

**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
UNIDAD CULHUACAN**



**ESTUDIO TERMODINÁMICO DE LA  
COMBUSTIÓN APLICADO A UN GENERADOR  
DE VAPOR DE 350 MW**

**Autores:  
Guillermo Jarquin López, Georgiy Polupan**

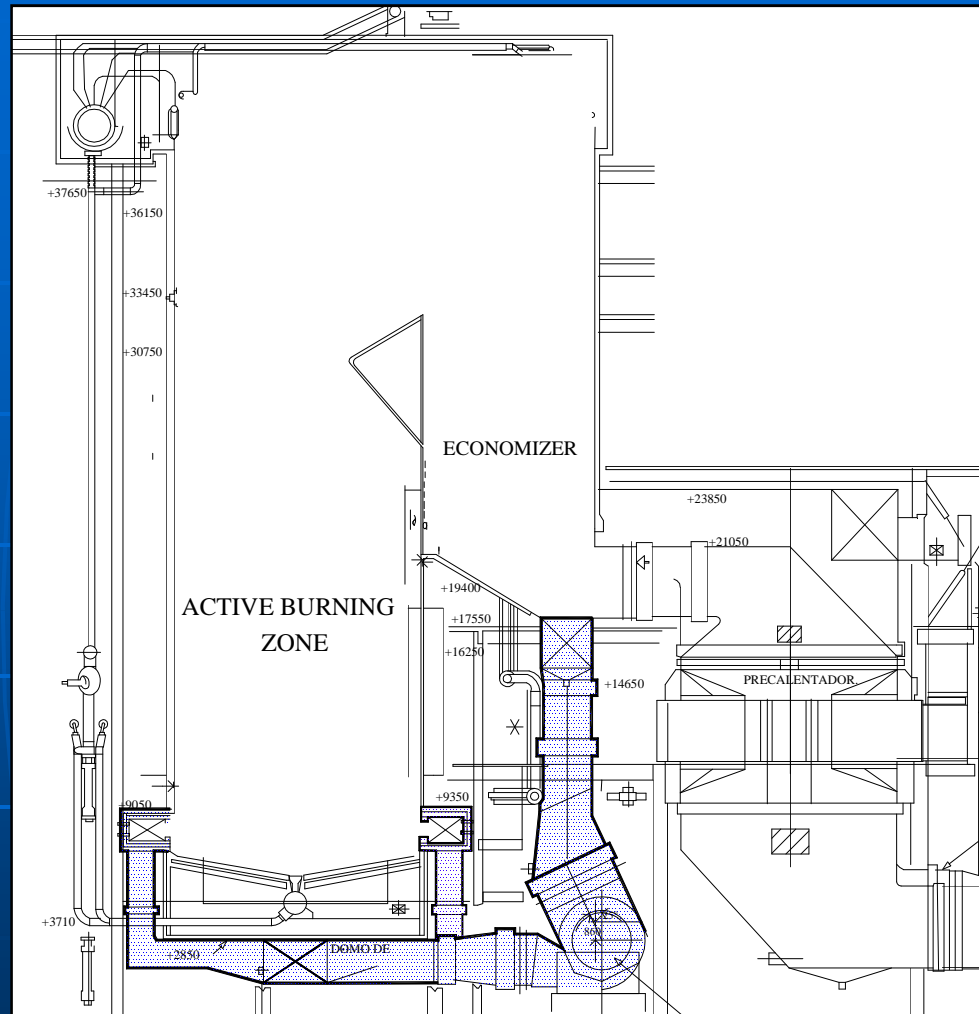
# CONTENIDO

---

- ✦ Descripción del Generador de vapor
- ✦ Desarrollo de la metodología de cálculo de los productos de la combustión y sus propiedades termodinámicas
- ✦ Resultados obtenidos
- ✦ Conclusiones



Generador de vapor  
de 350 MW



# Generador de vapor de 350 MW

Se presenta el cálculo de la combustión del combustóleo y gas natural del generador de vapor de 350 ton/h, instalado en la planta termoeléctrica "Jorge Luque", México.

