

HERRAMIENTAS PARA EL USO EFICIENTE DEL GAS: DIAGRAMAS DE EFICIENCIA TÉRMICA

Andrés A. Amell A*
Edison Gil B**
Rubén Darío Maya B***

RESUMEN

En el presente trabajo se presentan los resultados de una investigación realizada con el fin de desarrollar una herramienta fundamental relacionada con el proceso de optimización de la combustión: los Diagramas de Eficiencia Térmica.

En un proceso de combustión se debe garantizar que todo el calor generado se transfiera eficientemente a la carga, por lo cual es necesario controlar las pérdidas de calor que se presentan básicamente por la salida de los gases de combustión a alta temperatura y el calentamiento del equipo. En este trabajo se estudian principalmente las formas como se disminuye la eficiencia de la combustión debido a las pérdidas de calor en los humos. Estas pérdidas se presentan básicamente por el calentamiento de estos productos, la presencia de agua en forma de vapor y la presencia de gases sin quemar (CO , H_2) como resultado de una combustión incompleta.

Con un Diagrama de Eficiencia, y conociendo las concentraciones de O_2 y CO_2 en los humos secos, a partir del muestreo de los productos por un analizador, y la temperatura de salida de estos humos, es posible calcular el rendimiento teórico de un proceso cualquiera.

Se presentan en este trabajo los Diagramas de Eficiencia en función de la temperatura y la composición de los humos secos, para diferentes gases naturales que se tienen en el país.

* **Ingeniero Mecánico. Profesor, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia. Coordinador del Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas. E-mail: anamell@catios.udea.edu.co.**

** **Ingeniero de Petróleos. Docente, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia.**

*** **Ingeniero Mecánico. Universidad de Antioquia.**

**Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía.
Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia.**

INTRODUCCIÓN.

El objetivo principal de la combustión es generar, a partir de la energía química del gas, una cantidad de calor para un determinado proceso. Para las diferentes aplicaciones industriales se hace necesario asegurar que esta transformación de energía se presente con las mínimas pérdidas de calor posibles, es decir, con una alta eficiencia. Una eficiencia alta en la combustión no solo significa una quema lo más completa del gas, sino también un proceso más económico y una reducción en la emisión de contaminantes. Es necesario garantizar que el proceso de combustión de gases sea lo más eficiente posible con el fin de hacer un uso adecuado de este energético y disminuir el impacto ambiental ocasionado por los contaminantes en los humos, como el CO.

En los equipos a gas, el calor liberado a partir de la combustión es transferido a un fluido o se utiliza calentando directamente la carga con los humos. En todos estos procesos ocurren pérdidas de calor asociadas a su operación, que se presentan básicamente por un calentamiento excesivo de las partes de los aparatos y una evacuación de humos a alta temperatura, lo cual conlleva a que no se aproveche totalmente la energía liberada al quemar el gas. Además de las pérdidas de calor que ocasionan los humos al ser evacuados a alta temperatura, se tienen otras pérdidas representadas por la combustión incompleta del gas, debido a que se desperdician gases combustibles como el CO y el H₂, y por el calor de vaporización del agua en los humos.

Los diagramas de eficiencia son una herramienta valiosa para controlar los procesos de combustión, ya que permiten obtener de manera rápida un valor de la eficiencia a partir de pocos datos: la concentración de CO₂ y O₂ en los humos secos y su temperatura.

Finalmente, estos diagramas son importantes para el trabajo en laboratorios de certificación de equipos y en proyectos de investigación sobre la

utilización de los gases en los distintos procesos industriales.

1. Consideraciones Teóricas sobre la Eficiencia de la Combustión.

En general, para cualquier proceso de combustión, la eficiencia total se define como:

$$\eta_t = \frac{Q_{\text{total}} - Q_{\text{perdido}}}{Q_{\text{total}}} \quad (1)$$

Donde:

η_t : Eficiencia total del proceso.

Q_{total} : Poder Calorífico Superior del gas que se quema.

Q_{perdido} : Calor total que se pierde en el proceso.

Las pérdidas de calor que se presentan están asociadas principalmente a los humos y la transferencia de calor por la radiación y convección hacia el equipo y los alrededores de la llama.

Debido a lo difícil de cuantificar las pérdidas de calor alrededor de la llama y el quemador, se define la eficiencia de combustión como:

$$\eta_c = \frac{Q_{\text{total}} - Q_{\text{humos}}}{Q_{\text{total}}} \quad (2)$$

Donde:

η_c : Eficiencia de combustión.

Q_{humos} : Calor que se pierde en los productos de la combustión.

El calor que se pierde con los productos de la combustión corresponde básicamente a lo siguiente^{3,9}:

- Vaporización del agua presente en los productos. Teóricamente, para liberar todo el calor que lleva el gas representado en su Poder Calorífico Superior (P.C.S.), se debería eliminar el agua de los productos en estado líquido. En realidad el agua se evacúa como vapor y se toma su calor de vaporización de ella como un calor perdido con los humos.
- Calentamiento de los humos. Además de lo dicho anteriormente, para liberar durante la reacción de combustión un calor igual al P.C.S., se deben obtener los productos a condiciones normales, esto es, 0 °C y una atmósfera. Como estos productos salen a temperaturas muy altas se presenta una pérdida de calor que es igual al calor sensible de cada componente de los humos.
- Combustión incompleta. Cuando no se quema todo el gas aparece CO y H₂ en los humos. Estos gases son combustibles y por tanto se pierde un calor potencial al evacuarlos. En este estudio se considera que todo el gas

combustible se quema, ya sea en una combustión completa o incompleta, por lo tanto no se tiene en cuenta la presencia hidrocarburos en los productos.

Otro factor que contribuye a las pérdidas de energía es el calentamiento del aire en exceso.

Luego de estas pérdidas iniciales, se tiene un calor *disponible*, que corresponde al poder calorífico del gas menos las pérdidas en los humos. Este calor representa el remanente en el equipo para calentar la carga. Sin embargo, a la carga llega un calor menor, el calor *útil*, debido a que se cede calor en las cercanías de la llama al equipo, a la premezcla que sale y a la atmósfera.

