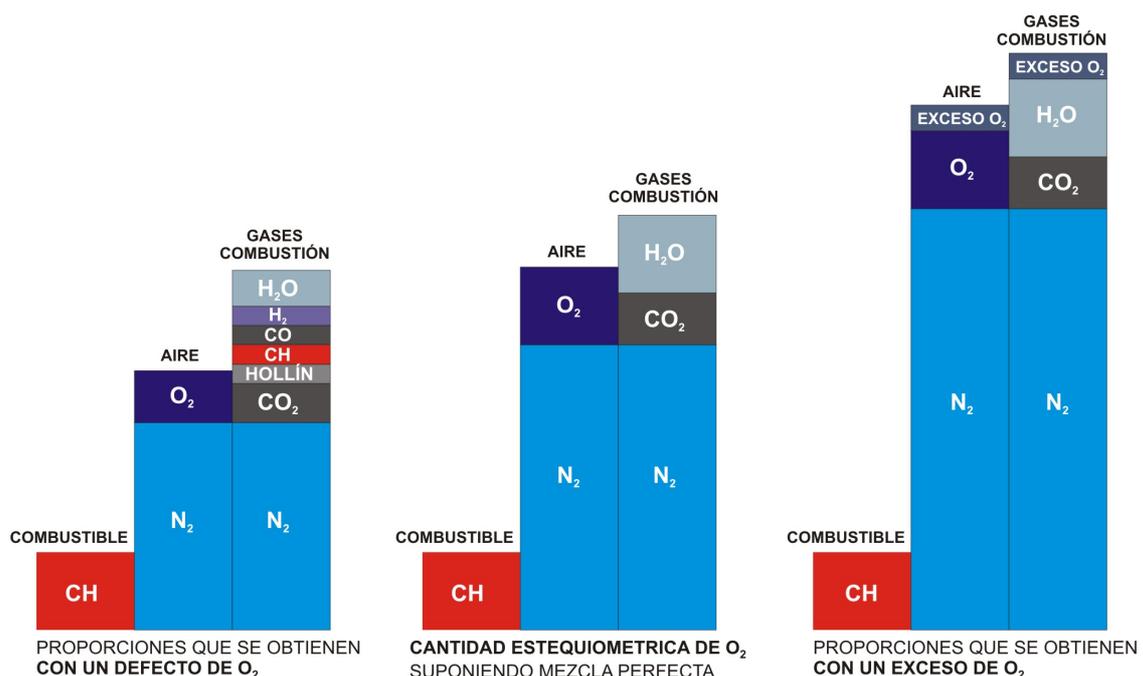


FIGURA 2.2. COMPOSICIÓN DE LOS GASES DE SALIDA EN FUNCIÓN DEL EXCESO DE O₂.

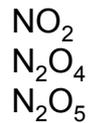
© 2010 Tiempo Real, S.A.

También se producen **óxidos de nitrógeno**

A altas temperaturas ($>1650^{\circ}\text{C}$) las moléculas de O_2 y N_2 se disocian y se forman átomos libres que reaccionan entre si:



NO_x representa una mezcla de NO



La formación de NO_x está potenciada por...

...temperatura y presión elevadas

El aire utilizado para la combustión es, básicamente, una mezcla de oxígeno y nitrógeno \Rightarrow Las razones en peso son...

...0,2315 para el oxígeno

...0,7685 para el nitrógeno

Para suministrar **1 kg de oxígeno** para la combustión...

...es necesario aportar $1/0,2315 = \mathbf{4,32 \text{ kg de aire}}$

...en esta cantidad habrá $4,32 \text{ kg} \cdot 0,7685 = 3,32 \text{ kg}$ de nitrógeno que no interviene directamente en la combustión pero que siempre está presente

Cuando quemamos carbono para proporcionar dióxido de carbono...

...12 partes en peso de carbono

...combinan con 32 partes en peso de oxígeno

...para formar 44 partes en peso de dióxido de carbono

La **cantidad teórica de aire** requerido para la combustión de una unidad en peso de combustible se puede calcular de la siguiente forma:

$$11,3 \cdot C + 34,34 \cdot \left(H - \frac{O}{8} \right) + 4,29 \cdot S$$

C, H y S \Rightarrow Tanto por uno en peso de los elementos carbono, hidrógeno y azufre en el combustible

O/8 \Rightarrow Corrección para el hidrógeno, que ya está combinado en la forma de agua en el combustible

© 2010 Tiempo Real, S.A.

Aire teórico \Rightarrow Cantidad de aire requerida para quemar el combustible en base a la anterior ecuación

Exceso de aire \Rightarrow Porcentaje de aire por encima de la cantidad anterior

Composición de los gases de combustión en función del porcentaje de exceso de aire...

Figura 2.3 ⇒ Para gas natural

Figura 2.4 ⇒ Para fuel-oil

Figura 2.5 ⇒ Para carbón

...Las curvas de % O₂ frente a % de exceso de aire son muy similares para todos los combustibles

...Las curvas % CO₂ frente a exceso de aire dependen mucho del tipo de combustible

© 2010 Tiempo Real, S.A.

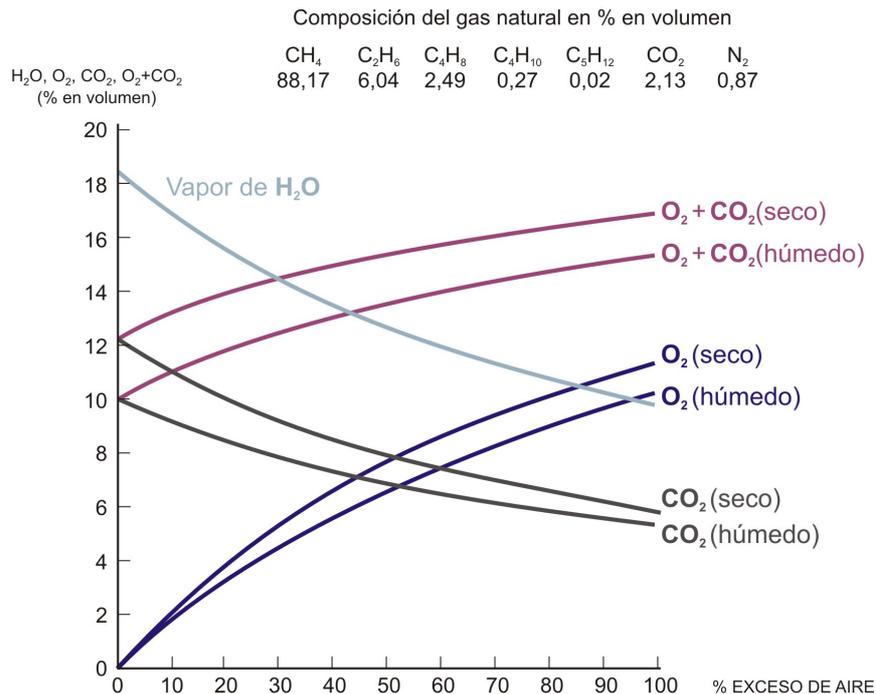


FIGURA 2.3. COMPOSICIÓN DEL GAS DE SALIDA EN FUNCIÓN DEL EXCESO DE AIRE PARA GAS NATURAL.
Cortesía de Dukelow, ref. <1>.

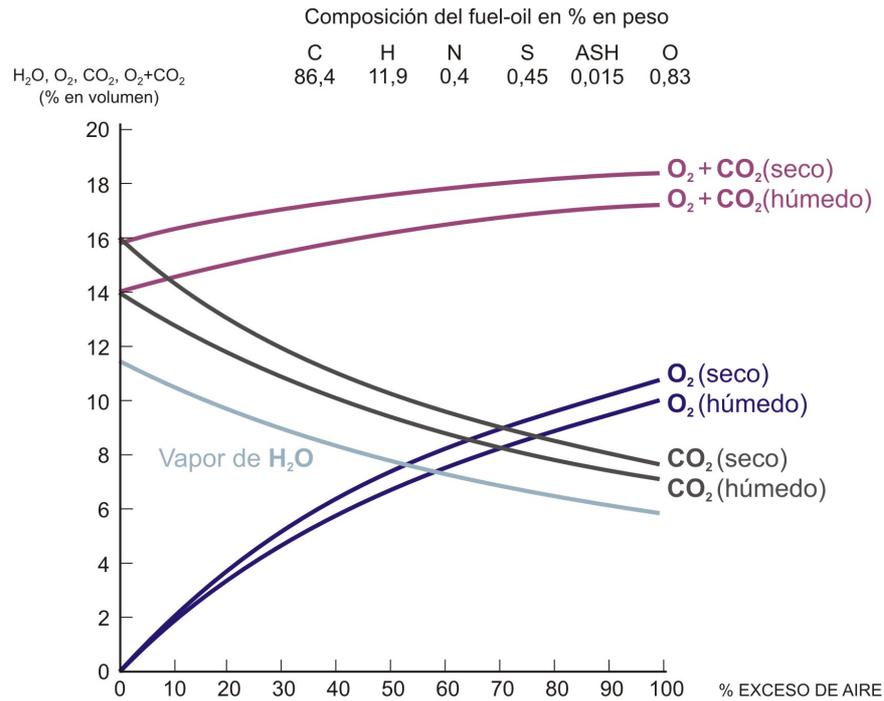


FIGURA 2.4. COMPOSICIÓN DEL GAS DE SALIDA EN FUNCIÓN DEL EXCESO DE AIRE PARA FUEL-OIL.
Cortesía de Dukelow, ref. <1>.

© 2010 Tiempo Real, S.A.

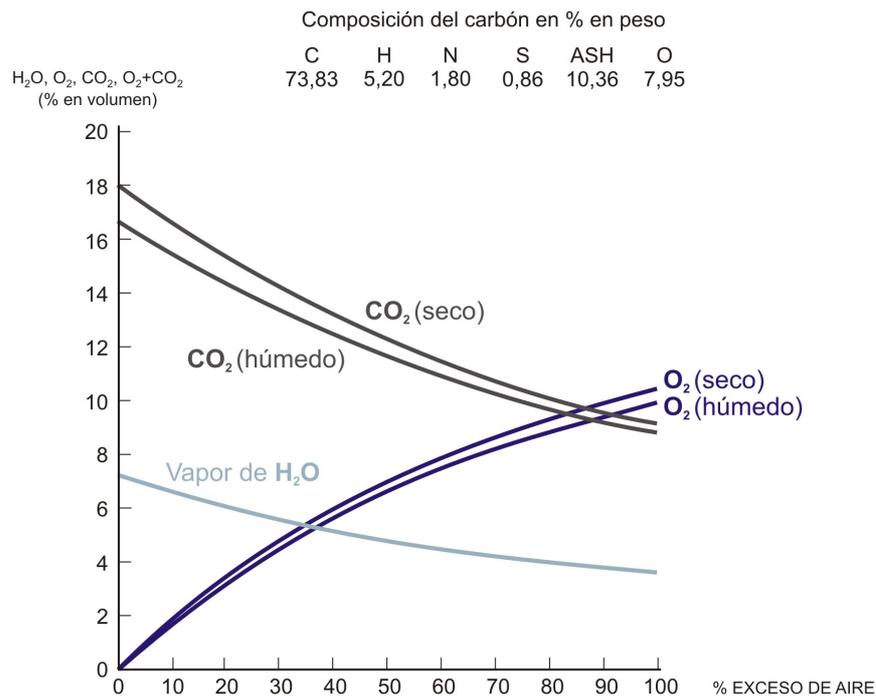


FIGURA 2.5. COMPOSICIÓN DEL GAS DE SALIDA EN FUNCIÓN DEL EXCESO DE AIRE PARA CARBÓN.
Cortesía de Dukelow, ref. <1>.

