



# **INDUSTRIAL TIJUANA** **CAPACITACION**

*www.industrialtijuana.com*

*Difusión de Cultura de Mantenimiento.*

---

**PUBLICACION TECNICA ESCOM**

**P-338**

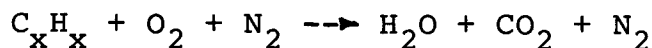
**"COMO CALCULAR LA EFICIENCIA DE COMBUSTION POR MEDIO DE LOS-**  
**-GASES DE COMBUSTION."**

"COMO CALCULAR LA EFICIENCIA DE COMBUSTION POR MEDIO DE LOS -  
- GASES DE COMBUSTION."

Por; Ing. Guillermo Siguenza G.

El análisis de los gases de combustión es la herramienta principal para reducir el consumo de combustible en un horno ó caldera. Para poder comprender como el análisis de gases de combustión -- puede utilizarse para calcular la eficiencia de combustión, es necesario tener un conocimiento básico de lo que es la combustión.

La siguiente reacción describe en forma simple lo que sucede cuando un hidrocarburo es quemado, ya sea un gas, un líquido ó un sólido:



La reacción parece ser simple pero la realidad es que la combustión nunca es perfecta en aplicaciones industriales. La variante más importante es la relación aire/combustible. por ejemplo; en la combustión de gas natural se requiere una relación en volumen de aire/gas de 10.3/1 para obtener combustión perfecta (estequiométrica). Si se utiliza demasiado aire (exceso de aire), el O<sub>2</sub> adicional y el N<sub>2</sub> que lo acompaña se calientan dentro del hogar a la temperatura<sup>2</sup> de combustión y luego salen por la chimenea. El calor que contienen se desperdicia.

Por el otro lado sí hay demasiado gas para la combustión se dice que la mezcla es "rica". Bajo estas condiciones el exceso de C<sub>x</sub>H<sub>x</sub> formarán CO y H<sub>2</sub> (ver fig. 1) los cuales también abandonarán el<sup>x</sup> horno por la chimenea. Esto desperdicia mucho calor ya que parte del C<sub>x</sub>H<sub>x</sub> abandonará el horno sin quemarse y sin generar su contenido de<sup>x</sup> calor. Esto se detecta cuando se forman CO y H<sub>2</sub>. Además el CO es un gas muy venenoso, aún en cantidades pequeñas.

También es importante para la combustión que el aire y el combustible se mezclen íntimamente. Si el combustible y el aire no se mezclan homogéneamente, se pueden generar CO y H<sub>2</sub> a altas temperaturas durante la combustión incompleta. Es posible bajo estas condiciones también producir hollín y/o humo negro..

Los gases combustibles se queman más fácilmente que los líquidos porque los líquidos tienen que vaporizarse antes de poderse quemar. Los combustibles líquidos forman hollín ó carbón fácilmente cuando la mezcla aire/combustible esta muy cerca de la estequiométrica. El carbón libre y el hollín son combustibles, que abandonan el hogar sin quemarse y se depositan sobre las superficies de calentamiento de cambiadores, reduciendo la transferencia de calor e incrementando la pérdida por la chimenea.

Como ayuda para evitar que la combustión sea ineficiente y que - desperdicie calor se utiliza el análisis de los gases productos de la combustión para diagnosticar las causas de los problemas.