Este calor disponible es máximo cuando se tiene combustión completa, esto es, sin exceso o deficiencia de aire y con el máximo de CO₂ en los humos.

En la figura 1 se muestran las pérdidas de calor que se presenta en un sistema de combustión.

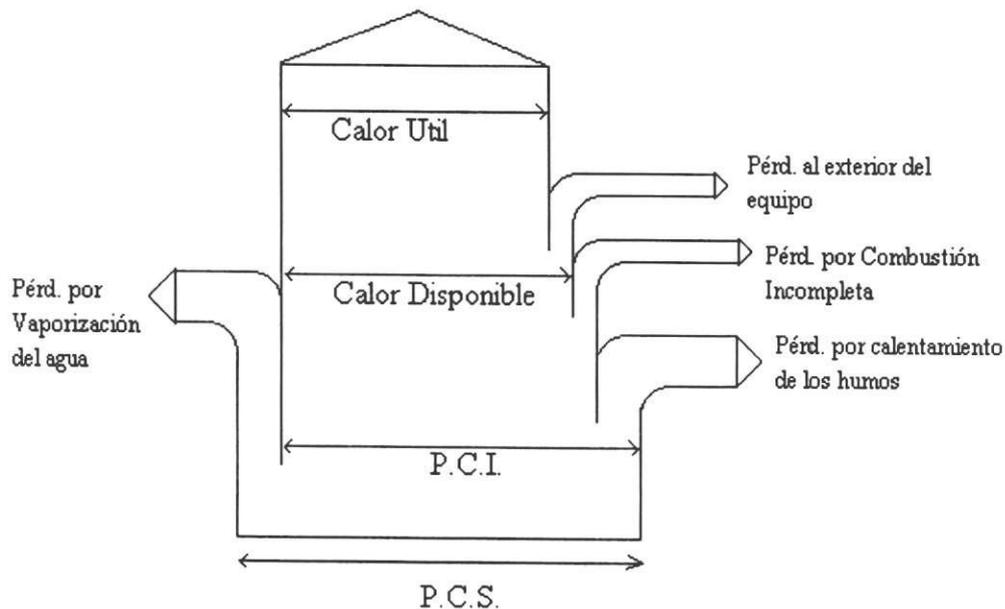


Figura1. Pérdidas de calor en un sistema de combustión.º

En la industria se utiliza el Poder Calorífico Inferior (P.C.I.) para calcular la eficiencia de combustión, esto es, no se tiene en cuenta el calor perdido por la vaporización del agua. Aunque generalmente este calor no se recupera totalmente, se puede recuperar algo de él si se trabaja el sistema a modo de condensación, lo cual constituye una de las tendencias tecnológicas recientes para mejorar la eficiencia.

Si se tiene el valor de la eficiencia calculada con base en el P.C.S. es posible hallar su valor para tener en cuenta el P.C.I. mediante la siguiente expresión:

$$\eta(\text{PCI}) = \eta(\text{PCS}) \times \frac{\text{PCI}}{\text{PCS}} \quad (3)$$

Donde:

$\eta(\text{PCS})$: Eficiencia de combustión calculada con base en el P.C. S.

$\eta(\text{P.C.I.})$: Eficiencia de combustión calculada con base en el P.C.I.

2. Cálculo de las Pérdidas de Calor.

- Vaporización del agua. El calor de vaporización del agua a 15 °C es igual a 44.43 kJ/mol (0.55 kWh/m³)⁶. Así, a partir del porcentaje de vapor de agua presente en los productos se calcula este calor latente como:

$$L(\text{H}_2\text{O}) = \frac{\gamma_{\text{H}_2\text{O}}}{100} \times V_{\text{HHX}} \times 0.55 \quad (4)$$

Donde:

$L(\text{H}_2\text{O})$: Calor latente de vaporización del agua, kWh/m³ gas.

$\gamma_{\text{H}_2\text{O}}$: Porcentaje del agua presente en los humos.

V_{HHX} : Volumen de humos húmedos, m³/ m³ gas.

- Calentamiento de los humos. A partir de la composición de los humos se calcula la entalpía de cada componente como:

$$\Delta H_i = \frac{\gamma_i}{100} \times V_{\text{HHX}} \int_{T_o}^{T_f} C_{p_i} dT \quad (5)$$

Donde:

ΔH_i : Calor sensible (entalpía) de los diferentes componentes de los humos, kWh/m³ gas.

γ_i : Porcentaje de CO₂, O₂, H₂O, N₂, CO y H₂ en los humos húmedos.

C_{p_i} : Capacidad Calorífica a presión constante de cada componente, MJ/m³ K

T_f : Temperatura de salida de los humos, K

T_o : Temperatura a condiciones estándar, 288.15 K

La capacidad calorífica se puede calcular con la expresión ⁶:

$$C_p = R(A + BT + CT^2 + DT^{-2}) \quad (6)$$

Donde A, B, C, D son constantes para cada gas, y R la constante universal de los gases. Por conveniencia se define una capacidad calorífica *media*,

$$C_{pm} = \frac{\int_{T_o}^{T_f} C_p dt}{T_f - T_o} \quad (7)$$

Al sustituir C_p de la Ec. (6) en la Ec. (7) e integrar se obtiene:

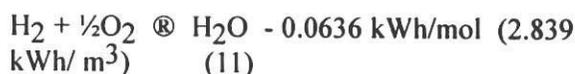
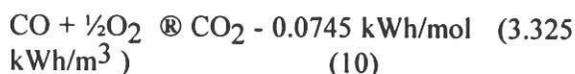
$$C_{pm} = R\left(A + BT_m + \frac{C}{3}(4T_m^2 - T_f T_o) + \frac{D}{T_f T_o}\right) \quad (8)$$

Donde $T_m = (T_f + T_o)/2$. Con esta expresión es posible calcular ΔH_i como sigue:

$$\Delta H_i = \frac{\gamma}{100} \times V_{HHX} \times C_{pmi} (T_f - T_o) \quad (9)$$

Donde C_{pmi} es la capacidad calorífica media del componente i .

