

HERRAMIENTAS PARA EL USO EFICIENTE DEL GAS: DIAGRAMAS DE COMBUSTIÓN

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

RESUMEN

En este 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 Combustión.

Con la optimización se busca utilizar al máximo el calor generado en la reacción y evitar la producción de contaminantes, producto de una combustión incompleta. Esto se realiza básicamente controlando la estabilidad de la llama y la composición de los humos por medio del ajuste de la relación aire/combustible y con una mezcla homogénea. Un monitoreo constante de los humos secos permite determinar la presencia de contaminantes y establecer el tipo de combustión que se está presentando.

Una herramienta valiosa para establecer las condiciones en las cuales se está realizando el proceso, es el Diagrama de Combustión. Este Diagrama utiliza los valores de la concentración de O_2 y CO_2 en los humos secos, a partir del muestreo de los productos

por un analizador, para determinar la composición de estos humos (porcentajes de H_2 , CO y N_2), el porcentaje de aire realmente utilizado, el aire en exceso y el tipo de combustión que se efectúa. Estos diagramas se encuentran en la literatura para gases de otros países, por lo tanto es fundamental generarlos para los gases disponibles en los yacimientos colombianos.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad la combustión es el principal mecanismo que se emplea en nuestro medio para la producción de calor en los procesos industriales. En este campo de la combustión, además del estudio de los diferentes fenómenos involucrados en ella, resulta fundamental realizar estudios tendientes a la optimización de los diferentes procesos. La optimización viene impuesta no solo por la necesidad de explotar al máximo las reservas disponibles de gas, sino también por un condicionante de tipo social como es la polución ambiental. Para esto se debe:

- Generar y utilizar la máxima cantidad de calor, básicamente logrando una combustión completa.

* Ingeniero Mecánico. Profesor, Facultad de Ingeniería. 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.

*** Estudiante de Ingeniería Mecánica. Universidad de Antioquia.

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

- Evitar la producción de contaminantes como el Monóxido de Carbono (CO) y los óxidos de Nitrógeno (NO_x), que resultan perjudiciales para la salud.

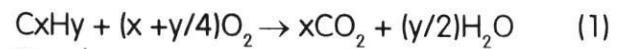
En los equipos industriales era escaso el control de la combustión en estos aspectos, pero la evolución del mercado energético ha llevado a encontrar la forma de utilizar los combustibles de la mejor manera, lo cual conlleva a mejorar la eficiencia en los procesos.

Los Diagramas de Combustión aparecen como una herramienta valiosa para el control de la combustión, ya que a partir de la composición del gas y de los humos se puede determinar el tipo de combustión que se está dando y así tener criterios técnicos para ajustar el proceso y hacerlo más eficiente. Estos diagramas se encuentran en la literatura para gases de otros países¹, por lo tanto es fundamental generarlos para los gases disponibles en los diferentes yacimientos y sus posibles mezclas que serán distribuidas para todo el país mediante el sistema nacional de gasoductos.

Finalmente, estos diagramas son importantes para el trabajo en laboratorios de certificación de equipos y en proyectos de investigación como el de la intercambiabilidad de gases, los estudios de impacto ambiental y los distintos usos del gas en el sector industrial.

1. CONSIDERACIONES TEÓRICAS

El proceso de combustión comienza con una reacción exotérmica autosostenida y avanza por reacciones rápidas en cadena, que se suceden en etapas, las cuales dependen del tipo de combustible. Cuando se quema un hidrocarburo gaseoso con Oxígeno se produce Dióxido de Carbono y agua. La reacción general es la siguiente:



Donde

x : Número de átomos de Carbono en el gas
y : Número de átomos de Hidrógeno en el gas.

La expresión anterior representa una combustión completa a condiciones estequiométricas. Si no se completa la reacción aparecen además el Monóxido de Carbono y el Hidrógeno en los productos finales.

La formación de CO₂ y vapor de agua a partir de los reactivos no es directa. La ruptura de las moléculas del gas y la formación de productos proceden a través de numerosas reacciones en cadena. Estas reacciones son procesos químicos autosostenidos que consisten en una serie de reacciones en las cuales se forman productos intermedios en unas etapas y se consumen en otras. Las reacciones elementales se llaman *pasos propagadores de la cadena* y los átomos y radicales que participan en la propagación de la misma se denominan *transportadores de cadena*.

1.1 Propiedades de la Combustión de los Gases.

Con el fin de simplificar el estudio de las reacciones de combustión y evaluar la eficiencia del proceso en aspectos como la máxima utilización del calor generado y la producción de inquemados, se definen a continuación algunas características o propiedades comunes a todos los combustibles, especialmente relacionadas con los productos.