© 2010 Tiempo Real, S.A.

Si medimos el porcentaje de oxígeno en los gases de combustión y no tenemos tablas ni curvas, podemos utilizar la siguiente fórmula empírica para calcular el **exceso de aire**:

$$\text{Exceso aire (\%)} = K \cdot \left(\frac{21}{21 - \% O_2} - 1 \right) \cdot 100$$

% O₂ en base seca

K = 0,9 para gas

K = 0,94 para fuel-oil

K = 0,97 para carbón

© 2010 Tiempo Real, S.A.

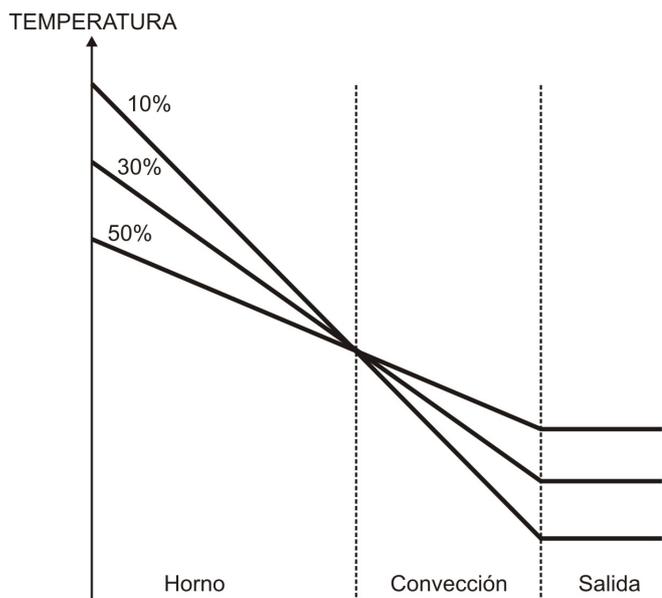


Figura 2.6 ⇒ Si aumentamos el porcentaje de exceso de aire...

- ...la temperatura de llama se reduce
- ...la velocidad de transferencia de calor en la caldera se reduce
- ...por lo que la temperatura de salida de los gases aumenta

La reducción del exceso de aire:

- mejora la transferencia de calor.
- reduce el caudal másico de los gases de salida

FIGURA 2.6. EFECTO DEL EXCESO DE AIRE SOBRE LA TEMPERATURA.
Cortesía de Dukelow, ref. <1>.

Las **pérdidas de calor** en los gases de combustión dependen de...

- ...temperatura de los gases de combustión
- ...temperatura del aire de combustión
- ...cantidad de exceso de aire
- ...composición del combustible

Hay un óptimo de exceso de aire...

- ...menos aire significaría combustible inquemado
- ...más aire significaría combustión completa pero más pérdidas de calor en los gases de combustión debido al mayor caudal de estos gases

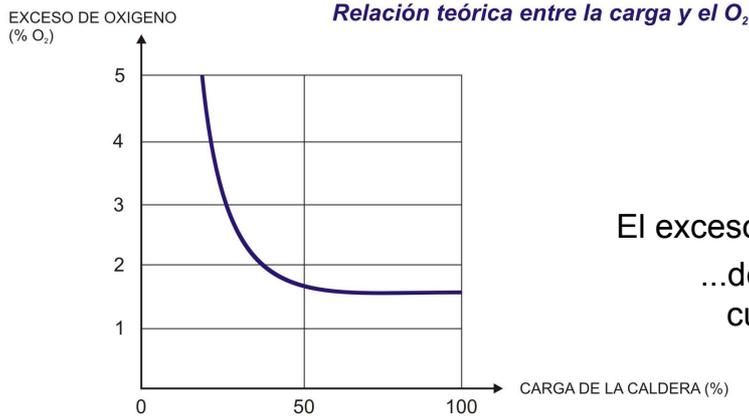
La cantidad de exceso de aire requerida depende de...

- ...el tipo de combustible
- ...diseño del quemador
- ...características del combustible y preparación
- ...diseño del horno
- ...carga como porcentaje de la carga máxima
- ...la velocidad de infiltración de aire
- ...las condiciones ambientales
- ...otros factores menores

Para determinarlo hay que probar con la unidad específica

Excesos de oxígeno y de aire para diferentes combustibles a carga máxima

Combustible	%O ₂ en los gases de combustión	% mínimo de exceso de aire
Gas natural	0,6 a 3	3 - 15
Fuel-oil	1,5 a 3	7 - 15
Carbón	4,0 a 6,5	25 - 40

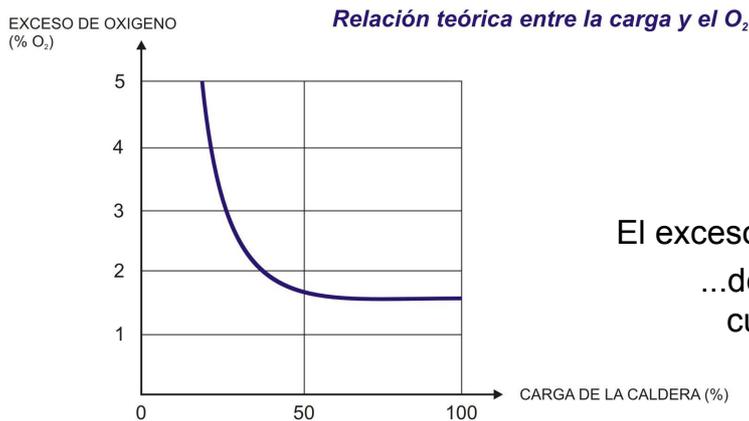


El exceso de oxígeno...
...debe ser aumentado
cuando la carga disminuye

A **bajas cargas...**

- ...las velocidades en el quemador disminuyen
- ...con lo que la circulación de gases se reduce
- ...mientras que el volumen de la caldera se mantiene constante

Todo esto ⇒ Reduce turbulencias y disminuye la eficacia en la mezcla aire-combustible



El exceso de oxígeno...
...debe ser aumentado
cuando la carga disminuye

Esta pérdida en la eficiencia de la mezcla se compensa...

...con un mayor porcentaje de exceso de oxígeno a cargas bajas

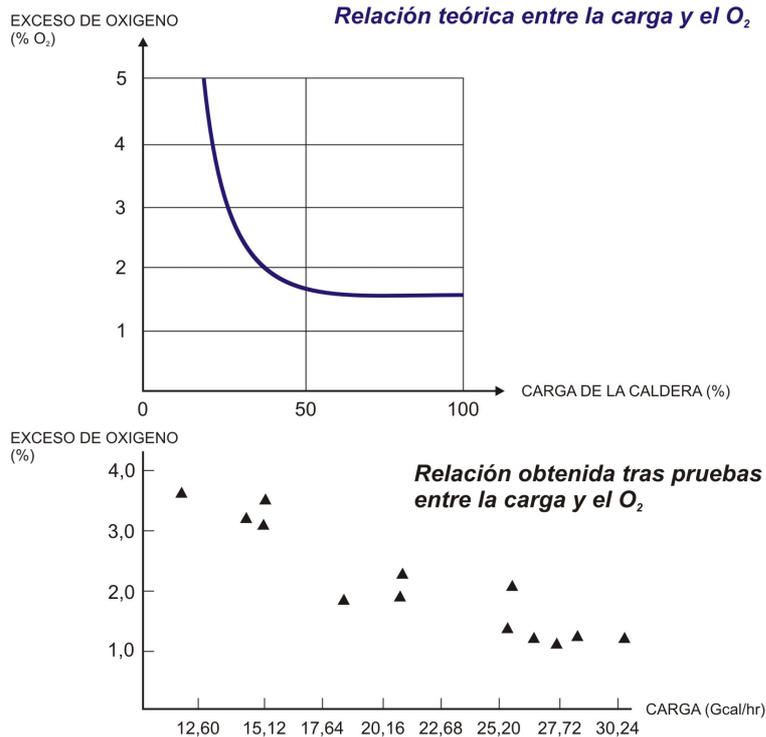


FIGURA 2.7. RELACIÓN ENTRE LA CARGA DE LA CALDERA Y EL EXCESO DE OXÍGENO (O₂).
Cortesía de Liptak, ref. <2>.

© 2010 Tiempo Real, S.A.

3. Rendimiento de la combustión. Factores que influyen

Rendimiento de una caldera ⇒ Razón entre el calor transferido al fluido de trabajo o proceso deseado y el contenido energético del fuel

El rendimiento puede variar con...

- ...el diseño individual de la caldera
- ...la carga de la caldera
- ...el exceso de aire
- ...la temperatura del gas de combustión
- ...el mantenimiento de la caldera

Una **pérdida del 1% en el rendimiento** puede provenir de...

- ...un **aumento del 2% en el exceso de oxígeno**
- ...un **incremento de 23°C en la temperatura del gas de combustión**

El rendimiento total de la caldera está compuesto de dos términos...

...Rendimiento de combustión \Rightarrow La parte de la energía total que está disponible en la cámara de combustión tras el proceso de combustión

...Rendimiento del horno \Rightarrow Depende del diseño del horno y su funcionamiento

Describe la parte de la energía de combustión que finalmente puede aplicarse al proceso de interés

Las ecuaciones de cálculo de rendimiento en la caldera pueden considerar hasta 7 fuentes de pérdidas de calor y requerir hasta 44 datos de entrada.

Si omitimos los factores de menor importancia, el **rendimiento** se puede calcular:

© 2010 Tiempo Real, S.A.

$$\text{Rendimiento} = 100 \cdot \left[1 - \left[10^{-3} \cdot \left(0,22 + \frac{K \cdot y}{1 - \frac{y}{0,21}} \right) \cdot (T_h - T_a) - \frac{\Delta H_C}{H_C} \right] \right]$$

$y \Rightarrow$ Fracción molar de oxígeno en el gas de combustión

$K \Rightarrow$ Coeficiente asignado a cada combustible

1,01 para carbón

1,03 para fuel-oil

1,07 para gas natural

$\Delta H_C / H_C \Rightarrow$ Función del combustible

0,02 para carbón

0,05 para fuel-oil

0,09 para gas natural

$T_h \Rightarrow$ Temperatura en la chimenea

$T_a \Rightarrow$ Temperatura ambiente (temperatura del aire de combustión)

$$\text{Rendimiento} = 100 - q_A - q_l - \text{Radiación y convección}$$

q_A : Pérdidas por calor sensible de humos

q_l : Pérdidas por inquemados

$$q_A = K_1 \cdot \frac{T_h - T_a}{CO_2}$$

$$q_l = K_2 \cdot \frac{CO}{CO + CO_2}$$

K_1 : Factor específico del combustible

K_2 : Factor del combustible (por ejemplo, Butano: 75, Propano: 84)

T_h : Temperatura de humos

T_a : Temperatura ambiente (del aire de combustión)

© 2010 Tiempo Real, S.A.

El **hidrógeno** que tiene el combustible forma H_2O que abandona la caldera en forma de **vapor sobrecalentado**

El calor latente de este vapor es una energía perdida...