- Combustión incompleta. Para la combustión de CO y H_2 se tienen las siguientes reacciones⁶:



Así, a partir de los volúmenes de CO y H_2 en los humos se calculan las pérdidas de calor como:

$$L(CO) = \frac{\gamma_{CO}}{100} \times V_{HHX} \times 3.325 \quad (12)$$

$$L(H_2) = \frac{\gamma_{H_2}}{100} \times V_{HHX} \times 2.839 \quad (13)$$

Donde:

$L(CO)$: Calor que se pierde por la *no* combustión del CO que sale de la llama, kWh/m³ gas.

$L(H_2)$: Calor que se pierde por la *no* combustión del H_2 que sale de la llama, kWh/m³ gas.

g_{CO} : Porcentaje de CO en los humos.

g_{H_2} : Porcentaje de H_2 en los humos.

Las pérdidas totales de calor se calculan sumando las pérdidas por calor sensible, ecuación (9), las pérdidas por vaporización del agua, ecuación (4), y las pérdidas por combustión incompleta, ecuaciones (12) y (13).

3. Configuración y Alcance de los Diagramas de Eficiencia.

En las figuras 2 a la 7 se muestran los diagramas de eficiencia para los principales gases colombianos. Como se puede ver, estos diagramas consisten en una serie de curvas de diferentes valores de eficiencia, calculada con la ecuación (2), que están en función de la composición del gas, la temperatura de los humos y de su composición en base seca.

El Poder Calorífico se calculó con base en la composición que se tiene de cada gas, y para evaluar las distintas pérdidas de calor en los productos se diseñó un programa en lenguaje FORTRAN. Los datos necesarios para correr el programa son:

- Composición del gas combustible.
- Porcentaje de CO_2 y O_2 en los humos secos.
- Temperatura de salida de los humos.

A partir de estos valores el programa calcula la composición de los humos húmedos, el volumen de agua en ellos y las pérdidas de calor con las ecuaciones descritas anteriormente.

Para encontrar el valor de la eficiencia utilizando los diagramas se hace lo siguiente:

- Ubicar el diagrama respectivo para el gas empleado y la temperatura de salida de los humos.
- Con los valores de los porcentajes de O_2 y CO_2 se ubica el punto en el diagrama y se lee directamente el valor de eficiencia de la curva respectiva.

4. Ilustraciones del Uso de los Diagramas de Eficiencia.

A continuación se trabajará un ejemplo para ilustrar el manejo de estos diagramas. Durante el control de la combustión de un sistema alimentado con gas de Guajira, se midió la temperatura de los humos, $T = 300^{\circ}\text{C}$, y mediante un analizador se observó un contenido de $\text{CO}_2 = 9.0\%$ y $\text{O}_2 = 2.0\%$.

En la figura correspondiente al gas de Guajira para 300°C se ubica el punto correspondiente. Acá se observa que el punto se localiza entre las curvas de 70 y 60% de eficiencia. El valor para la eficiencia es entonces del 67%.

5. Conclusiones.

1. El análisis de los productos de la combustión es fundamental para evaluar la eficiencia de un proceso. Este análisis, junto con la medición de la temperatura de humos, permite calcular las pérdidas de calor en un sistema de combustión y determinar su eficiencia.
2. Para el desarrollo eficiente y seguro en el uso industrial del gas natural, los diagramas de eficiencia son herramientas importantes para el control y optimización de los distintos procesos.
3. Para la construcción de un diagrama de eficiencia, el conocimiento de la composición química del gas es fundamental, ya que a partir de esta se genera la información necesaria (algunas propiedades de combustión) para la elaboración de los algoritmos. Es importante también precisar la temperatura de equilibrio de llama, con el fin de encontrar su respectiva constante de equilibrio.
4. El estudio llevado a cabo ha permitido generar un programa que denominamos GASCOL, de alcance general, el cual a partir

de la composición de un determinado gas natural, proporciona los siguientes resultados:

- Propiedades de combustión.
 - Análisis del tipo de combustión, composición de humos secos y factor de utilización del aire.
 - Eficiencia térmica del proceso.
5. Por medio de la aplicación del programa GASCOL se generó la siguiente información para los gases colombianos:
 - Propiedades de combustión.
 - Elaboración de los Diagramas de Combustión.
 - Diagramas de Eficiencia Teórica.