- *Volumen de aire teórico, V_a*. Es el volumen de aire, en m³(n), que se necesita para quemar completamente un metro cúbico de gas cuando estos se mezclan en proporciones estequiométricas de

acuerdo a la reacción que se muestra en la ecuación (1). Asumiendo comportamiento ideal, se observa que por cada $m^3(n)$ de gas C_xH_y se necesitan $(x+y/4)$ $m^3(n)$ de Oxígeno. Si se toma el Nitrógeno presente en el aire como inerte (sin reaccionar ni formar productos), éste aparece en los productos sin quemarse. La reacción mostrada en (1) se puede escribir también como:



El volumen de aire estequiométrico en función del volumen de Oxígeno, VO_2 , para la combustión es entonces:

$$Va = VO_2/0.21 = 4.76VO_2 = 4.76(x+y/4) \quad (3)$$

- Volumen total de Dióxido de Carbono, VCO_2 . Es el volumen, en $m^3(n)$, de CO_2 producido en la combustión completa de $1 m^3(n)$ de gas. De la reacción mostrada en (1) se tiene:

$$VCO_2 = X \quad (4)$$

- Volumen total de agua, VH_2O . Son los $m^3(n)$ de vapor de agua producidos por la combustión completa de $1 m^3(n)$ de gas:

$$VH_2O = Y/2 \quad (5)$$

- Volumen total de Nitrógeno, VN_2 . Son los $m^3(n)$ de N_2 presentes en los humos al quemar $1 m^3(n)$ de gas con una cantidad de aire igual a la estequiométrica. Se calcula como:

$$VN_2 = 0.79Va + yN_2 \quad (6)$$

Donde:

y N_2 : Fracción volumétrica del N_2 en el gas combustible.

- Volumen de humos húmedos, V_{HH} . Son los $m^3(n)$ de humos producidos por la combustión completa de $1 m^3(n)$ de gas con el aire teórico. La expresión general es:

$$1 m^3(n) \text{ gas} + Va \rightarrow VCO_2 + VH_2O + VN_2 \quad (7)$$

De acuerdo a la expresión anterior, El V_{HH} se calcula como:

$$V_{HH} = VCO_2 + VH_2O + VN_2 \quad (8)$$

- Volumen de humos secos, V_{HS} . Es el volumen de productos secos (sin vapor de agua) producidos por la combustión de $1 m^3(n)$ de gas con el aire teórico. Se calcula como:

$$V_{HS} = VCO_2 + VN_2 \quad (9)$$

- Porcentaje máximo de Dióxido de Carbono, g_0CO_2 . Es la relación entre el volumen de CO_2 producido en la combustión completa y el volumen de humos secos:

$$g_0CO_2 = VCO_2 / V_{HS} \quad (10)$$

Esta característica es muy importante ya que al compararla con el porcentaje de CO_2 real, leído en un analizador de humos secos, se pueden conocer las condiciones en las cuales se desarrolla la combustión.

- Poder Calorífico (P.C.). Es la cantidad de calor que se obtiene por la combustión de $1 m^3(n)$ de gas con un volumen de aire Va , obteniendo los productos a $0^\circ C$ y 1 atm . Cuando se considera que el agua presente en los humos se encuentra en forma líquida, se habla de *Poder Calorífico Superior*. Si se considera en estado de vapor, se habla de *Poder Calorífico Inferior*.

- Índice de Wobbe, W. Se define como la relación entre el poder calorífico superior y la raíz cuadrada de la gravedad específica del gas.

$$w = \frac{PCS}{\sqrt{d}} \quad (11)$$

- Límites de Inflamabilidad, L.I. Estos límites hacen referencia al porcentaje en volumen de gas que se debe tener en la mezcla gas-aire para que pueda darse la reacción. Existen un límite inferior (LII) y un límite superior (LSI) fuera de los cuales, aunque la mezcla esté expuesta a una temperatura alta, la mezcla no se enciende.
- Temperatura de Rocío, Tr. Es la temperatura de los humos en la cual se inicia la condensación del vapor de agua presente en ellos. Para calcularla es necesario hallar primero la presión de vapor, que en el momento de la condensación del agua es igual a la presión de saturación de los humos. Esta presión se calcula así:

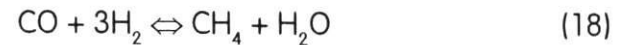
$$P_{sat} = P_{vap} = \frac{V_{H_2O}}{V_{HH}} \times P_t \quad (12)$$

Donde P_t es la presión total, generalmente la presión atmosférica. Con este valor de presión de saturación se va a una tabla de vapor saturado y se lee la temperatura correspondiente.

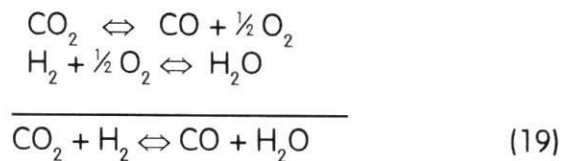
1.2 Disociaciones.