...9 a 10% para gas natural (por su mayor porcentaje de hidrógeno)

...5 a 6% para fuel-oil

...3 a 4% para carbón

Junto con el hidrógeno, el % de humedad del combustible afecta a estas pérdidas

3.1. Optimización del exceso de aire

Figura 3.1 ⇒ Pérdidas en la caldera en función del exceso de aire

Para un combustible fijo
Para una carga fija

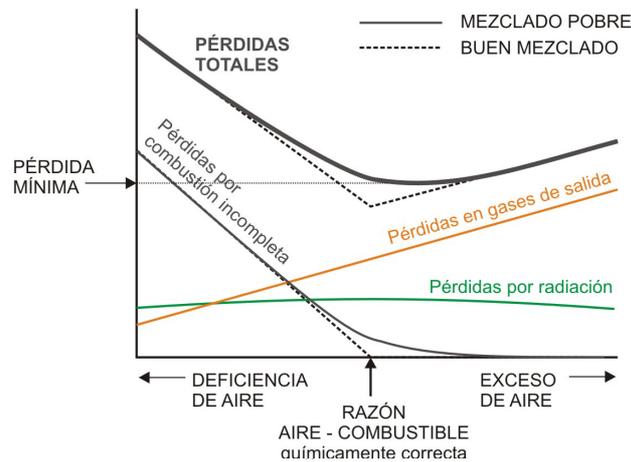


FIGURA 3.1. PÉRDIDAS EN LA CALDERA EN FUNCIÓN DEL EXCESO DE AIRE.
Cortesía de Liptak, ref. <2>.

© 2010 Tiempo Real, S.A.

Pérdidas por radiación y a través de la pared ⇒ Son prácticamente constantes

Las mayores pérdidas son a través de la chimenea...

...Con **defecto de aire** ⇒ salen combustibles inquemados

...Con **mucho exceso de aire** ⇒ El exceso de oxígeno y el nitrógeno que lo acompaña son calentados

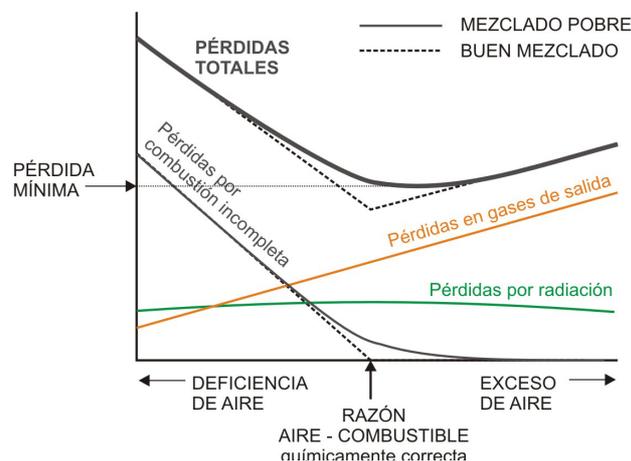


FIGURA 3.1. PÉRDIDAS EN LA CALDERA EN FUNCIÓN DEL EXCESO DE AIRE.
Cortesía de Liptak, ref. <2>.

© 2010 Tiempo Real, S.A.

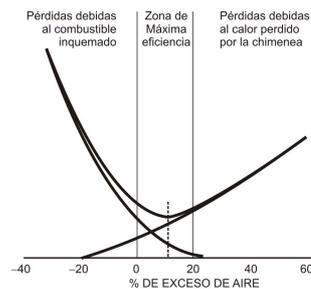


FIGURA 3.1. PÉRDIDAS EN LA CALDERA EN FUNCIÓN DEL EXCESO DE AIRE.
Cortesía de Liptak, ref. <2>.

La suma de todas las pérdidas proporciona una curva con un punto mínimo...
...con esa curva es gran candidato a la optimización

Si **optimizamos manualmente** \Rightarrow El ajuste manual de la caldera determinará el punto de pérdidas mínimas y modificará las condiciones para trabajar en ese punto

Si **optimizamos automáticamente** \Rightarrow El sistema de control operará determinando continuamente el punto de pérdidas mínimas a una carga específica y modificando las condiciones para trabajar en ese punto

© 2010 Tiempo Real, S.A.

Para llevar las pérdidas al mínimo, hay que...

...**Minimizar el exceso de aire**

...**Minimizar la temperatura de los gases de combustión**

El punto de pérdidas mínimas o máximo rendimiento se encuentra...

...Disminuyendo el exceso de oxígeno lo máximo posible

...Hasta que las lecturas de **CO** u **opacidad** indican que el mínimo se ha alcanzado

El **rendimiento de la combustión** \Rightarrow Ligado al exceso de oxígeno

Éste se lleva a su mínimo posible pero sin sobrepasar los límites que nos fija la reglamentación para los compuestos de los gases de combustión

3.2. Temperatura de los gases de combustión

La **cantidad de energía** que se pierde a través de la chimenea es función de:

- La cantidad de exceso de aire
- La temperatura de salida de los gases

La **temperatura** de salida es consecuencia de:

- La carga
- La infiltración de aire
- El estado de las superficies de transferencia de calor

Cuando se arranca y optimiza la caldera se realiza una tabla donde representamos la temperatura de salida de gases frente a la carga

Esto sirve como línea de base para evaluar funcionamientos posteriores

- ⇒ Si la temperatura sube por encima de esta línea de base, indica pérdida en rendimiento

Cada 23°C de incremento el rendimiento baja un 1%

Razones por las que puede aumentar la temperatura de salida...

- ...Ensuciamiento de las superficies de transferencia de calor en el precalentador de aire
- ...Recubrimiento progresivo de óxido en el interior de los tubos de la caldera
- ...Recubrimiento progresivo de hollín en el exterior de los tubos de la caldera
- ...Baffles deteriorados que ocasionan que los gases no realicen el recorrido previsto

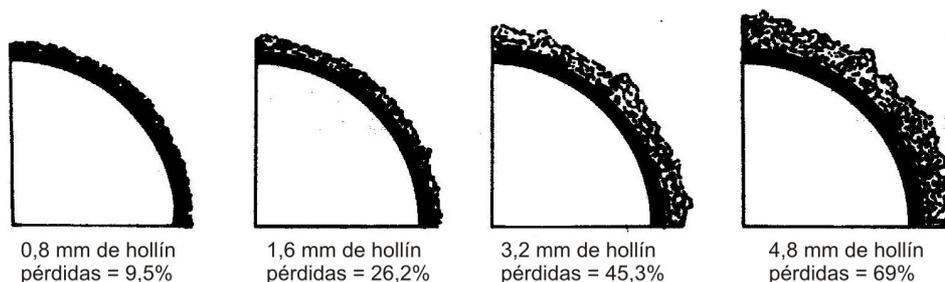


FIGURA 3.2. EFECTO DE LA DEPOSICIÓN DE HOLLÍN EN LOS TUBOS. *Cortesía de Dukelow, ref. <1>*.

Si la temperatura de la chimenea cae por debajo de la línea de temperatura de referencia, esto no significa un incremento en el rendimiento de la caldera...

...Puede significar una pérdida de calor debido a una fuga...

...en el precalentador de agua \Rightarrow agua fría se introduce en la chimenea

...en el precalentador de aire \Rightarrow aire frío se introduce en la chimenea

© 2010 Tiempo Real, S.A.

Punto de rocío de los gases de combustión...

...Temperatura a la que empezará a aparecer agua condensada

Es función del contenido de humedad del gas de combustión

En la **figura 3.3** tenemos la relación entre...

...El contenido de humedad en %

...El punto de rocío en °C

CONTENIDO DE HUMEDAD EN %

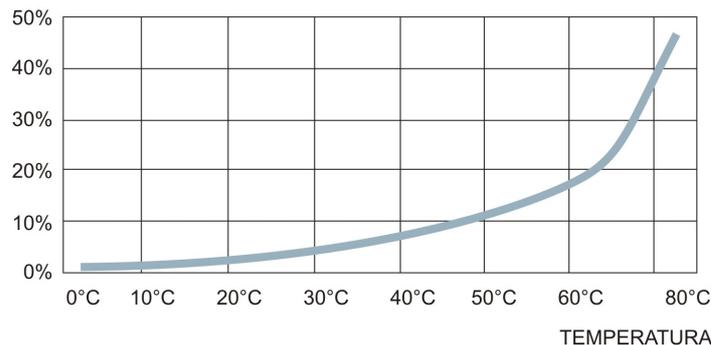


FIGURA 3.3. CONTENIDO DE HUMEDAD EN EL AIRE EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA DEL PUNTO DE ROCÍO (1013 mbar).
Cortesía de testo, ref. <5>.

4. Mediciones que podemos hacer en la combustión

Análisis que se pueden realizar:

% O₂ ⇒ El exceso de aire de combustión es función del % O₂ en los gases de combustión

CO o **Combustible Total** en rango de ppm ⇒ Medida de gases inquemados

% CO₂ ⇒ Cuando el aire de combustión total es mayor del 100% del requerido teóricamente, el aire de exceso es función del % CO₂

% Opacidad ⇒ Debido a la reglamentación, esta medida se puede emplear como limitante de acciones de control realizadas con otras medidas

© 2010 Tiempo Real, S.A.

La reglamentación también nos fija unos máximos de:

Óxidos de azufre

Óxidos de nitrógeno

Podemos medir otros componentes en aplicaciones específicas:

Ácido sulfhídrico (H₂S)

Ácido cianhídrico (HCN)

Compuestos halogenados (HCl y HF)

4.1. Formas de realizar el análisis de los gases de combustión

Análisis en **base seca** ⇒ Extraemos la muestra y la enfiamos por debajo del punto de rocío. Consideramos que el gas analizado no contiene agua, es "seco"

Análisis en **base húmeda** ⇒ El análisis se hace por encima del punto de rocío sobre un gas que contiene todo el vapor de agua que sale de la combustión

En la tabla siguiente comparamos el resultado para diferentes muestras medidas en base seca o en base húmeda y en la **figura 4.1** lo hacemos gráficamente

	Nitrógeno	CO ₂	SO ₂	Agua	Oxígeno
Aire estequiométrico/base seca	83,6	16,1	0,20	0	0
Aire estequiométrico/base húmeda	74,7	14,4	0,18	10,7	0
25% exceso aire/base seca	82,8	12,7	0,15	0	4,4
25% exceso aire/base húmeda	75,6	11,6	0,14	8,7	4

© 2010 Tiempo Real, S.A.

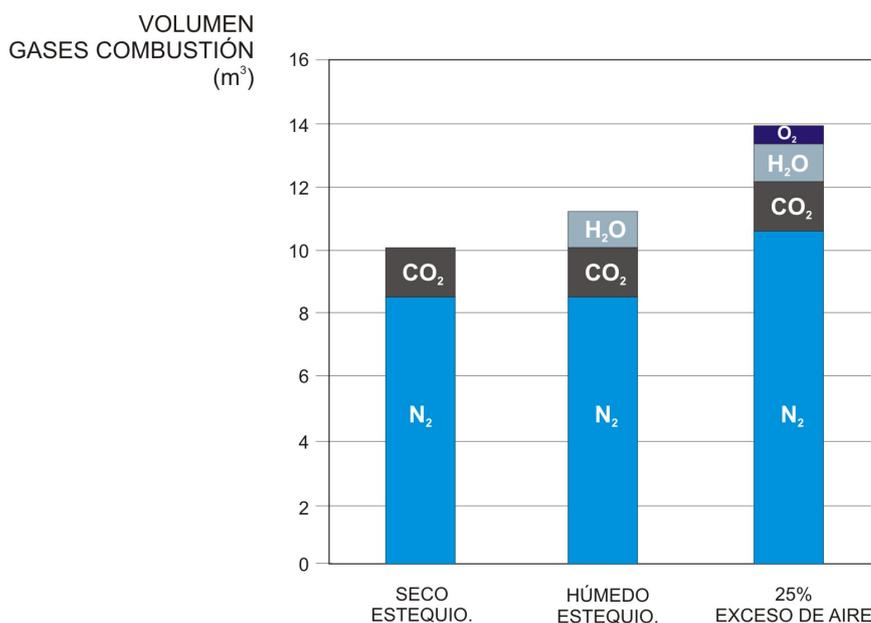


FIGURA 4.1. EFECTO DILUCIÓN DE GASES DE COMBUSTIÓN A TRAVÉS DE HUMEDAD Y EXCESO DE AIRE.
Cortesía de testo, ref. <5>.