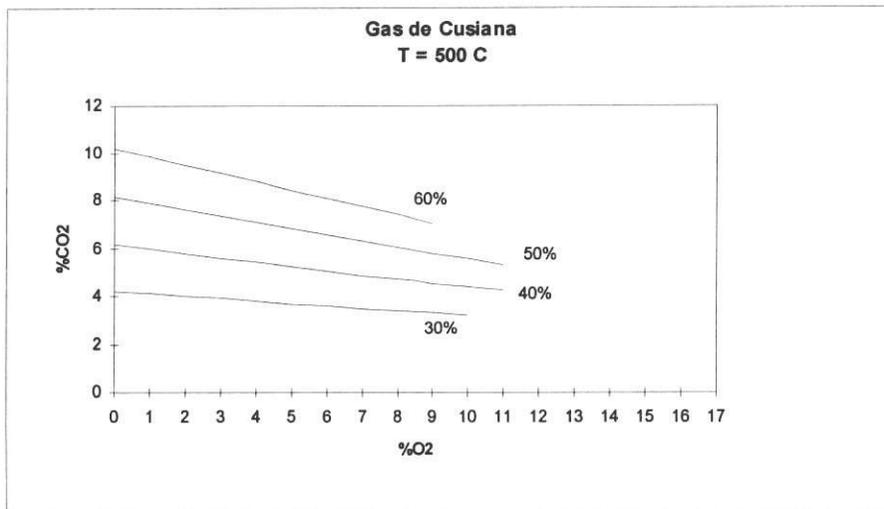
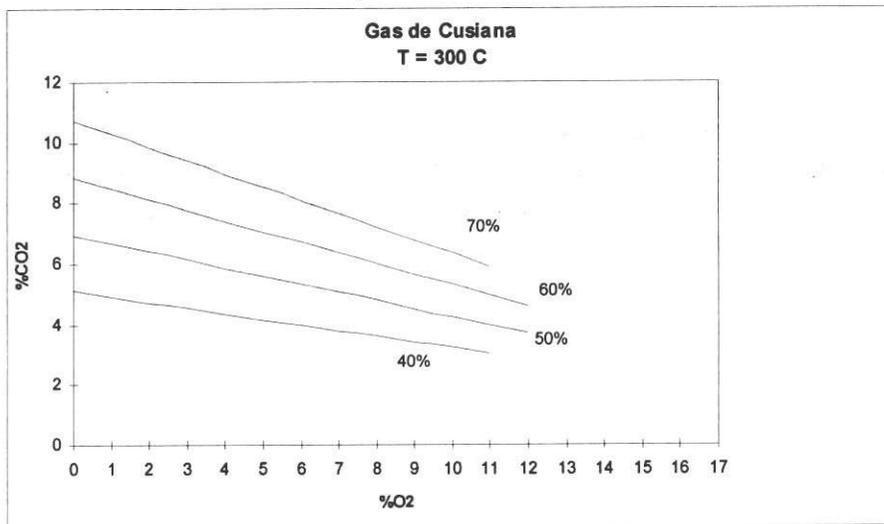
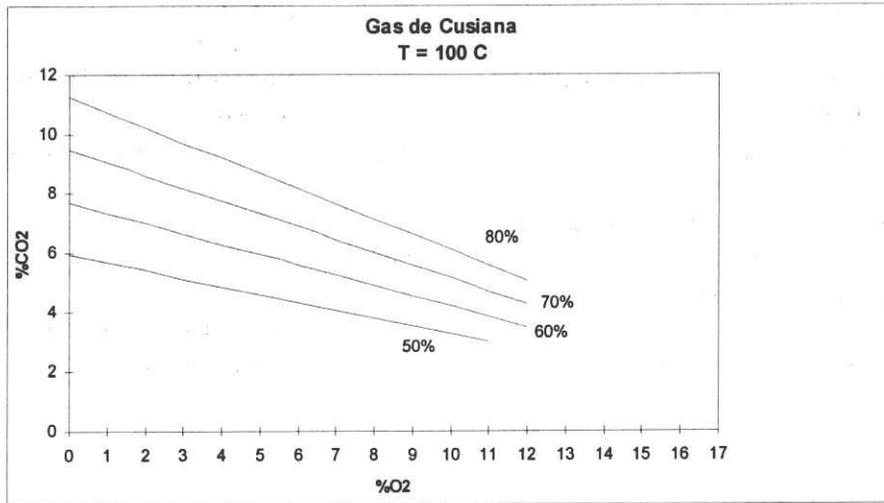
6. Nomenclatura.

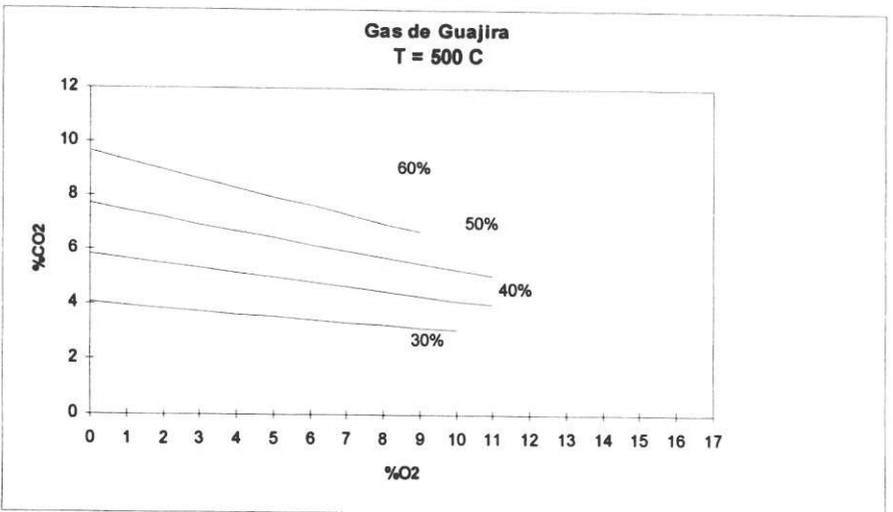
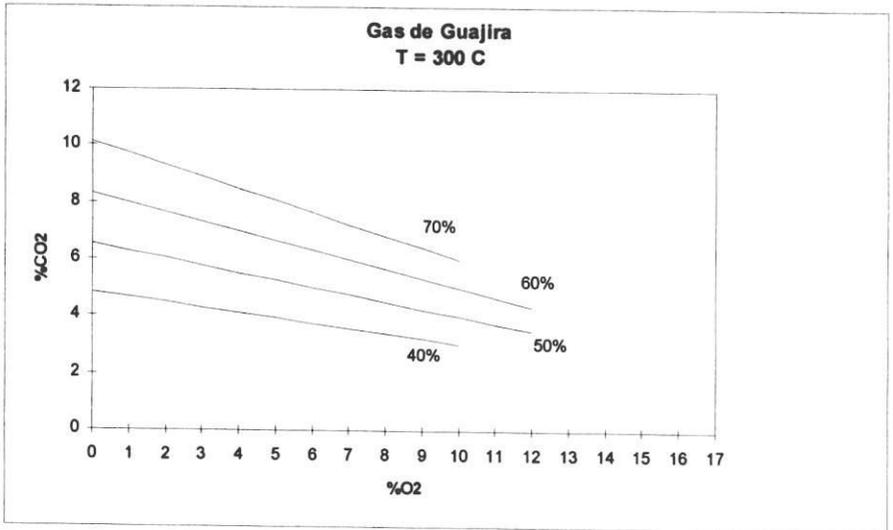
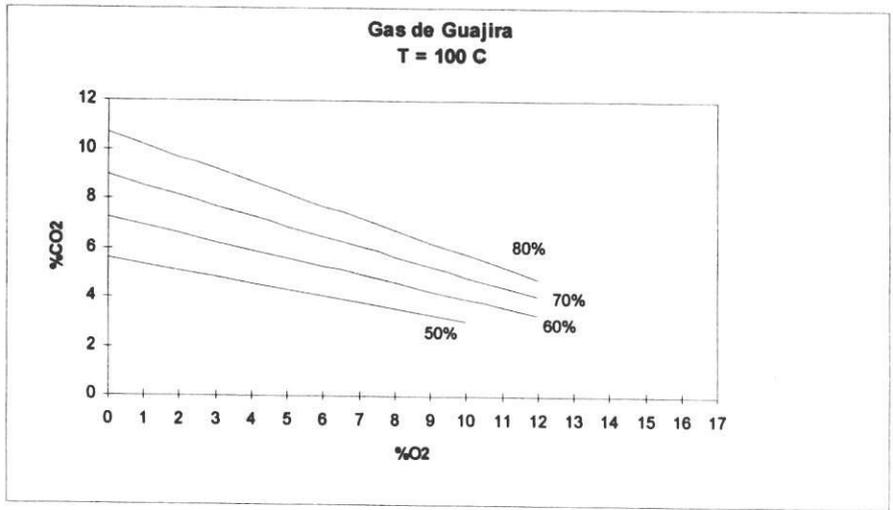
Cp:	Capacidad Calorífica a presión constante, $\text{MJ}/\text{m}^3\text{K}$
d:	Gravedad específica del gas.
h_c :	Eficiencia de combustión.
h_t :	Eficiencia total.
H_i :	Entalpía de los productos de combustión.
K:	Constante de equilibrio de la reacción del gas de agua.
$L(\text{H}_2\text{O})$:	Calor latente de vaporización del agua, kWh/m^3 gas.
$L(\text{H}_2)$:	Calor que se pierde por la <i>no</i> combustión del H_2 que sale de la llama, kWh/m^3 gas.
$L(\text{CO})$:	Calor que se pierde por la <i>no</i> combustión del CO que sale de la llama, kWh/m^3 gas.
P.C.I.:	Poder Calorífico Inferior, $\text{MJ}/\text{m}^3(\text{n})$ gas.
P.C.S.:	Poder Calorífico Superior, $\text{MJ}/\text{m}^3(\text{n})$ gas.
R:	Cte universal de los gases.
Tf:	Temperatura de salida de los humos, K
To:	Temperatura a condiciones estándar, K
V_{hum} :	Volumen de humos húmedos, $\text{m}^3(\text{n})$ humos / $\text{m}^3(\text{n})$ gas.