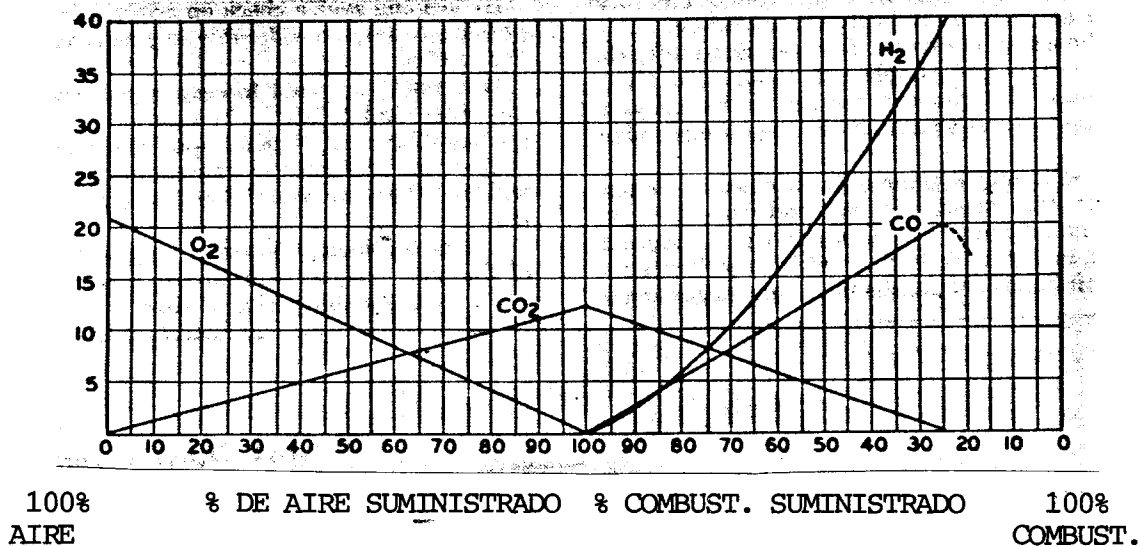


FIGURA 1. PORCIENTO DE PRODUCTOS DE COMBUSTION EN FUNCION DE RELACION A/C.

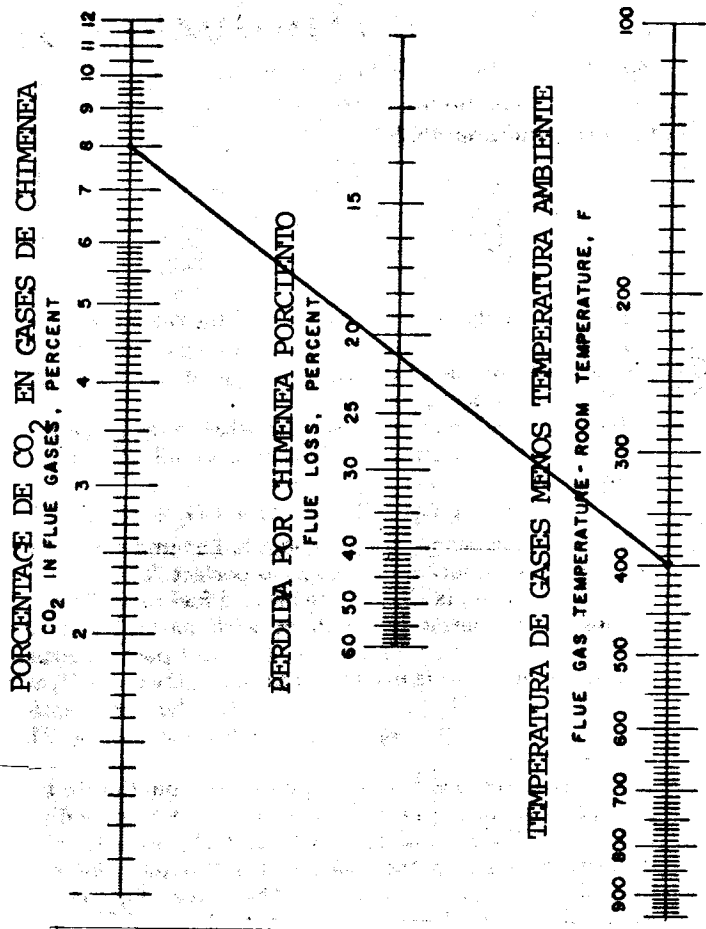


FIGURA 2. NOMOGRAMA PARA DETERMINAR LA PERDIDA POR CHIMENEA EN PORCIENTO.

PARA GAS NATURAL CON LAS SIGUIENTES CARACTERISTICAS:

PODER CALORIFICO ALTO BTU/PIE <sup>3</sup>	970-1100
GRAVEDAD ESPECIFICA	0.57-0.70
% DE CO <sub>2</sub> ULTIMO	11.7-12.2

Los aparatos que se utilizan para analizar los gases se llaman analizadores de gases y se fabrican de diferentes tipos con funcionamientos diferentes.