Los valores de concentración hay que expresarlos con relación a un valor de referencia...

...Con relación a un cierto valor de dilución a través del exceso de aire

"Valor de referencia 3% de oxígeno"

$$C_{CORREGIDA} = C_{MEDIDA} \cdot \frac{21 - O_{2ref.}}{21 - O_{2med}}$$

...Con relación a un cierto valor de dilución a través del contenido de humedad del gas

"A un punto de rocío de 4°C"

"Referencia gas seco"

...Con relación a las condiciones normales de un gas

Para pasar de un valor medido a las condiciones normales

$$C_{C.N.} = C_1 \cdot \frac{T_1 \cdot 1013hPa}{P_1 \cdot 273K}$$

© 2010 Tiempo Real, S.A.

Tenemos varios métodos para conseguir este análisis:

- * Método de medida in-situ
- * Método de medida extractivo o ex-situ
 - En base húmeda
 - En base seca

Vamos a analizar el **Método extractivo o ex-situ (en base seca)**

Se extrae una parte representativa del gas a analizar (gas de combustión)

Se pasa por una unidad de acondicionamiento ⇒ Consiste en...

...limpiar el gas de partículas

...enfriar el gas a una temperatura fija por debajo del punto de rocío para que gas se seque

Se dirige al analizador

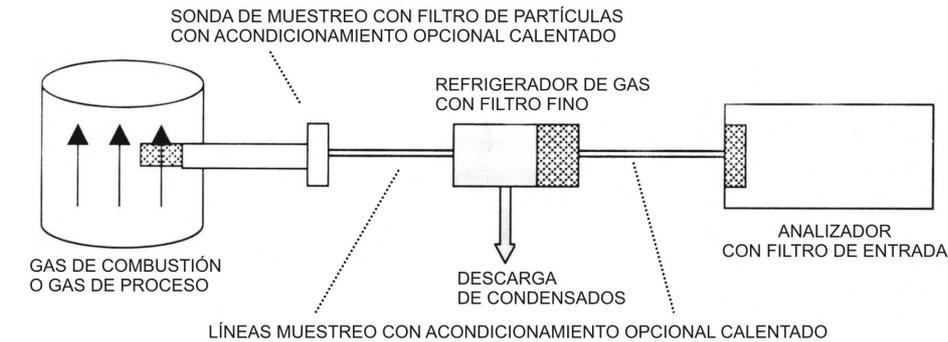


FIGURA 4.2. EXTRACCIÓN Y ACONDICIONAMIENTO DE GAS DE MUESTREO (ESQUEMA).

Cortesía de testo, ref. <5>.

© 2010 Tiempo Real, S.A.

Ventajas del **muestreo extractivo**...

...El analizador está separado y protegido de la corriente del proceso

...El gas a analizar, al acondicionarlo, se transforma en un estado definido y por lo tanto comparable

...Puede operarse más de un analizador con una unidad de muestra o un analizador a varios puntos de muestra

...La extracción del gas de combustión se realiza mediante sondas de muestreo que se introducen en el interior del conducto y una bomba que aspira el gas a analizar situada en el analizador

Temperaturas máximas de 1800°C

En la punta puede colocarse un filtro de partículas

Pueden ir equipadas con sensores para medir temperatura y presión

...La unidad de acondicionamiento enfría el gas de muestreo y elimina agua de la muestra

El agua junto con los gases ácidos podrían dañar el analizador

...Las líneas de muestreo pueden ser calentadas o no ⇒ El objetivo es que no se produzcan condensaciones en las líneas

4.2. Componentes posibles a medir en los gases de combustión

A partir de la **figura 2.1** se aprecia que podemos correlacionar el exceso de aire con...

- ...el O_2
- ...el CO_2
- ...el CO o los **combustibles** presentes en los gases de combustión
- ... **Opacidad**

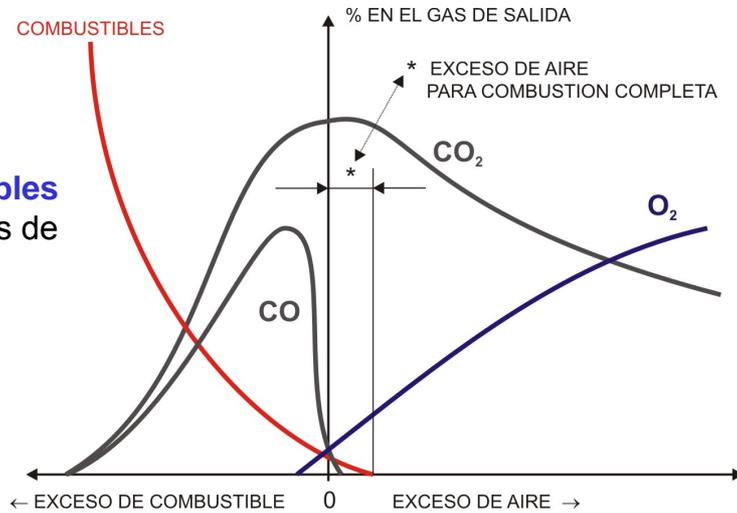
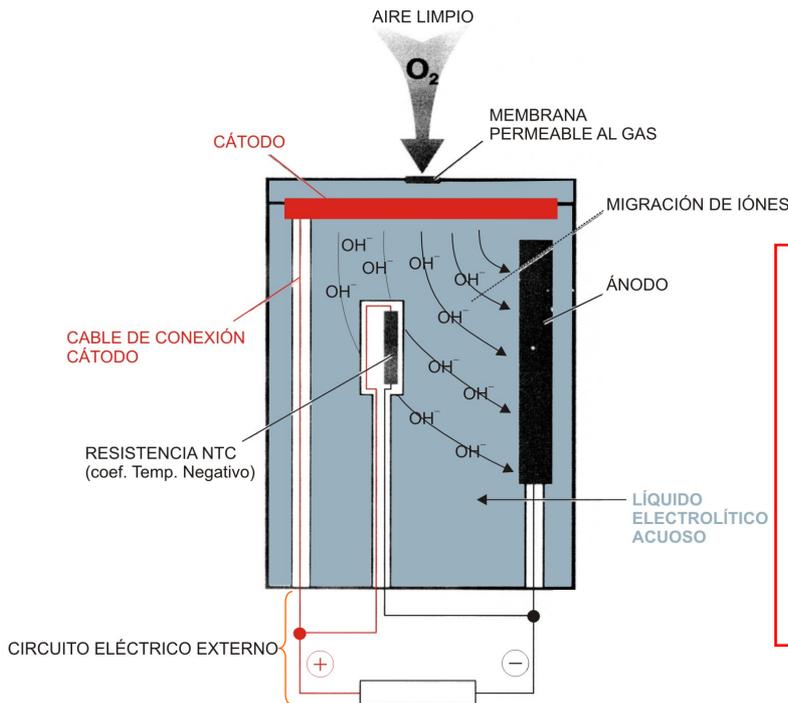


FIGURA 2.1. COMPONENTES MAYORITARIOS EN LOS GASES DE SALIDA.
Cortesía de Liptak, ref. <2>.

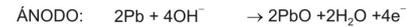
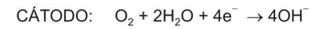
© 2010 Tiempo Real, S.A.

O_2 ...

...Utiliza un sensor electroquímico para mediciones ex-situ en base seca



ECUACIONES DE REACCIÓN:



Funciona según el principio electroquímico de potenciometría selectiva de ión:

- El sensor está relleno de una solución electrolítica acuosa
- Se colocan 2 electrodos específicos (el ánodo es de plomo) con un campo eléctrico aplicado
- El sensor está sellado del exterior mediante una membrana permeable al gas que queremos analizar (en este caso oxígeno)

FIGURA 4.3. ESQUEMA DE UN SENSOR ELECTROQUÍMICO DE OXÍGENO. *Cortesía de testo, ref. <5>*

© 2010 Tiempo Real, S.A.

O₂...

...Utiliza células de **óxido de circonio** para mediciones in-situ:

- Para minimizar los efectos de las pérdidas (infiltración de oxígeno atmosférico) ⇒ la sonda debe estar instalada cerca de la zona de combustión
 - No se puede distinguir entre el exceso de oxígeno y el oxígeno infiltrado
- Tiene que estar instalada en un punto donde la temperatura sea inferior a la temperatura de trabajo de la sonda (ésta está calefactada eléctricamente)
- El flujo tiene que ser turbulento en el punto donde está instalado el sensor para asegurar que la muestra es representativa del gas
- Mide **oxígeno neto** ⇒ El oxígeno resultante tras la combustión de los combustibles en los gases de combustión...

...El error es despreciable cuando el nivel de oxígeno ronda el 5%

...El error puede ser significativo en calderas optimizadas con porcentajes de oxígeno alrededor del 1%

O₂...

Cuando se desea un rendimiento máximo, la única medida del oxígeno provoca una incertidumbre demasiado grande

Otra limitación de la optimización basada en el exceso de oxígeno...

...Un problema local en un quemador puede ocasionar una combustión incompleta y el exceso de oxígeno en los gases de combustión se mantiene en su valor normal

CO₂...

...El método más utilizado para medirlo es mediante absorción infrarroja (NDIR)

...No es una buena base para optimizar porque:

- Su relación con el exceso de oxígeno es función de tipo de combustible utilizado según apreciamos en la **figura 4.4**

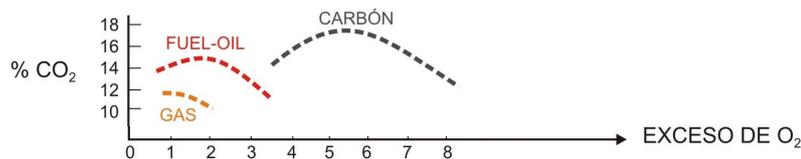


FIGURA 4.4. LA RELACIÓN ENTRE EL EXCESO DE OXÍGENO Y EL CO₂ EN EL GAS DE SALIDA DE UNA CALDERA OPERADA A CARGA CONSTANTE ES FUNCIÓN DEL TIPO DE COMBUSTIBLE QUEMADO. Cortesía de Liptak, ref. <2>.

- Su concentración en el gas de combustión depende del CO₂ atmosférico
- Es poco sensible en el punto de exceso de oxígeno óptimo debido a que el CO₂ se encuentra en su máximo

Combustibles...