Bajo ciertas condiciones, en especial a temperaturas altas, ocurre el fenómeno de *disociación*. Este es simplemente una reacción inversa a la combustión, es decir, la ruptura de los productos para convertirse nuevamente en combustibles y Oxígeno. Este

proceso absorbe una fracción del calor que originalmente fue liberado por la reacción. Las reacciones que pueden darse son:



La cantidad de disociaciones es función de la temperatura y se expresa por la constante de equilibrio K de la reacción correspondiente. Las reacciones de disociación que más ocurren en un rango de temperatura de llama entre 1200 - 1800 °C son las dos primeras, que juntas forman la llamada reacción del gas de agua:



En este estudio sólo se tendrá en cuenta esta reacción de disociación. La constante de equilibrio para esta reacción, en función de la temperatura, es:

$$\ln K = -5872.374/T - 1.86 \ln T + 0.00027T + 58200/T^2 + 18.013 \quad (20)$$

Como se ve, es importante especificar la temperatura de llama de equilibrio a la cual se presenta la reacción de disociación. Para gas natural en llamas de premezcla, se ha detectado que esta temperatura se encuentra entre los 1400 y 1600 K 3, 4 por lo tanto un valor representativo puede ser 1500 K.

1.3 Tipos de Combustión.

Para quemar $1 \text{ m}^3(n)$ de gas se necesita un volumen teórico de aire, V_a , para obtener una combustión neutra o estequiométrica. El aire y el gas tienen un movimiento rápido y su contacto se produce en un período muy corto; la mezcla gas-aire no es siempre homogénea ya que en muchos casos el aire admitido no se utiliza en su totalidad, bien sea por falta o por exceso. Por esta razón se han definido varios tipos de combustión dependiendo del volumen de aire realmente empleado. Este volumen se expresa como :

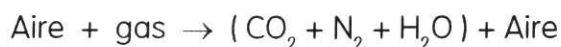
$$V_t = n \cdot V_a \quad (21)$$

Donde n es el factor de aire, que se define como la relación entre el volumen de aire realmente usado para combustión y la cantidad de aire necesario para la combustión estequiométrica (V_a), ambos bajo las mismas condiciones. Así, de acuerdo con el valor de n se tendrán diferentes niveles de combustión⁹.

1.3.1 Combustión estequiométrica. Esta se consigue cuando el aire y el gas reaccionan en cantidades teóricas dadas por las reacciones balanceadas. En este caso, la proporción de aire n es igual a uno y los productos no contienen Oxígeno libre ni elementos inquemados, presentándose el máximo volumen de CO_2 .

1.3.2 Combustión completa con exceso de aire.

En este caso se utiliza un volumen de aire mayor al teórico, siendo $n > 1$. El exceso no toma parte en la reacción y se encuentra en los productos, absorbiendo parte del calor que se genera.



Como en los productos se encuentra Oxígeno, la combustión también se denomina *oxidante*.

1.3.3 Combustión incompleta con deficiencia de aire.

Esta se presenta cuando el aire utilizado es menor que el teórico y todo el Oxígeno se consume en el proceso. La deficiencia se expresa como $(1-n)$. El combustible no es completamente oxidado y en los productos de la reacción se encuentran, además del CO_2 y el vapor de agua, monóxido de Carbono e Hidrógeno, productos de una reacción incompleta. Debido a la presencia de elementos reductores en los productos (CO , H_2), esta combustión se denomina también *reductora*.

1.3.4 Combustión incompleta con mezcla deficiente.

Esta combustión es obtenida cuando en los humos se encuentran productos de una combustión completa (CO_2 , H_2O), gases combustibles y oxígeno. La situación puede presentarse cuando al tenerse temperatura bastante elevada en la zona de reacción, mayores de $1600 \text{ }^\circ\text{C}$, ocurre disociación de los productos iniciales. En el caso más general, esto puede suceder porque se realice localmente una combustión incompleta por mezcla no homogénea, por temperatura insuficiente, o por un enfriamiento brusco.

Se suelen considerar los productos de esta combustión como la suma de los productos de una combustión incompleta con deficiencia de aire, más aire adicional sin usar. Así, en la mayor parte de los casos, el aire admitido no se utiliza en su totalidad en el proceso. Por esto se debe considerar el factor de aire total n como la suma de una cantidad de aire n_1 que realmente reacciona con el gas más una cantidad de aire n_2 que no interviene en la combustión y actúa como diluyente de los productos finales.