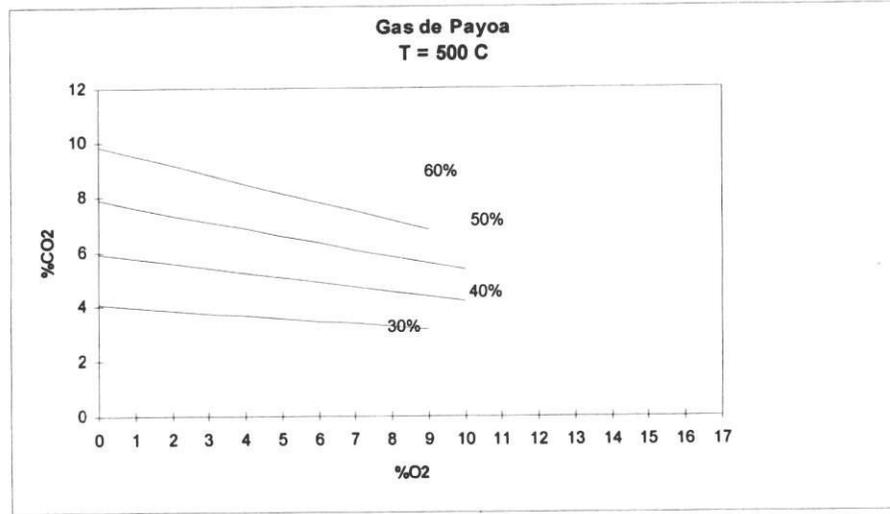
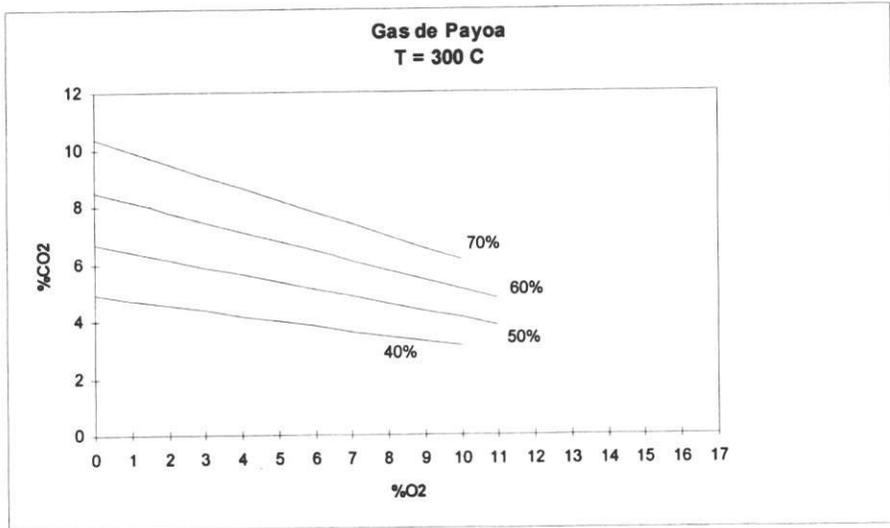
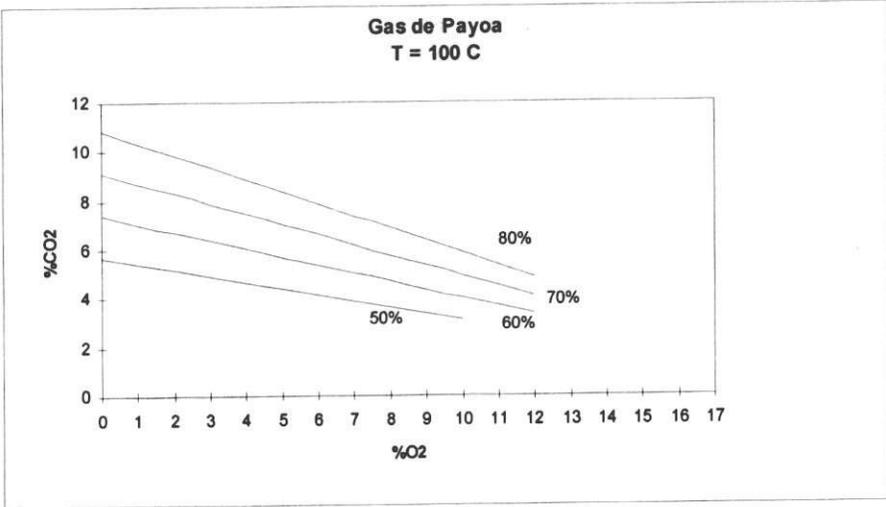
V_{HS} :	Volumen de humos secos, $m^3(n)$ humos / $m^3(n)$ gas.	gCO :	Porcentaje de CO en los humos húmedos.
VCO_2 :	Volumen teórico de CO_2 producido en una combustión estequiométrica, $m^3(n)$ de $CO_2/m^3(n)$ gas.	gH_2 :	Porcentaje de H_2 en los humos húmedos.
VH_2O :	Volumen teórico de H_2O producido en una combustión estequiométrica, $m^3(n)$ de $H_2O/m^3(n)$ gas.	g_{H_2O} :	Porcentaje de H_2O en los humos húmedos.
VN_2 :	Volumen de N_2 producido, $m^3(n)/m^3(n)$ gas.	Subíndices:	
gCO_2 :	Porcentaje máximo de CO_2 en los humos secos.	n:	Condiciones normales, Presión = 1 atm; Temperatura = 273.15 K.
		m:	mezcla.