Se puede emplear el sensor de filamento catalítico para la medición de los combustibles totales ⇒ Ver la **figura 4.5**

...Suelen detectarse como hidrocarburos no quemados

...No se utilizan como base para optimización

...El objetivo no es mantener una cierta concentración a la salida, sino eliminarlos

...Muchas veces estas medidas se utilizan como límites de alarma

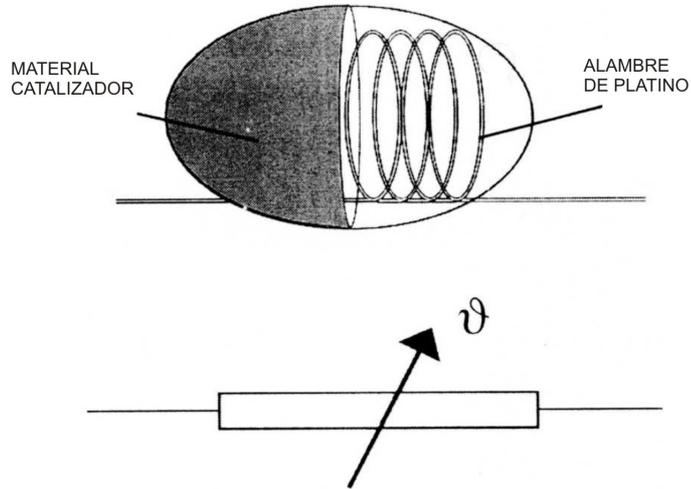


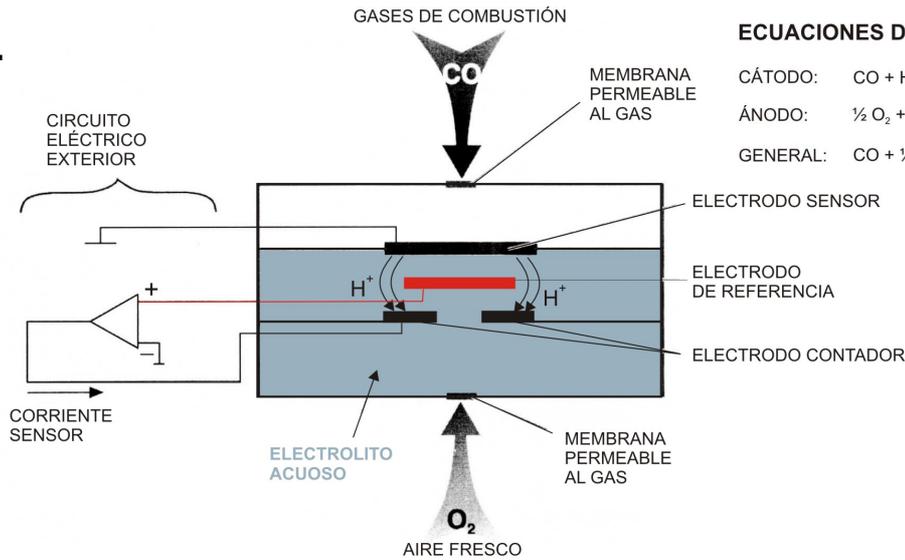
FIGURA 4.5. ESQUEMA DEL SENSOR DE FILAMENTO CATALÍTICO.
Cortesía de testo, ref. <5>.

© 2010 Tiempo Real, S.A.

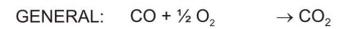
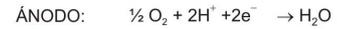
CO...

Podemos emplear como método extractivo en base seca un sensor electroquímico

CO...



ECUACIONES DE REACCIÓN PARA CO:



Funciona según el principio electroquímico de potenciometría selectiva de ión:

- El sensor está relleno de una solución electrolítica acuosa
- Se colocan 3 electrodos específicos con un campo eléctrico aplicado
- Membrana permeable al gas que queremos analizar (en este caso el CO)
- Tenemos también un aporte de oxígeno fresco del aire para completar la reacción

FIGURA 4.6. ESQUEMA DE UN SENSOR ELECTROQUÍMICO DE MONÓXIDO DE CARBONO.

Cortesía de testo, ref. <5>.

© 2010 Tiempo Real, S.A.

CO...

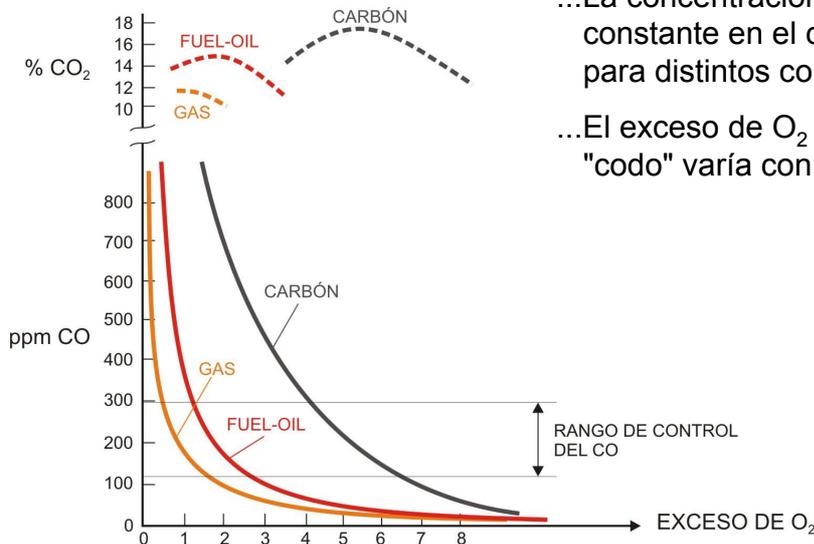
...Es la medida más sensible de todos los gases que componen el gas de combustión

...El rendimiento óptimo de la caldera se puede obtener cuando...

...las pérdidas debidas a la combustión incompleta

...igualan los efectos de las pérdidas de calor por el exceso de aire

Estas condiciones de rendimiento óptimo prevalecen en el "codo" de cada curva de CO...



...La concentración de CO es prácticamente constante en el codo de las diferentes curvas para distintos combustibles

...El exceso de O₂ correspondiente a cada "codo" varía con el combustible

FIGURA 4.4. LA RELACIÓN ENTRE EL EXCESO DE OXÍGENO Y EL CO o EL CO₂ EN EL GAS DE SALIDA DE UNA CALDERA OPERADA A CARGA CONSTANTE ES FUNCIÓN DEL TIPO DE COMBUSTIBLE QUEMADO. Cortesía de Liptak, ref. <2>. © 2010 Tiempo Real, S.A.

CO...

...Teóricamente el CO debería ser cero con presencia de O₂ en el gas de combustión

Pero en la práctica no es así ⇒ Se puede mantener un **rendimiento máximo cuando el CO se encuentra entre 100 y 200 ppm**

Teniendo en cuenta los límites reglamentarios impuestos sobre el CO...

...Ajustaremos una concentración de CO por debajo de esos límites y cercana a esa banda de rendimiento óptimo

Ej. Para combustible gaseoso, un valor de 50-60 ppm

El CO es un indicador muy sensitivo de un quemador mal ajustado \Rightarrow Si su concentración sube hasta 1000 ppm esto es una indicación fiable de condición de trabajo insegura

El CO es una medida de la finalización de la combustión y nada más. No se ve afectado por la infiltración de aire, sólo por el efecto dilutivo

CO es un tipo de combustible inquemado...

...Puede haber más combustibles inquemados

Opacidad ...

Para conseguir la medida de opacidad...

- ...Se hace pasar un volumen fijo de gas de combustión a través de un área fija de papel de filtro estándar
- ...Se inspecciona visualmente el grado de oscurecimiento producido
- ...Se compara con una escala estándar
- ...El grado de ensombrecimiento se expresa numéricamente

Volumen de gas utilizado (ASTM D 2156-94 (Reaprobada 2003))...

- ... $36.900 \pm 1.650 \text{ cm}^3$ a 16°C y 1 atm ($2.250 \pm 100 \text{ in}^3$ a 60°F y 1 atm) por cada $6,45 \text{ cm}^2$ (1 in^2) de superficie de papel
- ...El recorrido de la muestra desde la toma hasta el filtro como máximo 410 mm
- ...Se debe enfriar la muestra a una temperatura que no dañe el papel de filtro pero que no descienda por debajo de la temperatura de punto de rocío

Opacidad ...

...La escala de humos se define como la reducción en la luz incidente reflejada en el papel dividida por 10

Varía entre 0 y 9

Número 0: No habrá reducción en la luz reflejada

Número 9: La luz reflejada será el 10% de la incidente

Se absorbe el 90% $\Rightarrow 90/10 = 9$

5. Qué medir para optimizar el rendimiento de la combustión

Usos de estos análisis:

% O₂ como un índice de control individual \Rightarrow Es el más antiguamente usado

ppm de CO o **Combustibles Totales** \Rightarrow Como un índice de control individual

% O₂ en combinación con **ppm de CO** o **Combustibles Totales**

% CO₂ en combinación con **ppm de CO**

% O₂ en combinación con **% Opacidad**

5.1. Oxígeno como índice de control individual

Método utilizado desde hace muchos años \Rightarrow es bien conocido y entendido

Figura 5.1 \Rightarrow Muestra el esquema de control

© 2010 Tiempo Real, S.A.

- La función genera una consigna que...
- ...es función de la **carga de la caldera**
- ...o de otro índice de la velocidad de fuego...
 - ...tiene que estar basada en pruebas con la caldera realizadas a 3 o más cargas
 - ...el operador tiene la opción de añadir un bias a la consigna generada
- ...El controlador está ajustado con
 - baja ganancia
 - e integral lenta
- ...Se colocan unos límites en la salida para evitar que fallos en el analizador hagan que la salida se vaya a un extremo

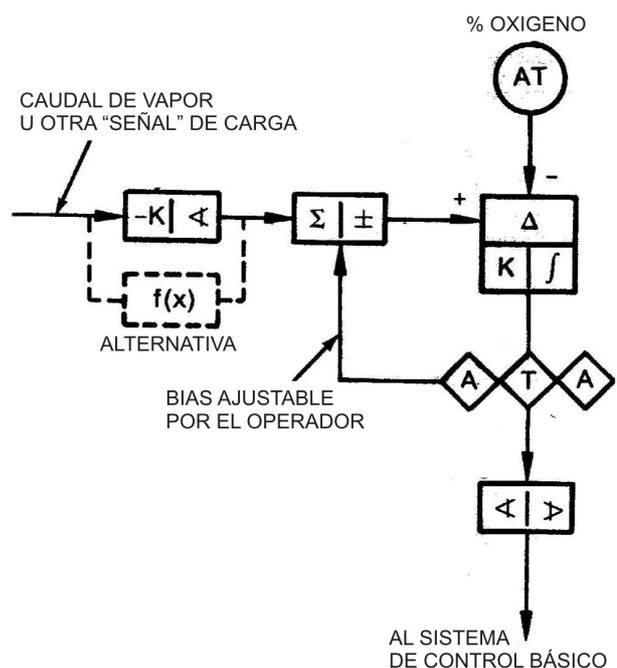


FIGURA 5.1. LAZO DE CONTROL DE %O₂.
Cortesía de Dukelow, ref. <1>.

© 2010 Tiempo Real, S.A.

...Cuando hay una perturbación brusca como...

...pérdida de llama

...operación a una carga que necesite un exceso de aire por debajo del mínimo

Aquí el controlador no está controlando ⇒ Hay que preverlo y colocar al controlador en manual o en tracking mientras dura esta circunstancia

Posteriormente pasarlo a automático cuando la situación se haya restablecido

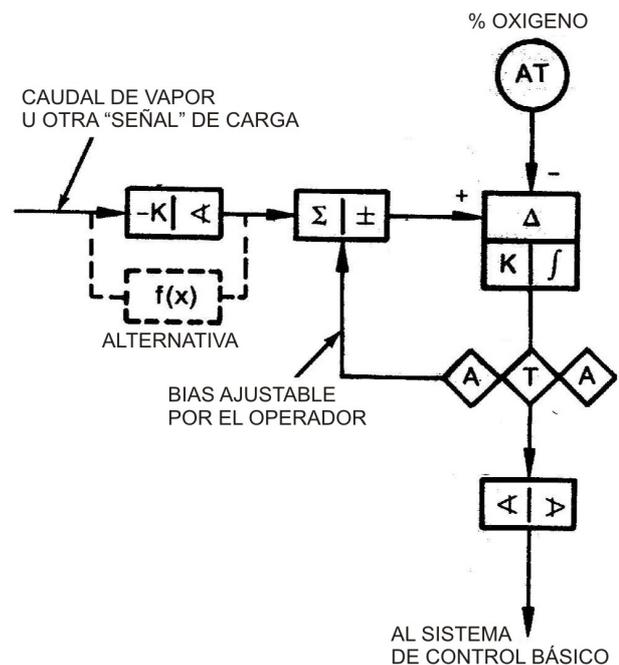


FIGURA 5.1. LAZO DE CONTROL DE %O₂.