En consecuencia, dependiendo de los valores de n_1 y n_2 se pueden clasificar los diferentes tipos de combustión. Esto se muestra en el siguiente tabla⁴:

Tabla 1. Tipos de combustión.

n_1	n_2	Tipo de combustión
1	0	Neutra
1	> 0	Oxidante
< 1	0	Reductora
< 1	> 0	Mixta

2. CONFIGURACIÓN Y ALCANCE DE UN DIAGRAMA DE COMBUSTIÓN.

Con la optimización se busca utilizar al máximo el calor generado en la reacción y evitar la producción de contaminantes, producto de una combustión incompleta. Esto se realiza básicamente controlando la composición de los humos por medio del ajuste de la relación aire/combustible y la homogeneización de la mezcla.

Una herramienta valiosa para establecer las condiciones en las cuales se está realizando el proceso es el diagrama de combustión. Este diagrama utiliza los valores de la concentración de O_2 y CO_2 en los humos secos, o la relación CO/CO_2 y la concentración de O_2 , a partir del muestreo de los humos por un analizador, para determinar los porcentajes de H_2 , CO y N_2 , los factores de utilización de aire (n_1 y n_2) y el tipo de combustión que se efectúa. Este diagrama recibe el nombre de diagrama de Ostwald en honor a su inventor.

Por esto, disponiendo del diagrama de combustión de un gas determinado y un analizador de gases de combustión, se puede diagnosticar el proceso, lo cual permite introducir ajustes para llevar la combustión a un estado óptimo, esto es, con una alta eficiencia y bajas emisiones de inquemados, H_2 y CO .

2.1 Descripción del diagrama. En la Figura 1 se muestra esquemáticamente el diagrama de combustión con las principales curvas.

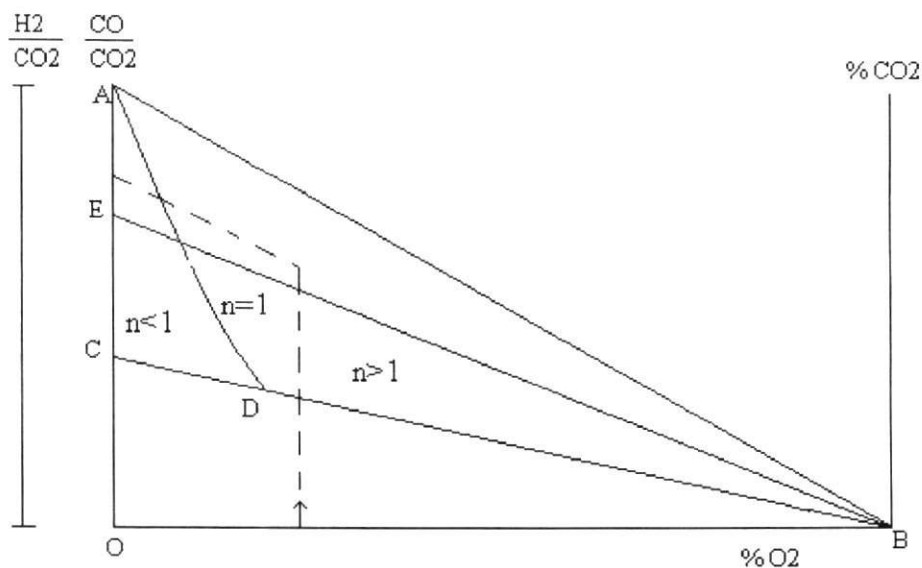


Figura 1. Esquema general de un diagrama de combustión².

- AD : Línea de factor de aire n cte.
- EB : Líneas de relación RO (CO/CO_2)cte.
- AB : Línea de Grebel, combustión completa con exceso de aire.
- A : Combustión neutra o estequiométrica.
- OA : Combustión incompleta con deficiencia de aire ($n < 1$, $\% \text{O}_2 = 0$).
- ACB : Zona de combustión incompleta con mezcla deficiente.
- OCB : Zona de combustión endotérmica. El calor contenido en los humos es menor al calor liberado. La combustión no se efectúa sin aporte externo de calor

En el eje horizontal se trazan las cantidades de Oxígeno en los productos de combustión secos y sobre la ordenada diferentes valores de la relación CO/CO_2 , que se llama RO. El contenido de CO_2 se ubica en un eje a la derecha del diagrama. El punto de combustión neutra está sobre la ordenada, correspondiente al máximo contenido de CO_2 , mientras que las combustiones completas con exceso de aire (oxidantes) están representadas por la línea trazada desde el punto de combustión neutra hasta el punto que representa el aire puro ($\% \text{O}_2 = 21$), llamada línea de Grebel. Las combustiones incompletas con deficiencia de aire (reductoras) están sobre la ordenada OA ($\% \text{O}_2 = 0$). La parte interior del triángulo representa las combustiones incompletas con mezcla deficiente, en las cuales el factor de aire total es: $n = n_1 + n_2$.

Con los valores de $\% \text{CO}_2$ y $\% \text{O}_2$ se ubica el punto en el diagrama. Si el punto cae exactamente sobre la línea de Grebel, se lee n y se calcula el exceso como $(n-1)$.