El primer analizador de gases fué del tipo químico (el Orsat) y fué desarrollado en 1900 por Joseph W. Hays.

Analizando los componentes de los gases de combustión los operadores de hornos pueden saber qué es lo que está ocurriendo en la combustión dentro del hogar.

Los analizadores de gases de combustión pueden clasificarse en dos categorías principales;

- a. Los que utilizan sustancias químicas para tomar lecturas momentáneas y
- b. Los que son electrónicos y toman lecturas continuas.

Los analizadores químicos pueden analizar CO, CO<sub>2</sub>, ó O<sub>2</sub> pero el componente más común que se analiza es el O<sub>2</sub>.

Con este tipo de analizadores el gas de combustión se introduce al analizador mediante una bomba de mano. Dentro del analizador el gas entra en contacto con sustancias químicas y por absorción se va determinando el contenido de cada componente en base a volumen. Normalmente el volumen está dado en base seca, que quiere decir que no se cuenta el vapor de agua el cuál fué condensado y removido mediante un filtro antes de entrar al analizador.

Existen varios tipos de analizadores electrónicos los cuales se diferencian por el método de determinar los contenidos de CO, CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>. Existe un tipo que está equipado con un filtro, una bomba mecánica para introducir continuamente una muestra de los gases, y un detector de CO<sub>2</sub> que mide la conductividad térmica del gas contra la del aire y el la diferencia la convierte a lectura de % de CO<sub>2</sub>.

Otro tipo tiene también una bomba continua para tomar una muestra continua. El gas pasa a través de una celda donde el O<sub>2</sub> presente se combina químicamente con un electrolito, produciendo así un voltaje proporcional a la concentración de O<sub>2</sub>. El resto de la muestra pasa a una sección donde los gases combustibles CO y H<sub>2</sub> contenidos se queman sobre un catalizador, produciendo calor, el cuál se mide y se convierte a una lectura de % de combustibles.

Un tercer tipo de analizador electrónico es el que primero calienta la muestra de gas que entra hasta 1500°F y después la pone en contacto con un sensor cerámico de O<sub>2</sub>. El sensor produce un voltaje que es logarítmico en magnitud en comparación con el % de O<sub>2</sub>. Esta señal se lee en un medidor.

Cualquiera de estos analizadores electrónicos pueden adaptarse para uso estacionario continuo y se pueden interconectar para registrar las lecturas en forma continua en gráficas.

Las ventajas de los analizadores electrónicos es su habilidad para analizar continuamente muestras mientras los operadores hacen ajustes en la relación aire/combustible, su rapidez de análisis, y que no requieren de sustancias químicas.

Las ventajas de los analizadores químicos son su bajo precio y su adaptabilidad de manejo.

### INTERPRETANDO EL ANALISIS DE GASES:

La meta del operador, cuando está ajustando para obtener la máxima eficiencia, debe ser la de fijar la relación aire/combustible lo más cercano a la mezcla estequiométrica. Como se aprecia en la fig. 1 esto quiere decir que el oxígeno será cero y el % de  $\text{CO}_2$  será el máximo (último) para ese combustible. Los productos combustibles ( $\text{CO}$  y  $\text{H}_2$ ) serán cero. Como se había mencionado antes esto no es posible en la práctica, porque la combustión perfecta no existe y siempre aparecerán trazas de  $\text{O}_2$ ,  $\text{C}_x\text{H}_x$ ,  $\text{CO}$  y  $\text{H}_2$ .

Por esta razón en la práctica el ajuste de la relación A/C se hace con un mínimo de exceso de aire para evitar la formación de  $\text{CO}$  y asegurar que hidrocarburos  $\text{C}_x\text{H}_x$  salgan por la chimenea sin quemarse y para evitar la formación de hollín y carbón libre.

Cuando se quema gas natural el análisis debe de dar 11% de  $\text{CO}_2$  y 1% de  $\text{O}_2$ . Diferentes equipos y diferentes condiciones darán resultados diferentes por lo que se recomienda consultar con los fabricantes de los hornos ó calderas, ó del equipo de combustión para que ellos suministren las condiciones óptimas que se pueden esperar de sus equipos.