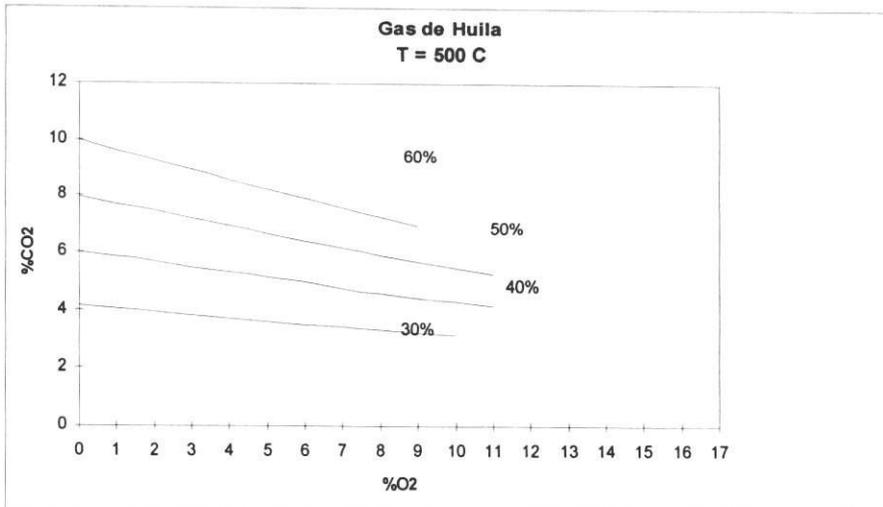
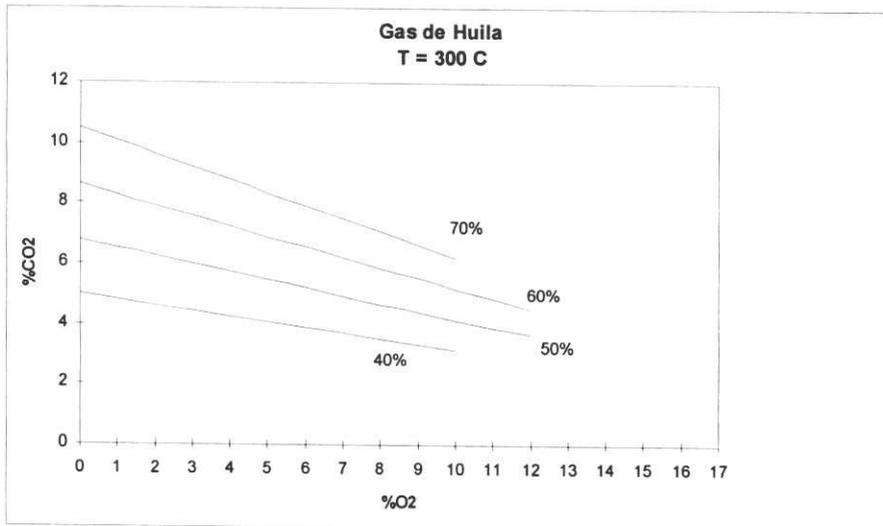
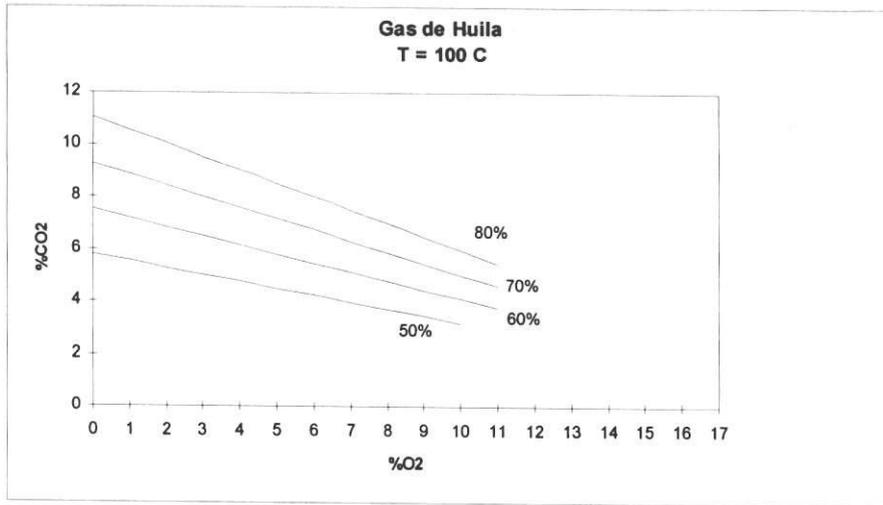
AGRADECIMIENTOS