Cortesía de Dukelow, ref. <1>.

© 2010 Tiempo Real, S.A.

En cualquier proceso de combustión, existe un equilibrio entre el combustible, el CO y el oxígeno:



El oxígeno desplaza el equilibrio hacia la derecha

En un sistema bien mezclado con exceso de aire la concentración de combustibles inquemados debe ser menor que la concentración de CO

Si se controla el CO dentro de unos límites satisfactorios ⇒ la concentración de hidrocarburos será necesariamente baja

De la misma forma...

...el control del contenido de oxígeno en el gas de combustión

...implica un control implícito del CO en equilibrio con el oxígeno

Sin embargo, el equilibrio depende en gran medida del mezclado aire-combustible...

- ...Una deficiencia de aire en un punto de la zona de combustión puede resultar en un aumento de los combustibles inquemados y el CO
- ...Una atomización ineficiente debida a un ensuciamiento en el quemador puede tener un efecto parecido
- ...A cargas bajas, donde las velocidades se reducen la eficiencia del mezclado disminuye

Esto hace que **un control sobre el oxígeno no asegura necesariamente un control sobre las emisiones de CO e hidrocarburos**

(incluso cuando está bien caracterizado el exceso de O₂ con la carga)

© 2010 Tiempo Real, S.A.

5.2. Combustible total o CO como índice de control individual

Basado en mantener una **consigna constante de CO a todas las cargas**

Esquema de control aplicable

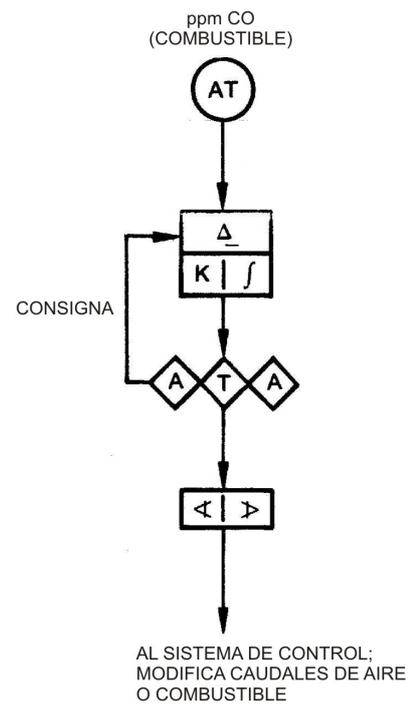
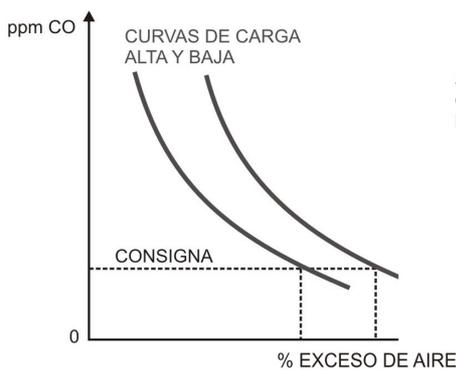


FIGURA 5.2. LAZO DE CONTROL DE CO. Cortesía de Dukelow, ref. <1>.

© 2010 Tiempo Real, S.A.



Esquema de control aplicable

Líneas continuas ⇒ El control básico

Líneas discontinuas ⇒ Lo que sería necesario añadir para operar en el punto de pérdidas mínimas por combustible

(consigna de CO programada con la **carga**)

SEÑAL DE CARGA DE LA CALDERA:
CAUDAL DE VAPOR,
DEMANDA DE FUEGO, ETC ...

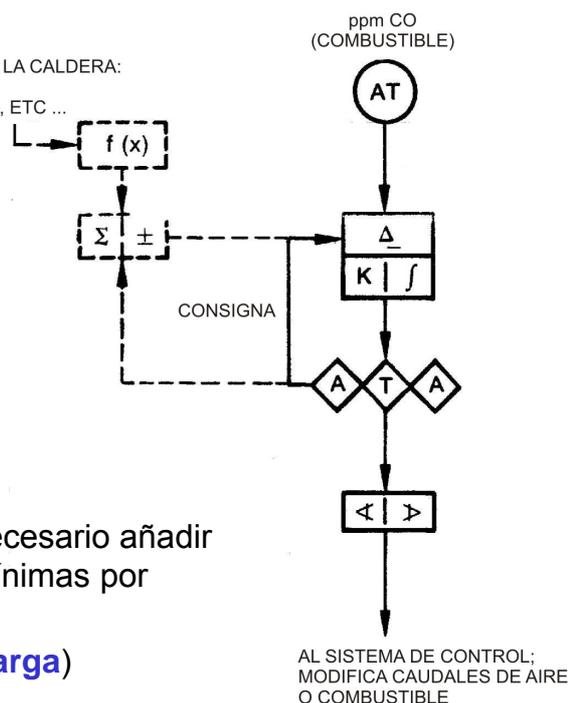
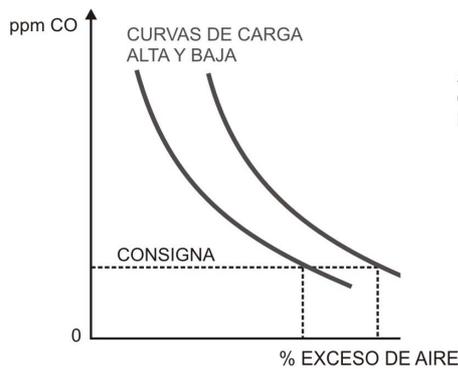


FIGURA 5.2. LAZO DE CONTROL DE CO. Cortesía de Dukelow, ref. <1>.

© 2010 Tiempo Real, S.A.



La función se determina en base a...

- ...análisis del combustible
- ...exceso de aire
- ...temperatura de los gases de combustión
- ...pruebas sobre la caldera para determinar la forma de la curva ppm CO frente a exceso de aire

SEÑAL DE CARGA DE LA CALDERA:
CAUDAL DE VAPOR,
DEMANDA DE FUEGO, ETC ...

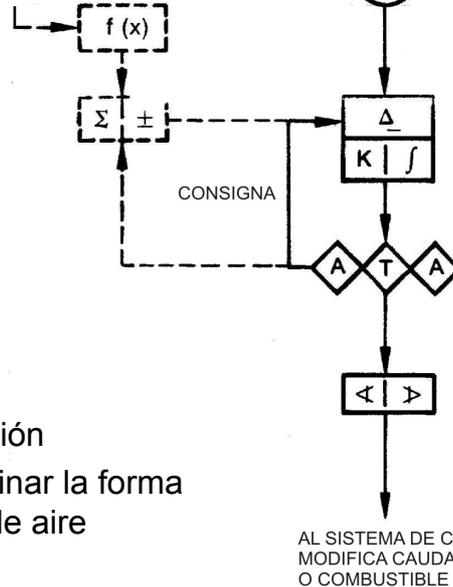
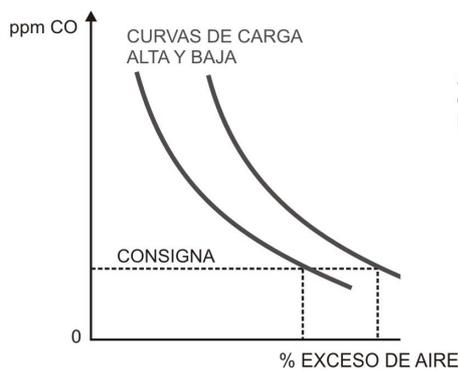


FIGURA 5.2. LAZO DE CONTROL DE CO. Cortesía de Dukelow, ref. <1>.

© 2010 Tiempo Real, S.A.



...Los límites en la salida evitan que ante un fallo del sensor, la salida se vaya a los extremos...

...cuando se alcancen estos límites, hay que colocar el controlador en manual o en seguimiento y retornarlo a su estado normal tras la limitación

SEÑAL DE CARGA DE LA CALDERA:
CAUDAL DE VAPOR,
DEMANDA DE FUEGO, ETC ...

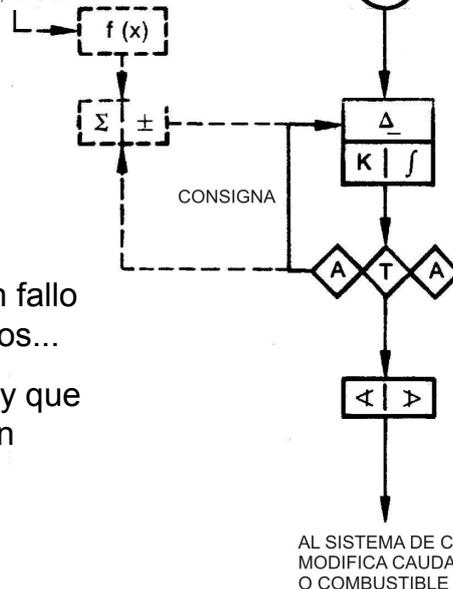
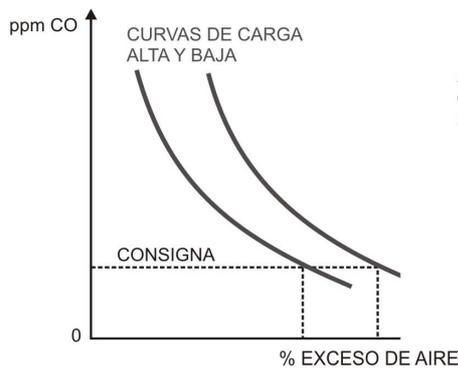


FIGURA 5.2. LAZO DE CONTROL DE CO. Cortesía de Dukelow, ref. <1>.

© 2010 Tiempo Real, S.A.



...Rango para el CO \Rightarrow 0 a 1000 ppm

Relaciones de señales...

...un cambio de 100 ppm de CO (10% de su campo de medida) alrededor de su consigna

...es acompañado por un cambio en %O₂ de 0,1%

...ese cambio en %O₂ es equivalente a un 0,5% de exceso de aire

SEÑAL DE CARGA DE LA CALDERA:
CAUDAL DE VAPOR,
DEMANDA DE FUEGO, ETC ...

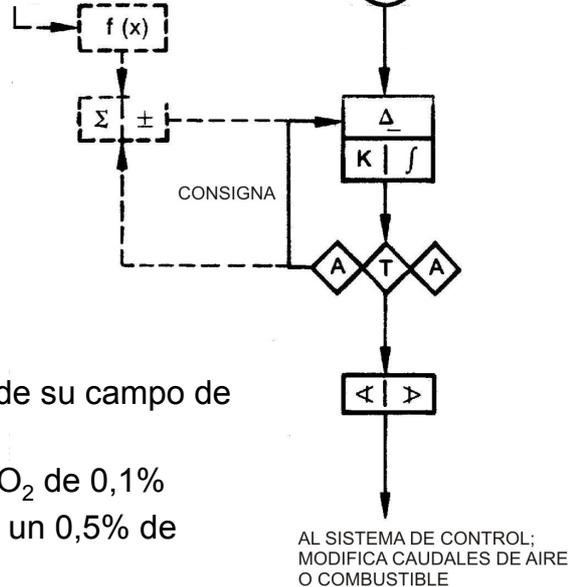


FIGURA 5.2. LAZO DE CONTROL DE CO. Cortesía de Dukelow, ref. <1>.

© 2010 Tiempo Real, S.A.

5.3. Control basado en combinación de % O₂ y ppm CO

El control mediante sólo el **CO** demuestra ciertas carencias

La formación de CO o combustibles se puede ver afectada por cambios rápidos...

...en la velocidad de fuego

...o en los niveles de exceso de aire

Con el control sólo por **CO**:

Un pobre funcionamiento del quemador puede causar la siguiente secuencia...