### RELACION ENTRE LA EFICIENCIA DE COMBUSTION Y EL ANALISIS DE GASES:

El índice de eficiencia de combustión más utilizado es el porcentaje (%) de  $\text{CO}_2$  con respecto al volumen total de los gases de combustión en base seca. Es muy recomendable tener el % de  $\text{O}_2$  en los gases para completar el diagnóstico. Si se puede obtener el % de los combustibles ( $\text{CO}$  y  $\text{H}_2$ ) de los gases sería magnífico.

La eficiencia de combustión de un horno ó caldera es la cantidad de calor disponible para calentamiento que queda después de restar las pérdidas de calor que se va con los gases de chimenea del calor total generado por el combustible, entre este mismo calor total, ó sea:

$$E_c = \frac{Q_t - P_{CH}}{Q_t} = 1 - \frac{P_{CH}}{Q_t}$$

Donde:

$E_c$  - Eficiencia de combustión.

$Q_t$  - Calor total generado por el combustible.

$P_{CH}$  - Pérdidas por chimenea.

Substituyendo el poder calorífico alto del combustible (en btu/lb.) por el calor total ( $Q_t$ ) tenemos que:

$$E_c = 1 - \frac{P_{CH}}{GHV}$$

Donde;

GHV - Poder calorífico alto del combustible Btu/lb.

$P_{CH}$  - Pérdidas de calor por chimenea (humeda y seca) en btu/ lb. de combustible quemado.

Ahora; (a)  $P_{CH} = P_{chs} + P_{chh}$

Donde:

$P_{chs}$  - Pérdidas por chimenea. Calor sensible en gases de combustión. Pérdida seca. Btu/lb. de combustible quemado.

$P_{chh}$  - Pérdida por chimenea húmeda. Calor latente del vapor de agua contenido en los gases. Btu/lb. de combustible quemado.

Pero:

$$P_{chs} = W_g \cdot c_{pg} \cdot (t_g - t_a)$$

$P_{chh}$  - Para gas natural (2393). Para otros combustibles es diferente. btu/lb. combustible quemado.

$c_{pg}$  - Calor específico promedio de los gases de combustión. Para gas natural aproximadamente = 0.24 btu/lb.-°F

$W_g$  - Peso de los gases de combustión generados por libra de combustible quemado, lbs./lb.

$t_g$  - Temperatura de los gases de combustión. °F

$t_a$  - Temperatura del aire ambiente, °F.

Se hace notar que:

$$W_g = W_A + W_C = W_A + 1$$

Donde:

$W_A$  = Peso de aire suministrado para combustión, incluyendo el exceso de aire por lb. de combustible quemado, lbs./lb.

$W_C$  = Peso del combustible alimentado. Como se considera el análisis en base a 1 lb. de combustible el valor sería de 1.

SUBSTITUYENDO TENEMOS QUE:

$$E_c = 1 - \left( \frac{W_g \cdot 0.24 \cdot (t_g - t_a) + P_{chh}}{GHV} \right)$$

Para gas natural:

$$W_A = 17.2 + W_{xs} \text{ (exceso de aire)}. \quad W_{xs} = \frac{\%XS}{100} \times 17.2$$

$$GHV = 1035 \text{ btu/pie}^3 = 23,000 \text{ btu/lb.}$$

$$t_a = 70^\circ\text{F}$$

La fórmula se convierte para gas natural en:

$$E_c = 1 - \left( \frac{0.24(W_{xs} + 18.2)(t_g - 70) + 2393}{23,000} \right)$$

Esta fórmula se aplica para gas natural con aire de alimentación a 70°F con diferentes cantidades de exceso de aire y con diferentes temperaturas de gases de chimenea.

Para entrar a la fórmula anterior para gas se requiere tener  $t_g$  la temperatura de los gases de combustión. Esta temperatura se puede tomar con cualquier tipo de termómetro en el punto donde los gases de combustión abandonan el horno y entran a la chimenea.

El otro dato que se requiere para entrar a la fórmula de la eficiencia es el % de exceso de aire. Este dato lo obtenemos del análisis de los gases de combustión mediante cálculos algo complicados para diferentes combustibles pero que afortunadamente están resueltos en forma de gráficas.