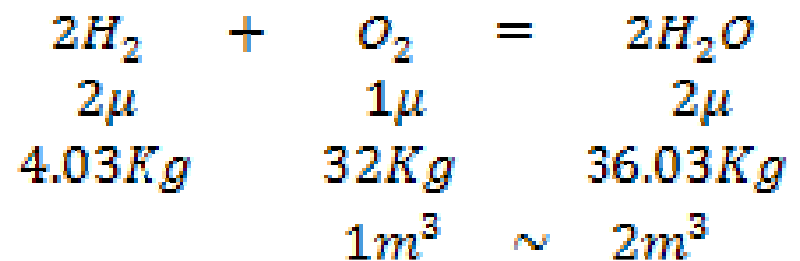
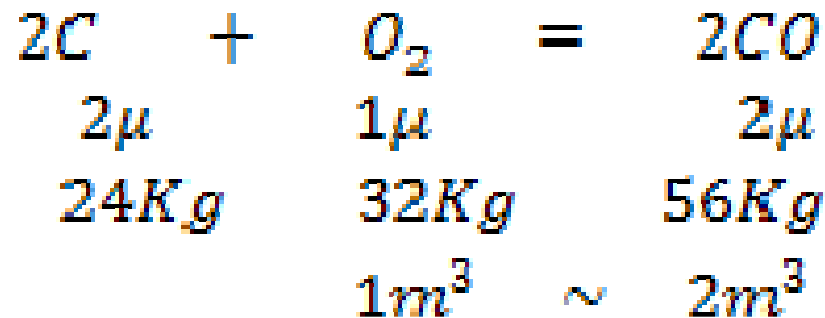
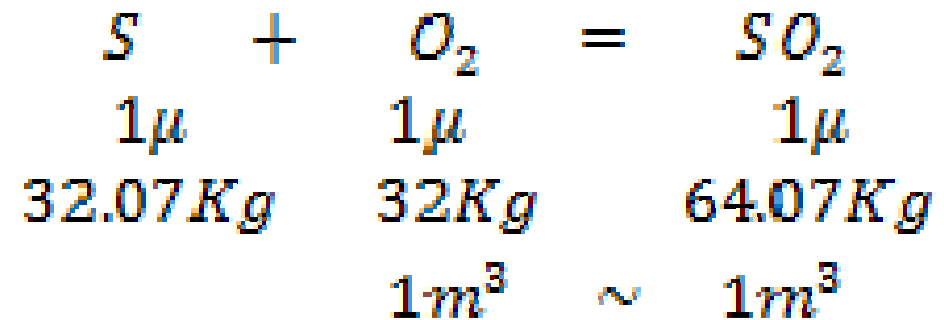
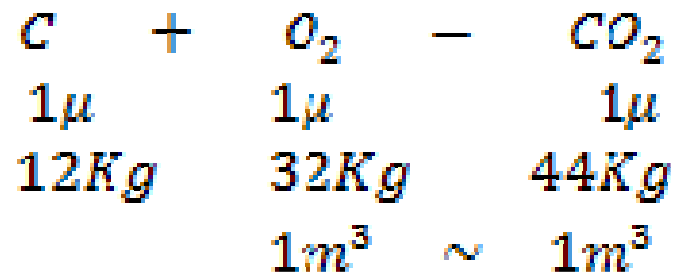


Fig. 2  
Combustión del  
gas natural en  
un quemador  
tangencial del  
generador de  
vapor de 350  
ton/h

# METODOLOGÍA DE CÁLCULO

---

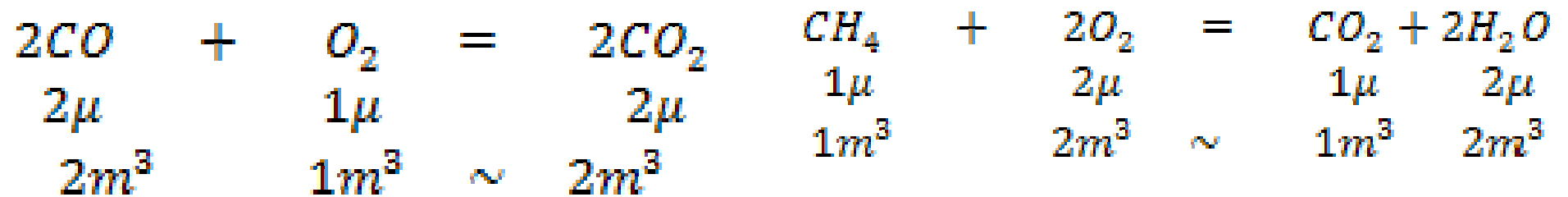
Relaciones estequiométricas.