- ...El CO aumenta
- ...Se añade más aire de combustión pero el quemador sigue en mal estado
- ...Este mayor aire provoca una dilución de CO
- ...La concentración de CO vuelve a la consigna

Estamos trabajando con la concentración de CO correcta pero el exceso de aire es demasiado grande y no podemos verlo...

...para detectarlo deberíamos conocer el % O₂ en los gases de combustión

Figura 5.3 ⇒ Es un control en cascada **CO - %O₂**...

...La consigna del CO se establece y se puede modificar manualmente (con un bias)

...La consigna del O₂ se establece

...La consigna del O₂ también la puede modificar la salida del controlador de CO en cascada

...La consigna del O₂ también se puede modificar manualmente con un bias

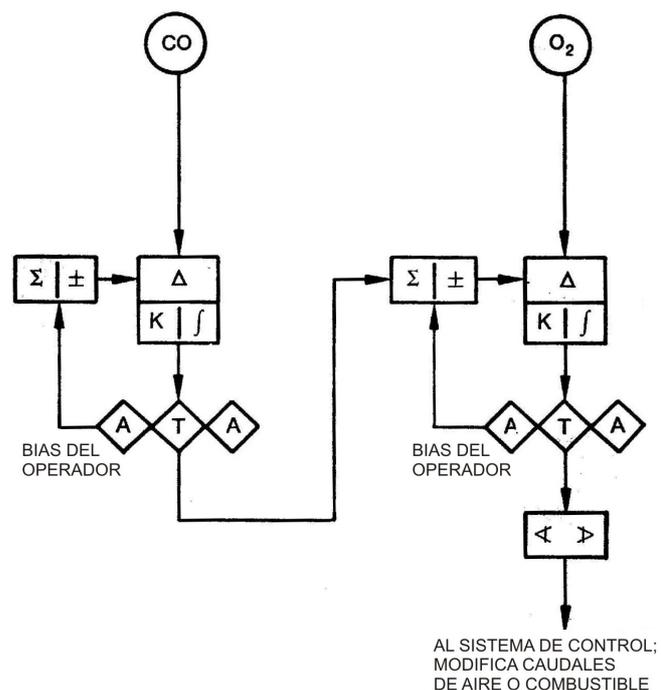


FIGURA 5.3. CONTROL MEDIANTE % OXÍGENO Y ppm DE CO.
Cortesía de Dukelow, ref. <1>.

5.3.1. % O₂, ppm CO y carga de la caldera

Un sistema de control no puede mejorar el rendimiento básico de una caldera o de sus quemadores

Un buen sistema de control puede llevar la operación de la caldera cerca de su mejor nivel de funcionamiento para...

- ...una carga particular
- ...otras condiciones del entorno

© 2010 Tiempo Real, S.A.

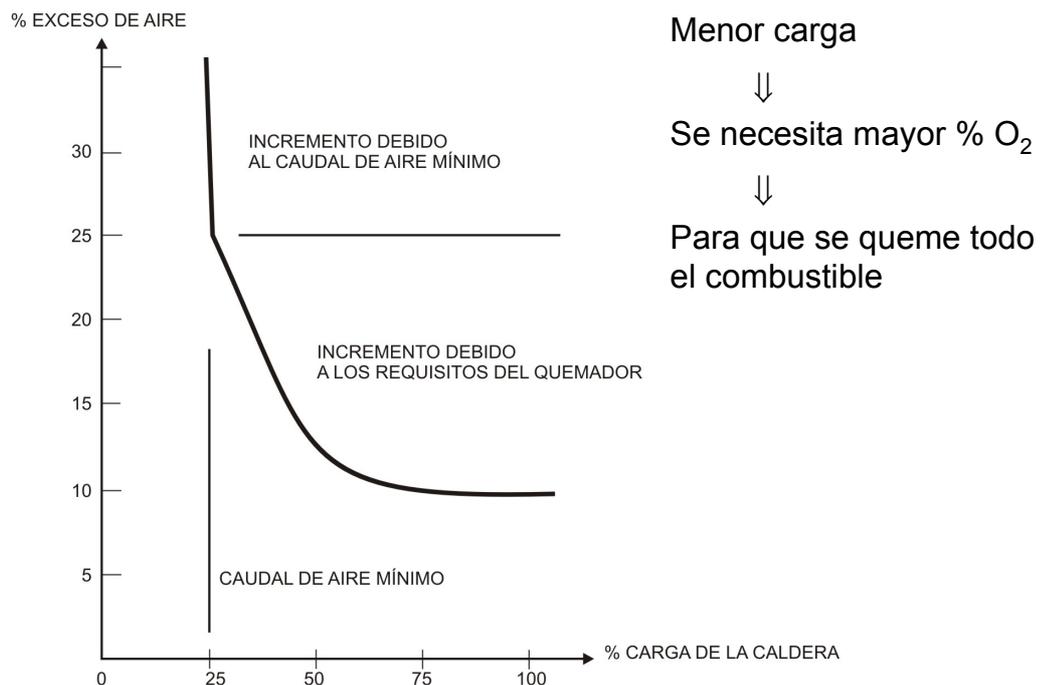


FIGURA 5.4. CURVA TÍPICA DE EXCESO DE AIRE FRENTE A CARGA DE LA CALDERA.
 Cortesía de Dukelow, ref. <1>.

Figura 5.5 ⇒ Muestra las pérdidas por: ⇒ exceso de aire
⇒ combustibles inquemados

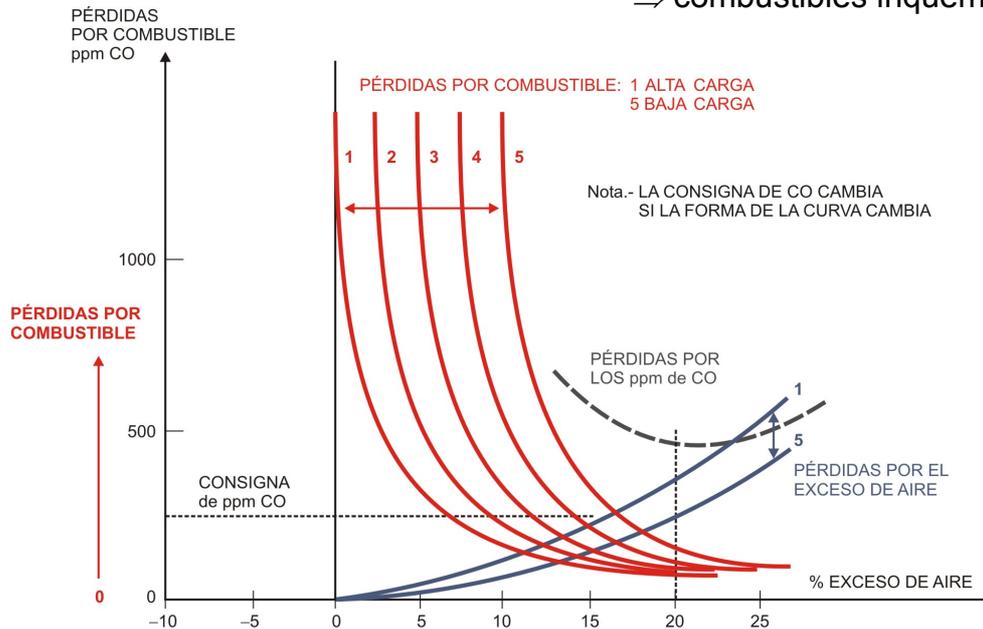


FIGURA 5.5. RELACIÓN ENTRE EL EXCESO DE AIRE Y EL COMBUSTIBLE. Cortesía de Dukelow, ref. <1>.

© 2010 Tiempo Real, S.A.

Cuando la suma de las dos pérdidas sea mínima ⇒ Las pérdidas totales serán mínimas

El punto preciso depende de factores como...

- ...El combustible quemado
- ...El nivel de exceso de aire
- ...La temperatura de salida de los gases
- ...La forma que tenga la curva de pérdidas por combustible inquemado frente al exceso de aire

Para hacer intervenir el análisis de los gases de combustión en el control, podemos actuar de dos formas...

...El **control de O₂** se obtiene fijando un determinado porcentaje de exceso de aire a partir de la medida del % O₂

Bajo condiciones de test se establece cual ha de ser la consigna de exceso de O₂ para que las pérdidas en la caldera sean mínimas

Será una consigna de O₂ programada que la fijaremos...

...en función básicamente de la demanda de fuego de la caldera

...se añade un pequeño margen de seguridad (3 a 4 % de exceso de aire) para hacer frente a variaciones de funcionamiento en la caldera o quemadores respecto a las condiciones de test

Para hacer intervenir el análisis de los gases de combustión en el control, podemos actuar de dos formas...

...Control a partir de los **ppm de combustible** en los gases de combustión

Podríamos asumir que ⇒ Para diferentes cargas en la caldera y obtención del mejor rendimiento económico...

...Si mantenemos esta medida en un valor relativamente constante, el exceso de aire necesario aumenta automáticamente para diferentes cargas

Pero a partir de datos obtenidos, se observa que...

...La temperatura en los gases de combustión aumenta a mayor carga en la caldera

...Hay un cambio en la forma de la curva de pérdidas por combustible frente a exceso de aire cuando cambia la carga

Conclusión ⇒ Debería determinarse la consigna de ppm de CO óptima para cada valor de carga a partir de pruebas realizadas en la caldera

Resultado ⇒ Se utilizaría una consigna de CO programada con la carga, igual que se hace con el O₂

Figura 5.6 ⇒ Es un control en cascada **CO - %O₂**...

...La consigna del CO se establece en función de la carga

...La consigna del CO también se puede modificar manualmente (con un bias)

...La consigna del O₂ se establece en función de la carga

...La consigna del O₂ también la puede modificar la salida del controlador de CO en cascada

...La consigna del O₂ también se puede modificar manualmente con un bias

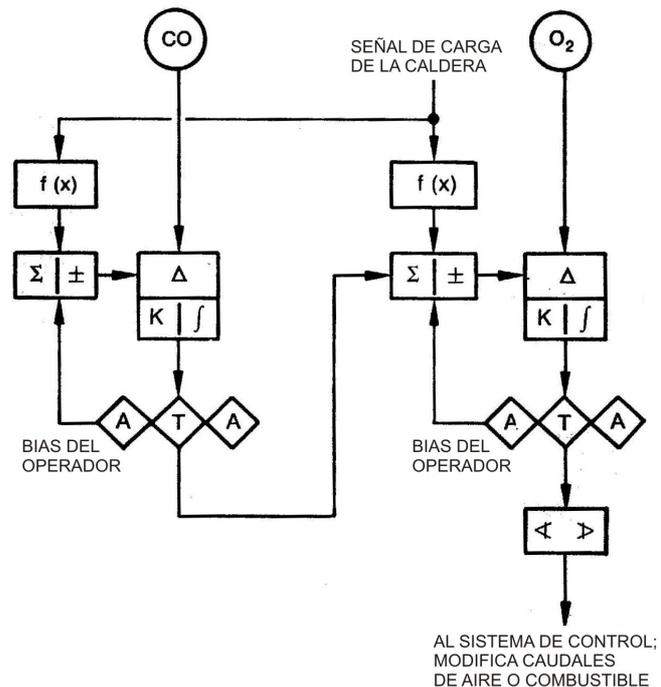


FIGURA 5.6. CONTROL MEDIANTE % OXÍGENO Y ppm DE CO.
Cortesía de Dukelow, ref. <1>

© 2010 Tiempo Real, S.A.

5.4. Control basado en combinación de % O₂ y % Opacidad

Se puede inhibir la reducción del exceso de aire que demandasen los controles anteriores ante una presencia de humo (alta **opacidad**)

Todos los combustibles excepto el gaseoso tienen un potencial de producir humo con presencia de exceso de aire...