Si el punto cae dentro del triángulo ACB se lee el valor de n , luego se lleva el punto por la línea de CO/CO_2 correspondiente hasta el

eje de la ordenada y se lee el factor de aire utilizado, n_1 . Para hallar n_2 , o sea el aire en exceso, se hace $n_2 = n - n_1$. En la figura 1 se ilustra este procedimiento con la línea punteada.

El porcentaje de CO se calcula directamente a partir del valor de CO/CO_2 leído. En cuanto al porcentaje de H_2 , este se calcula con el valor de la relación H_2/CO_2 que se lee en el diagrama.

3. CRITERIOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UN DIAGRAMA DE COMBUSTIÓN

Para elaborar los diagramas de combustión es necesario conocer la composición del gas utilizado, lo cual permite determinar algunas variables como el volumen de dióxido de Carbono en los humos (V_{CO_2}), el volumen de agua ($V_{\text{H}_2\text{O}}$), el volumen de aire teórico (V_a) y el porcentaje máximo de CO_2 . Todas estas variables inciden en la configuración del diagrama, es por esto que para cada gas existe un diagrama propio.

En los diagramas se tienen dos familias de curvas: las rectas para diferentes valores de la relación CO/CO_2 (RO) y las curvas para diferentes valores del factor de aire total n . Para construir cada una de ellas se obtienen expresiones que relacionan el contenido de CO_2 en los humos secos (g_{CO_2}) con el contenido de O_2 (g_{O_2}). En el caso más general, es decir, cuando la combustión no es estequiométrica sino incompleta con mezcla deficiente, los gases que se consideran presentes en los humos son el CO_2 , el CO, el H_2O , el H_2 , el O_2 y el N_2 .

La idea es expresar los volúmenes de los diferentes gases que se pueden presentar en los productos en función de variables conocidas para un gas específico (V_{CO_2} , $V_{\text{H}_2\text{O}}$, V_a , K) y de una variable auxiliar

llamada RO. Estas relaciones también permiten calcular el volumen y la composición de los humos para determinar el tipo de combustión y evaluar las pérdidas de calor asociadas al proceso.

4. RESULTADOS

En las figuras 2 a la 7 se presentan los diagramas de combustión para los gases representativos de Colombia, los cuales fueron construidos a partir de un programa de computador. En éste se calcula, a partir de la composición del gas y de los humos secos, el contenido de CO y H₂ con los cuales se obtienen las coordenadas para trazar las diferentes curvas. Asimismo, en la tabla 2 y 3 se presentan las principales propiedades de la combustión de estos gases.

En el caso de los diagramas presentados en este trabajo se utilizó una temperatura de reacción de 1500 K. El programa permite generar resultados cuando se considera una temperatura diferente.

5. ILUSTRACIONES DEL USO DEL DIAGRAMA

Para ilustrar la utilización de estos diagramas se tiene el siguiente ejemplo:

Durante el control de la combustión de un sistema alimentado con gas de Huila se midieron los siguientes valores de la temperatura y composición de los humos:

$$\begin{aligned} T &= 200 \text{ }^\circ\text{C} \\ \text{CO}_2 &= 10.5\% \\ \text{O}_2 &= 1.5\% \end{aligned}$$

Determinar el tipo de combustión que se tiene, los porcentajes de aire empleado y en exceso y la composición de los humos secos.

· Solución : Para el gas de Huila se utiliza la figura correspondiente a este gas. En este caso el punto cae dentro del triángulo, para un valor de n entre 1 y 1.1. El valor aproximado de n es 1,3. Además se observa que la relación CO/CO₂ es igual a 0.1, lo cual significa que el porcentaje de CO es:

$$\text{CO} = 10.5 \times 0.1 = 1.05\%$$

Al movernos por esta recta de RO = 0.1 hasta el eje de las ordenadas se encuentra que el valor de n_1 está entre 1 y 0.9, y tiene un valor aproximado de 0.96. Ya que $n = n_1 + n_2$, el valor de n_2 se calcula como:

$$n_2 = 1.03 - 0.96 = 0.07 \text{ (7\% de exceso o de aire no utilizado).}$$

Para este caso se tiene una combustión mixta. Para calcular el porcentaje de H₂ se procede así: sobre el eje vertical se lee que para RO = 0.1 el valor de H₂/CO₂ es 0.07. Entonces, para CO₂ = 10.5 se tiene que el porcentaje de H₂ es:

$$\% \text{ H}_2 = 10.5 \times 0.07 = 0.735 \%$$

El porcentaje de N₂ se calcula como:

$$\% \text{ N}_2 = 100 - \% \text{ CO}_2 - \% \text{ CO} - \% \text{ H}_2 - \% \text{ O}_2$$

$$\% \text{ N}_2 = 100 - 13.785 = 86.215 \%$$

6. CONCLUSIONES

- Para el desarrollo eficiente y seguro en el uso industrial del gas natural, los diagramas de combustión son herramientas imprescindibles para el control y optimización de los distintos procesos.
- Para la construcción de un diagrama de combustión, 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.