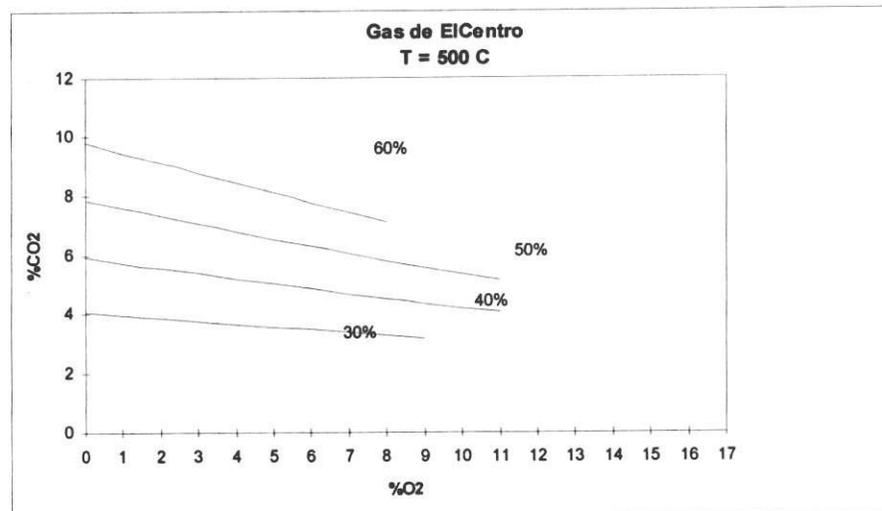
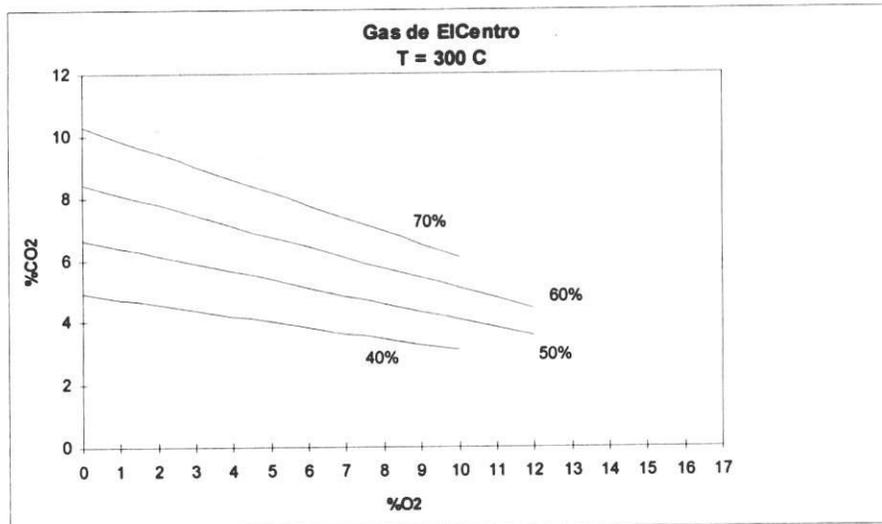
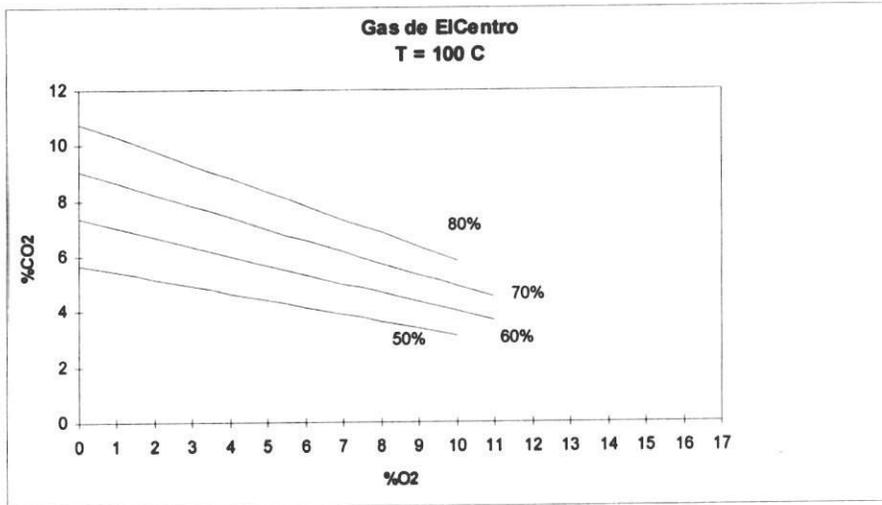
Al Comité para el Desarrollo de la Investigación, CODI, adscrito a la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad de Antioquia, que con fondos provenientes de la Estampilla Municipal y Departamental financió el proyecto de la Elaboración de los Diagramas de Combustión de los Gases Colombianos. También hacemos extensivos estos agradecimientos al Centro de Investigaciones Ambientales y de Ingeniería CIA, por su apoyo logístico al desarrollo de este proyecto.