...En alguna instalación se puede producir el hecho de que el humo resulte excesivo y el CO esté por debajo de su valor deseado

...Si se comprueba que esto es así para una instalación determinada ⇒ La medición de opacidad puede sustituir a la medición de CO en la **figura 5.6**

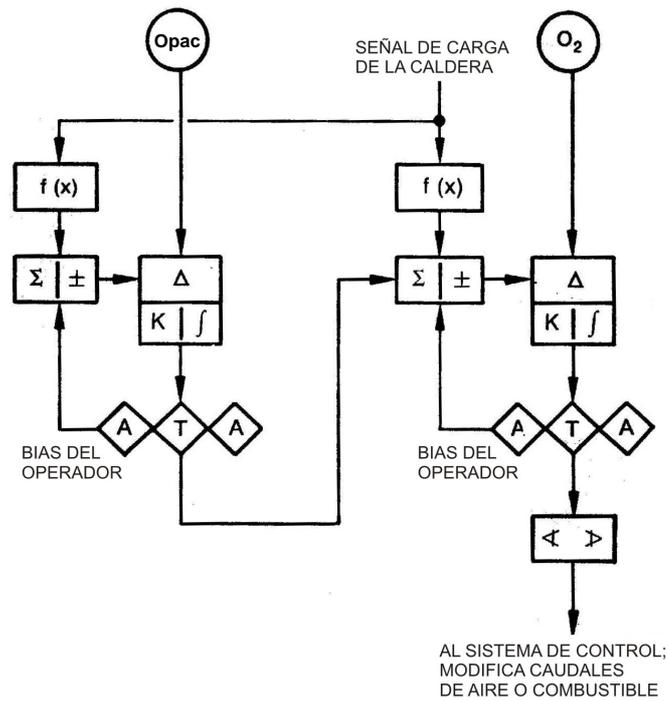


FIGURA 5.7. CONTROL MEDIANTE % OXÍGENO Y OPACIDAD
Cortesía de Dukelow, ref. <1>.

© 2010 Tiempo Real, S.A.

Hay que tener en cuenta que un aumento en el exceso de aire puede producir un aumento temporal en la opacidad...

...al haber mayor velocidad de circulación de gases en la caldera, éstos pueden arrastrar partículas que estuvieran en el interior provocando un aumento "ficticio" de la opacidad

Cálculo del ahorro por optimización

Vamos a calcular el ahorro potencial tras un ajuste del exceso de aire:

Lecturas antes del ajuste:

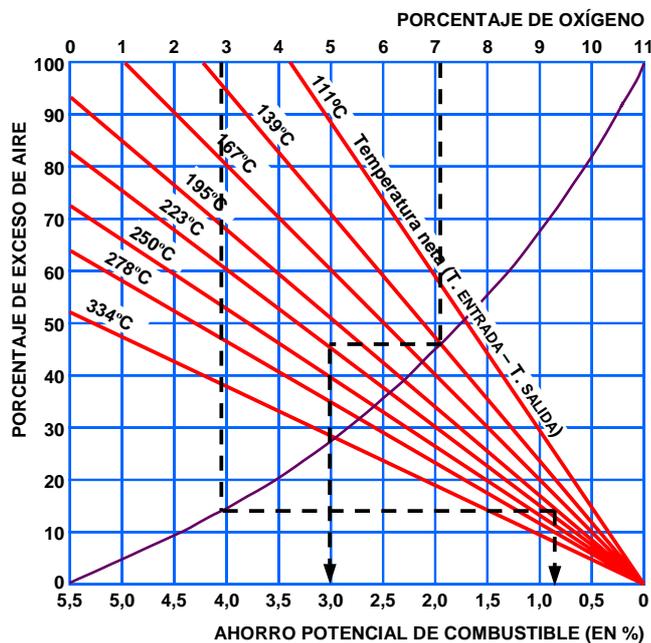
- Oxígeno 7,1%
- Temperatura neta 222°C
- Monóxido de carbono: 0 ppm

Lecturas después del ajuste:

- Oxígeno 2,9%
- Temperatura neta 198°C
- Monóxido de carbono 90 ppm

© 2010 Tiempo Real, S.A.

Cálculo del ahorro por optimización



Lectura antes del ajuste:

- Oxígeno 7,1%
- Temperatura 222°C
- Monóxido de carbono: 0 ppm

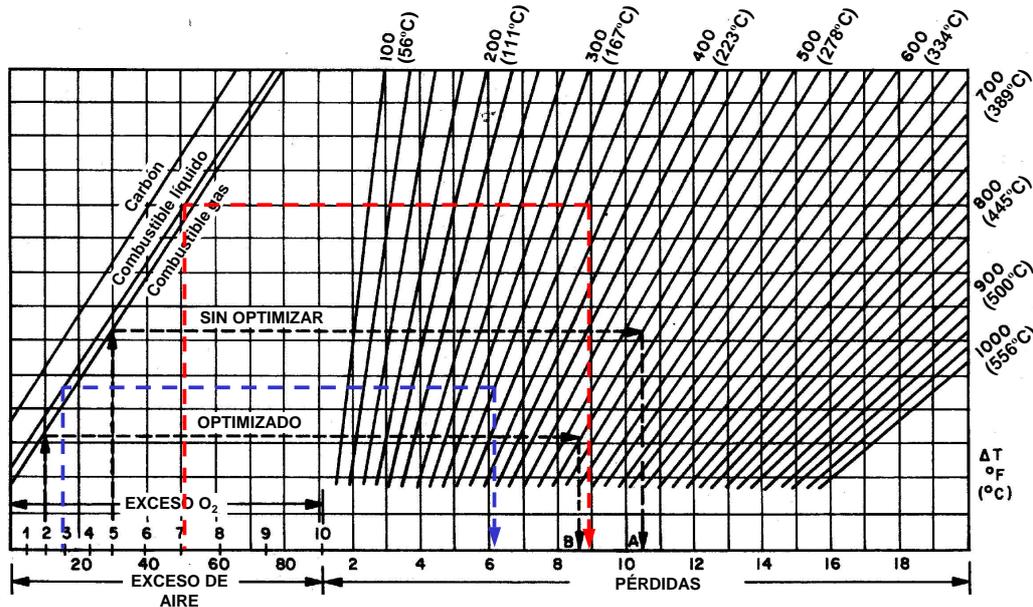
Lectura después del ajuste:

- Oxígeno 2,9%
- Temperatura 198°C
- Monóxido de carbono 90 ppm

El ahorro potencial en combustible es de:

$$3 - 0,7 = 2,3\%$$

Cálculo del ahorro por optimización



Cortesía de Instrument Engineers' Handbook 3ª edición Béla G. Lipták

Lectura antes del ajuste:

Oxígeno 7,1%
 Temperatura 222°C
 Monóxido de carbono: 0 ppm

Lectura después del ajuste:

Oxígeno 2,9%
 Temperatura 198°C
 Monóxido de carbono 90 ppm

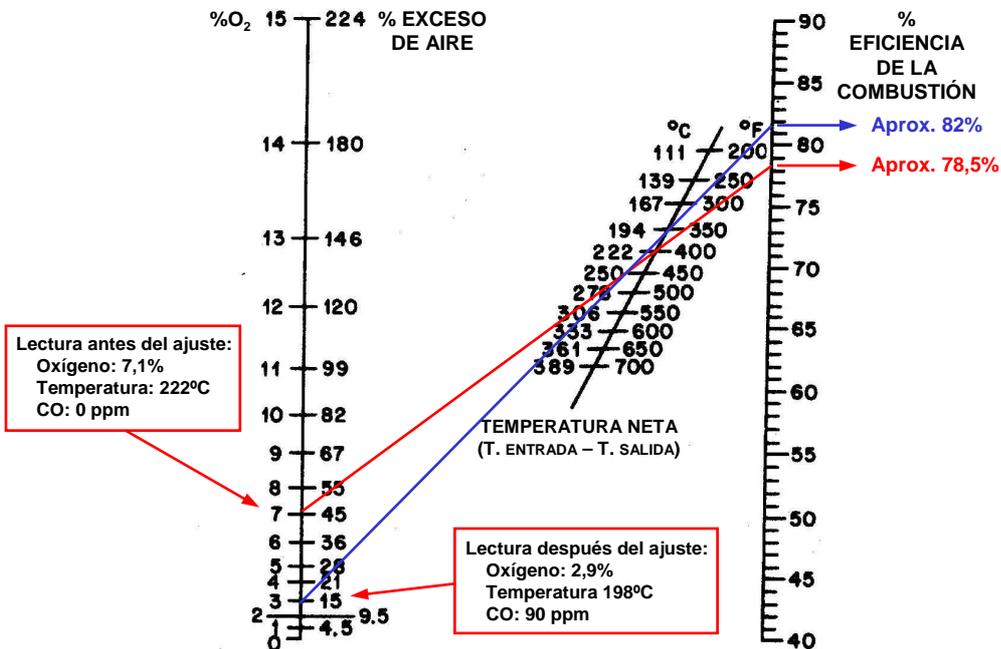
El ahorro potencial en combustible es de:

$8,95 - 6,2 = 2,75\%$

© 2010 Tiempo Real, S.A.

Cálculo del ahorro por optimización

Podemos evaluar el ahorro a partir de la mejora en el rendimiento:



Lectura antes del ajuste:
 Oxígeno: 7,1%
 Temperatura: 222°C
 CO: 0 ppm

Lectura después del ajuste:
 Oxígeno: 2,9%
 Temperatura 198°C
 CO: 90 ppm

Cortesía de Instrument Engineers' Handbook 3ª edición Béla G. Lipták

© 2010 Tiempo Real, S.A.

Cálculo del ahorro por optimización

Podemos evaluar el ahorro a partir de la mejora en el rendimiento:

Ahorro por cada 100 euros de costo de combustible, por incremento de la eficiencia de la combustión									
Se consideran constantes las pérdidas por radiación									
Eficiencia original	Eficiencia mejorada								
	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%
50%	9,10	16,70	23,10	28,60	33,30	37,50	41,20	44,40	47,40
55%		8,30	15,40	21,50	26,70	31,20	35,30	38,90	42,10
60%			7,70	14,30	20,00	25,00	29,40	33,30	37,80
65%				7,10	13,30	18,80	23,50	27,80	31,60
70%					6,70	12,50	17,60	22,20	26,30
75%						6,30	11,80	16,70	21,10
80%							5,90	11,10	15,80
85%								5,60	10,50
90%									5,30

Aplicando la tabla:
Aumento del 78,5% al 82%

75 a 80: 6,30
78,5 a 80: 1,89
80 a 85: 5,90
80 a 82: 2,36

Total: 4,25

4,25 €
100 € gasto en combustible

Cortesía de
Ahorro de energía en la industria.
Rendimiento de la combustión. Parámetros y analizadores.
D. R. Garriga

© 2010 Tiempo Real, S.A.

Bibliografía:

- Ref. <1> Dukelow, S. G., "The control of boilers", ISA Press. 1986.
- Ref. <2> Lipták, B. G., "Optimization of unit operations". Chilton Book Company. 1987.
- Ref. <3> Lipták, B. G., "Instrument Engineers' Handbook: Process control". Chilton Book Company. 3ª edición. 1999.
- Ref. <4> Shinskey, F. G., "Energy conservation through control". Academic Press. 1978.
- Ref. <5> Testo AG. "Análisis de gases de combustión en la industria. Guía práctica para Medir Emisiones y Procesos". 1ª edición 2003.
- Ref. <6> Ahorro de energía en la industria. Uso racional de los combustibles. Rendimiento de la combustión. Parámetros y analizadores. D. R. Garriga. Catalana de gas y electricidad. Editorial Índex. 1982.