En la construcción de un diagrama de combustión también es importante precisar la temperatura de equilibrio, con el fin de encontrar su respectiva constante de equilibrio.

- c. 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.
- d. Por medio de la aplicación de los programas elaborados se generó la siguiente información para los gases colombianos:
- Propiedades de combustión.
 - Elaboración de los Diagramas de Combustión.
 - Diagramas de Eficiencia Teórica.

7. NOMENCLATURA

- d: Gravedad específica del gas.
- K: Constante de equilibrio de la reacción del gas de agua.
- L.I.I.: Límite inferior de Inflamabilidad.
- L.S.I.: Límite superior de Inflamabilidad.
- n: Factor de aire, $m^3(n)$ aire real / $m^3(n)$ aire teórico.
- n1: Factor de aire realmente utilizado en la combustión.
- n2: Factor de aire no utilizado, que aparece como exceso en los humos.

P.C.I.: Poder Calorífico Inferior, MJ/ $m^3(n)$ gas.

P.C.S.: Poder Calorífico Superior, MJ/ $m^3(n)$ gas.

RO: Relación CO/CO₂ en los humos secos.

Tr: Temperatura de Rocío, K.

Va: Volumen de aire teórico, $m^3(n)$ aire / $m^3(n)$ gas.

V_{HH}: Volumen de humos húmedos, $m^3(n)$ humos / $m^3(n)$ gas.

V_{HS}: Volumen de humos secos, $m^3(n)$ humos / $m^3(n)$ gas.

VCO₂: Volumen teórico de CO₂, $m^3(n)$ de CO₂ / $m^3(n)$ gas.

VH₂O: Volumen teórico de H₂O, $m^3(n)$ de H₂O / $m^3(n)$ gas.

VN₂: Volumen de N₂ producido, $m^3(n)$ / $m^3(n)$ gas.

W: Índice de Wobbe, MJ/ $m^3(n)$ gas.

gCO₂: Porcentaje máximo de CO₂ en los humos secos.

g_{O2}: Porcentaje de H₂O en los humos húmedos.

Subíndices:

n: Condiciones normales, Presión = 1 atm; Temperatura = 273.15 K. m: mezcla.

Tabla 2. Propiedades de la combustión.

Nombre del Gas	Propiedades de la Combustión							
	d	Va	TII	P.C.S.	P.C.I.	W	L.S.I.	L.I.I
CAMPO								
Apiay	0.644	10.129	2013	41.73	37.63	52.0	15.0	4.82
Payoa	0.616	10.236	2032	42.74	38.55	54.47	14.71	4.69
El Centro	0.598	9.896	2037	41.26	37.17	53.37	14.94	4.85
Huila	0.665	10.365	1990	43.11	38.96	52.87	14.78	4.66
Guajira	0.567	9.439	2034	39.40	35.43	52.34	15.14	5.06
Cusiana	0.734	11.036	1975	47.71	41.42	53.36	14.54	4.42

Tabla 3. Características de los humos.

Nombre del Gas	Características de los Humos								
	Vol. de Humos		VCO ₂	VH ₂ O	VN ₂	γCO ₂	Comp. Volumétrica de humos húmedos		
	Vfo	Vfo					%CO2	%H2O	%N2
CAMPO									
Apiay	11.147	9.11	1.108	2.037	8.00	12.17	9.94	18.27	71.79
Payoa	11.287	9.20	1.106	2.087	8.09	12.02	9.8	18.49	71.71
El Centro	10.918	8.881	1.06	2.036	7.83	11.94	9.71	18.65	71.64
Huila	11.406	9.341	1.144	2.065	8.20	12.25	10.03	18.10	71.87
Guajira	10.438	8.463	0.995	1.975	7.47	11.76	9.53	18.92	71.55
Cusiana	12.122	9.99	1.252	2.132	8.73	12.53	10.33	17.59	72.08