Para gas natural la fórmula para encontrar el % de exceso de aire (xs) sería:

$$\%xs = (1080/\%CO_2) - 90$$

Donde, el porcentaje de  $CO_2$  es ( $\%CO_2$ ).

El contenido de oxígeno daría la confirmación de que estamos trabajando con exceso de aire. El porcentaje de gases combustibles daría una confirmación de que no hay combustibles abandonando el horno sin quemarse y por lo tanto hay buena combustión.

Afortunadamente los cálculos de combustión para cada combustible han sido resueltos y puesto en gráficas que facilitan obtener la eficiencia de combustión ( $E_c$ ) con únicamente entrar con la temperatura de gases de combustión  $t_g$  y con el contenido en porcentaje de  $CO_2$ .

Ver nomograma en la figura 2 para gas natural y figuras 3, 4 y 5 para gráficas para otros combustibles.

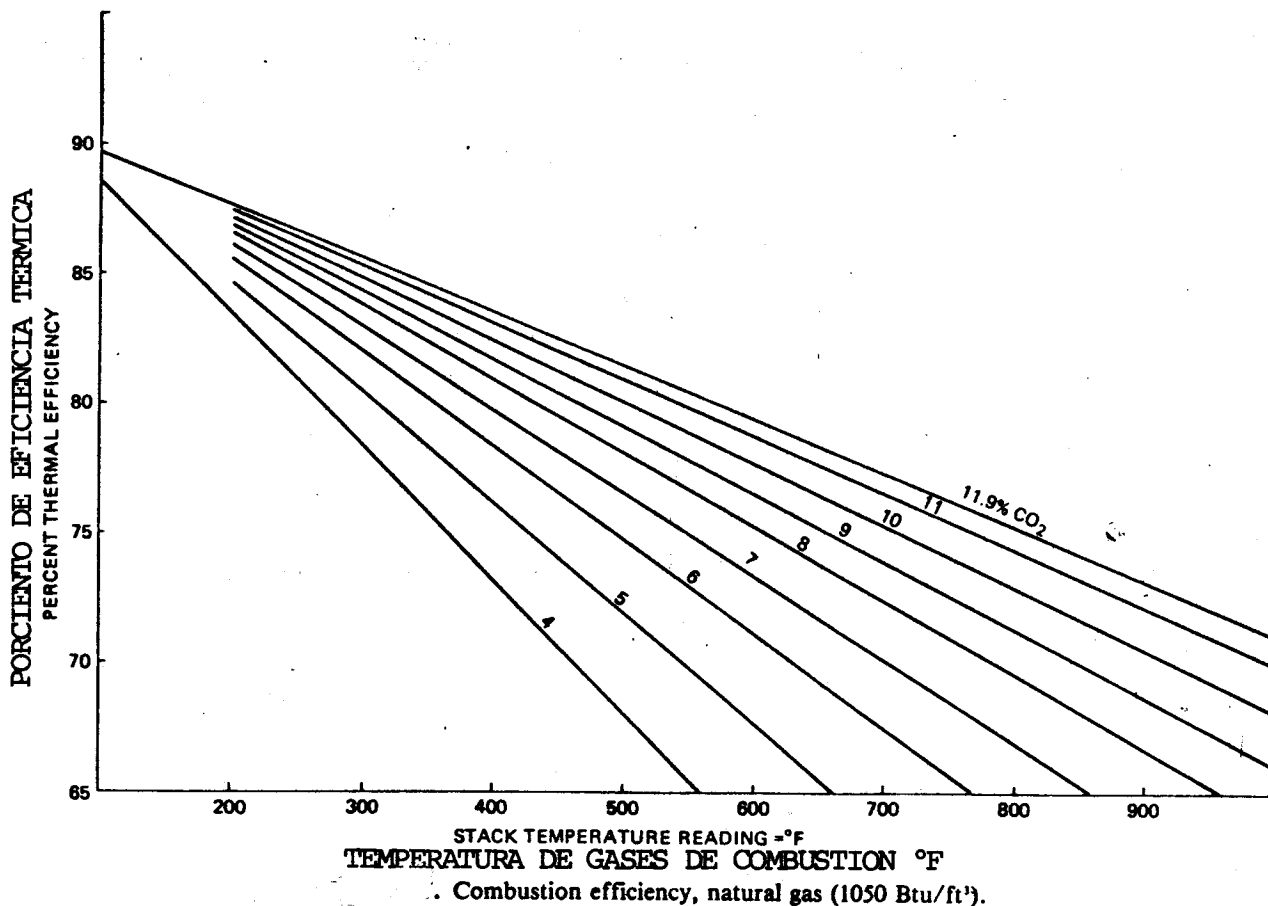