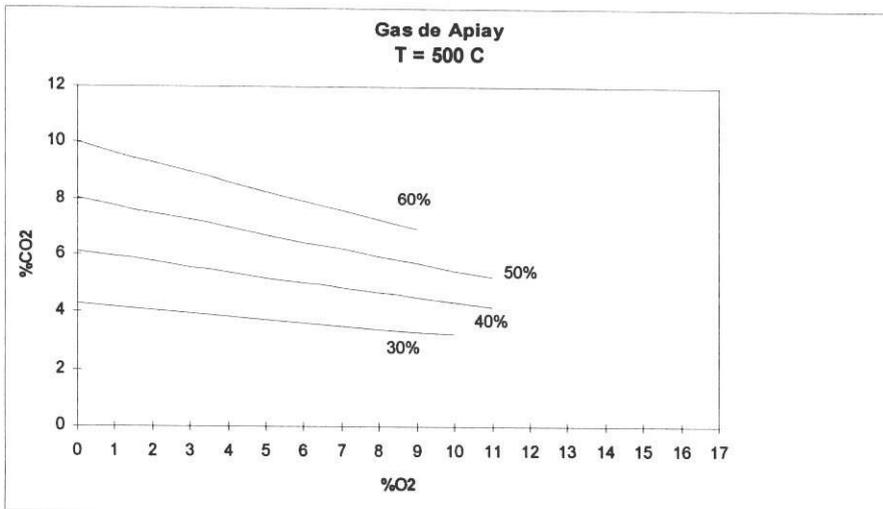
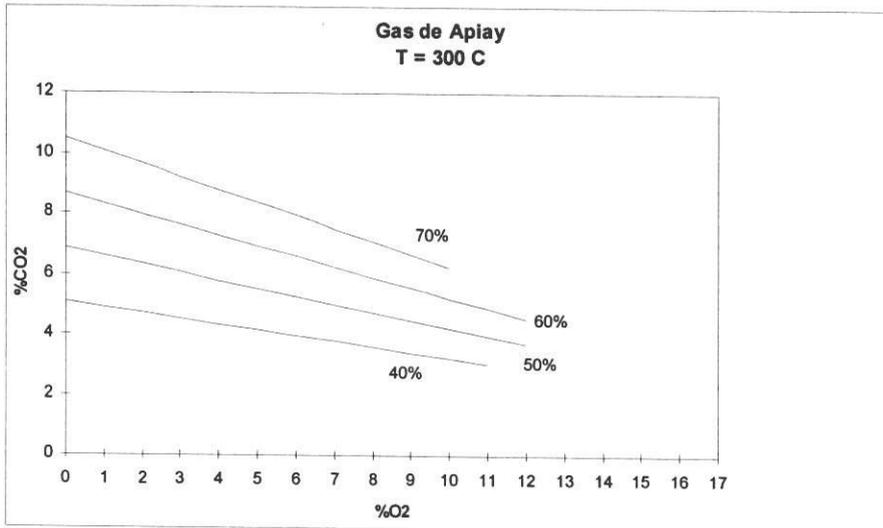
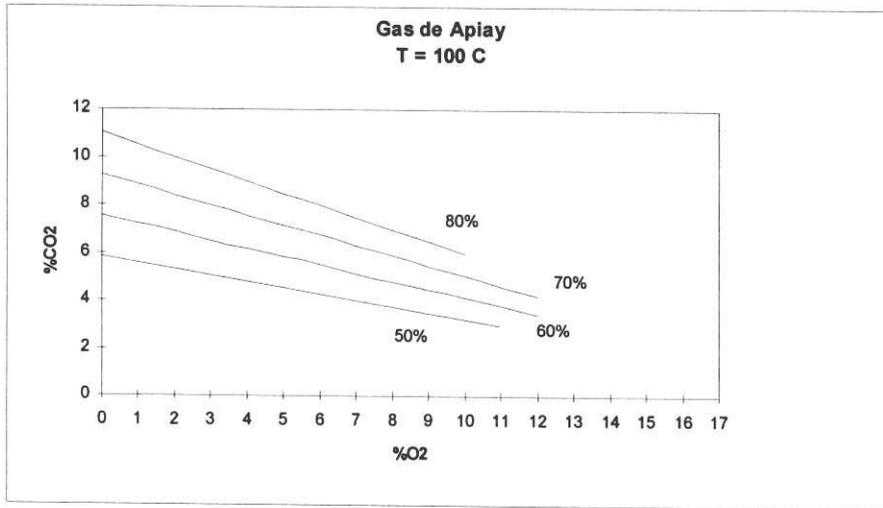












BIBLIOGRAFÍA

1. AMELL, A., BARRAZA L., Gómez, E. *Curso Tecnología de la Combustión de Gases y Quemadores Atmosféricos de Premezcla*. Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas, Universidad de Antioquia, Medellín, octubre 3-7, 1994.
2. North American Combustion Handbook. Vol. I: *Combustion, Fuels, Stoichiometry, Heat Transfer and Fluid Flow*. Third Edition, Cleveland, OH, USA, 1986. 332 p.
3. F.M. Veyretout - Gaz de France. Curso Internacional Teórico-Práctico: *Equipos y Sistemas Para la Utilización Doméstica del Gas Combustible*. Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería, Medellín, 1993.
4. TORRELLA ALCARAZ, E. y GÓMEZ MÁRQUEZ, F. *Caracterización del Tipo de Combustión*. Revista Montajes e Instalaciones. Vol 18, Nos. 205, 207, 208, 209. 1988.
5. *Características del Gas Natural Distribuido en Colombia*. Revista ACOGAS. No. 14, 1996. Páginas 26 y 27.
6. SMITH J. M. y H.C. Van Ness. *Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química*. Cuarta Edición. Editorial MacGraw-Hill, México, 1989.
7. MÁRQUEZ MARTÍNEZ, Manuel. *Combustión y Quemadores*. Serie Productiva, Marcombo S.A. Barcelona, España, 1992. 160 páginas.
8. GÁRDINER, William C.,: *Química de la Llama*. Revista Investigación y Ciencia. Barcelona. Vol. 67, Abril de 1982, pág. 58-70.
9. Association Technique de L'industrie du Gaz en France (ATG). *Collection des techniques gazières: Calcul, Conception et Utilisation des Bruleurs Industriels a Gaz*. Paris.
10. Association Technique de L'industrie du Gaz en France (ATG). *Combustibles Gaseux et Principes de la Combustion*. BT No. 104, Edition 1992. Gaz de France, Paris.
11. PRITCHARD, R., Guy, J.J., Connor, N.E. *Handbook of Industrial Gas Utilization. Engineering Principles and Practice*. Van Nostrand Reinhold Co., London, 1977. 772 p.