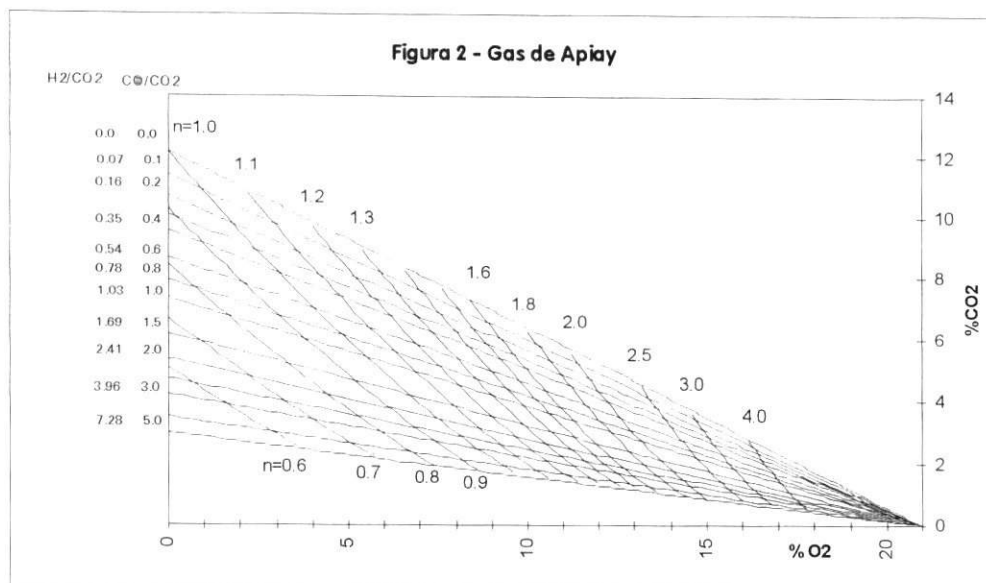


Figura 3 - Gas de Cusiana

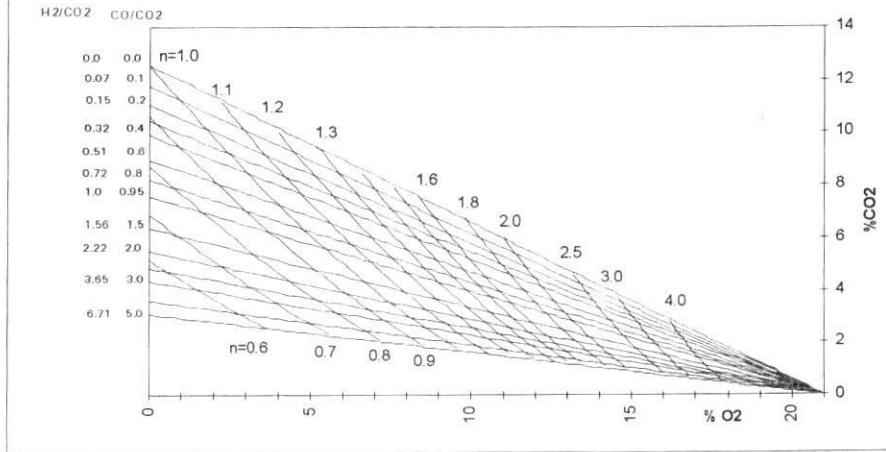


Figura 4 - Gas de Guajira

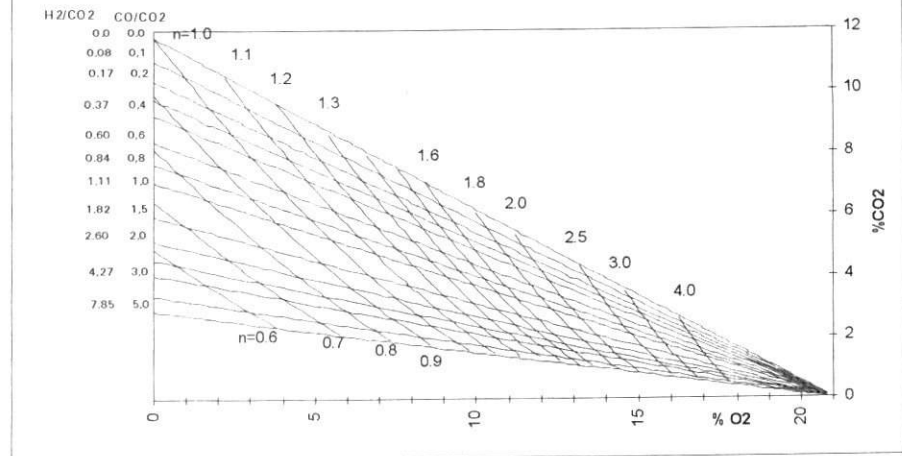
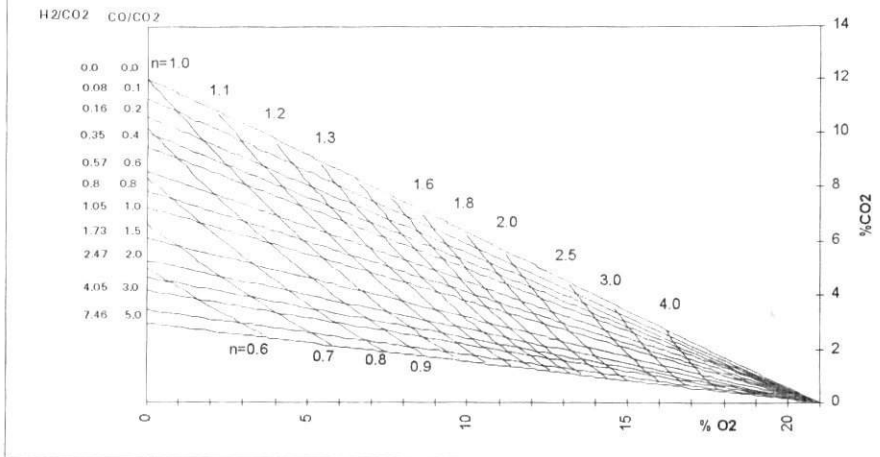
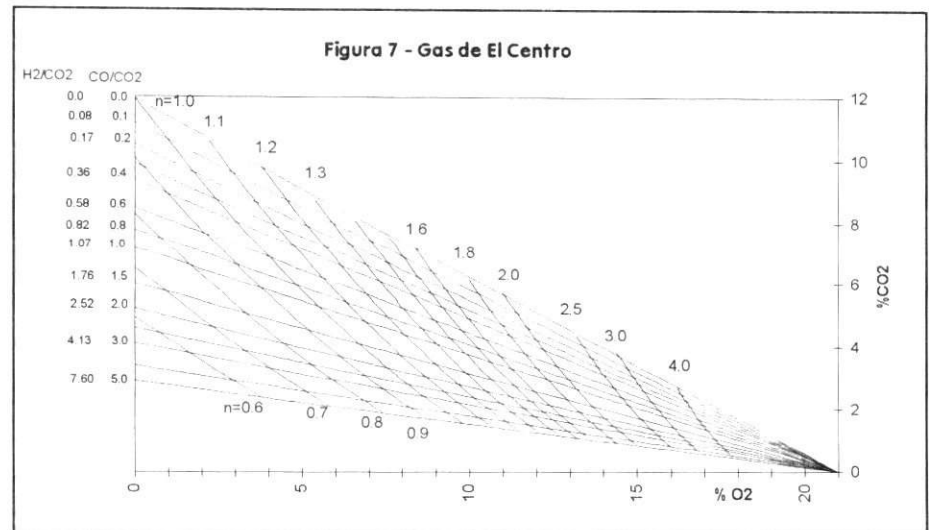
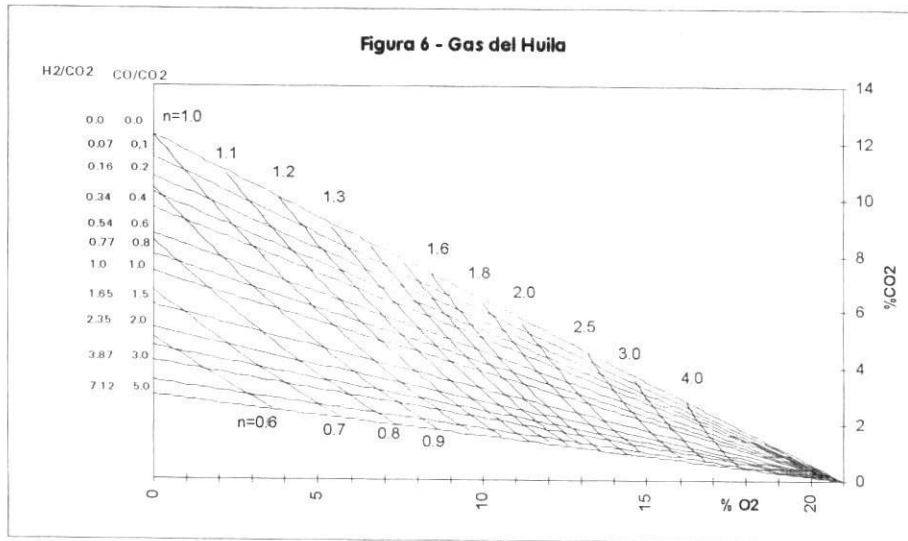


Figura 5 - Gas de Payoa





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.

REFERENCIAS

1. AMELL, A.; L. BARRAZA, E. GÓMEZ. *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. VEYRETOU, F.M. - 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 A. E. y GÓMEZ M. 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. pp. 26 y 27.
6. SMITH, J.M. y VAN NESS, H.C. *Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química*. Cuarta Edición. Editorial MacGraw-Hill, México, 1989.
7. MÁRQUEZ M., Manuel. *Combustión y Quemadores*. Serie Productiva, Marcombo S.A. Barcelona, España, 1992. 160 p.
8. GARDINER, William C.,: *Química de la Llama*. Revista Investigación y Ciencia. Barcelona. Vol. 67, Abril de 1982, pp. 58-70.
9. 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.
10. Association Technique de L'industrie du Gaz en France (ATG). *Collection des techniques gazières: Calcul, Conception et Utilisation des Bruleurs Industriels a Gaz*. Paris.