FIG. 3 GRAFICA PARA CALCULAR LA EFICIENCIA TERMICA  
-GAS NATURAL-

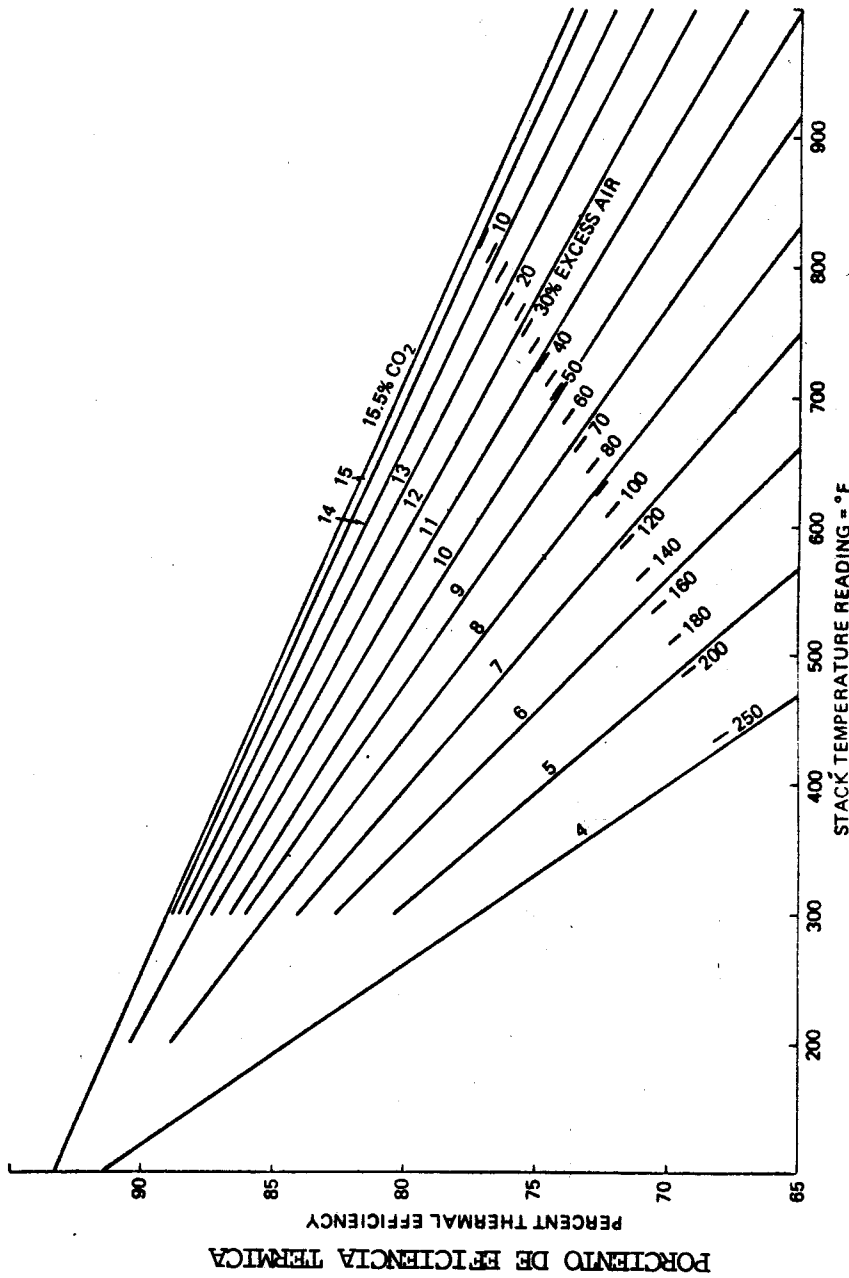
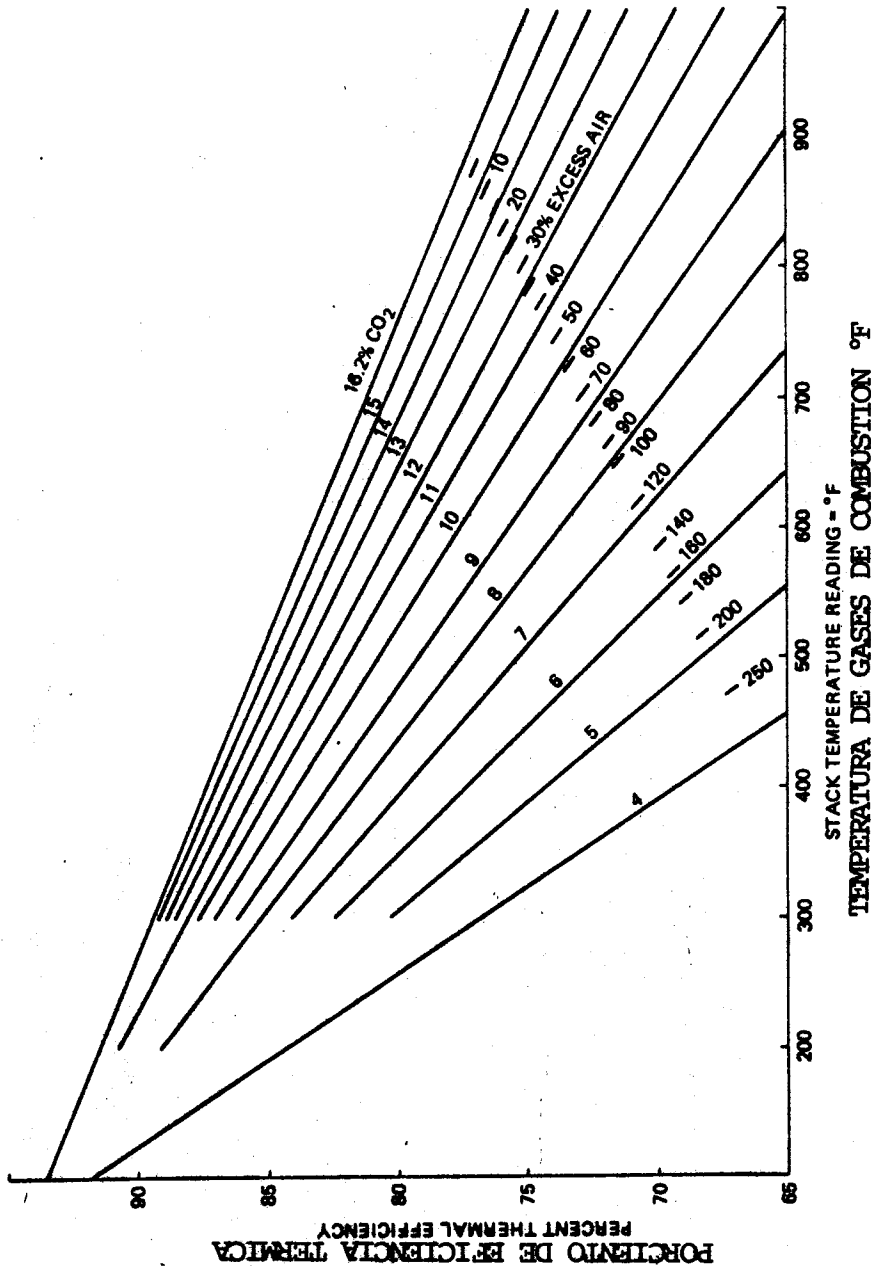


FIG. 4 GRAFICA PARA CALCULAR LA EFICIENCIA TERMICA  
Combustion efficiency, No. 2 oil.  
-DIESEL-





STACK TEMPERATURE READING - °F  
TEMPERATURA DE GASES DE COMBUSTION °F  
Combustion efficiency, No. 6 oil.

FIG. 5 GRAFICA PARA CALCULAR LA EFICIENCIA TERMICA

-COMBUSTIBLE PESADO-