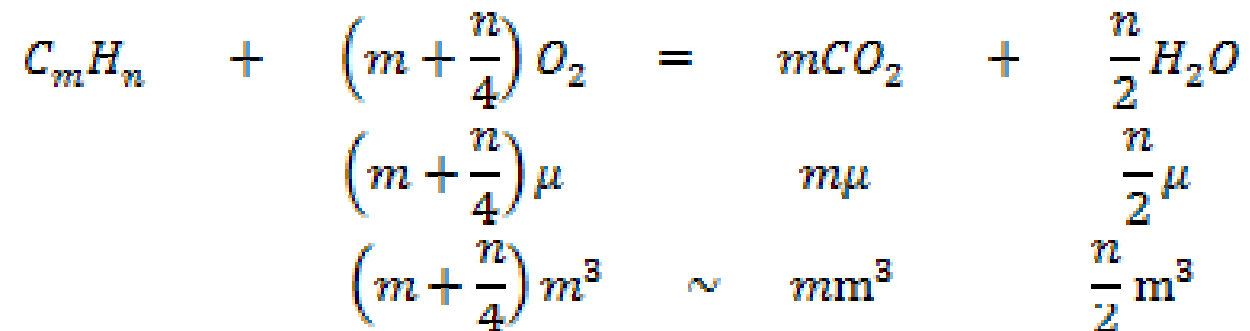
# METODOLOGÍA DE CÁLCULO

---

Relaciones estequiométricas.



En general para hidrocarburos:



# METODOLOGÍA DE CÁLCULO

## ★ Aire requerido para la combustión

Usando las relaciones estequiométricas, podemos fácilmente determinar el peso teórico del oxígeno requerido para asegurar la combustión completa de 1 kg de combustible:

$$L_{O_2}^0 = \frac{8}{3} \frac{C^r}{100} + \frac{S_v^r}{100} + 7.94 \frac{H^r}{100} - \frac{O^r}{100} \text{ kg/kg} \quad (1)$$

Entonces, tomando en cuenta la fracción de peso de oxígeno en el aire atmosférico, igual a 0.231, de la fórmula encontramos

$$L^0 = 0.115(C^r + 0.37S_v^r) + 0.342H^r - 0.043O^r \quad (2)$$

Dividiendo  $L^0$  por la densidad de aire seco, 1.293 kg/m<sup>3</sup>, obtenemos

$$V^0 = 0.089(C^r + 0.37S_v^r) + 0.265H^r - 0.033 O^r \quad (3)$$



# METODOLOGÍA DE CÁLCULO

---

Para asegurar una alta posibilidad de combustión completa de combustible en hornos y calderas actuales, es necesario introducir en los hornos más aire que el teóricamente requerido en la cantidad  $V^0$ . La razón de la cantidad actual de aire introducido dentro de un horno ( $V$ ) y la teóricamente requerida  $V^0$  es llamada el coeficiente de exceso de aire  $\alpha$ .

$$\alpha = \frac{V}{V^0}$$

(4)

El valor de  $\alpha$  depende del tipo de combustible quemado y del diseño del horno, para combustibles gaseosos el rango es de 1.03 y para combustibles sólidos de 1.5.

# METODOLOGÍA DE CÁLCULO

## Volúmenes de los productos de la combustión

La combustión casi completa del combustible está asegurada en los hornos modernos de mediana y de alta capacidad en las calderas. Los cálculos de los volúmenes de los productos de la combustión son, por lo tanto, con base en el supuesto de que la combustión es completa. Los productos de la combustión consisten, entonces, de dióxido de carbono  $\text{CO}_2$ , dióxido de azufre  $\text{SO}_2$ , el volumen de nitrógeno  $\text{N}_2$  en el proceso de combustión, exceso de oxígeno  $\text{O}_2$  y vapor de agua  $\text{H}_2\text{O}$ .

De la relación estequiométrica se deduce que de la combustión de 1 mol (12 kg) se obtiene como resultado la formación de 1 mol de dióxido de carbono. La densidad del  $\text{CO}_2$  es  $1.977 \text{ kg/m}^3$ , el volumen de un mol de  $\text{CO}_2$  (a  $0^\circ \text{C}$  y  $760 \text{ mm Hg}$ ) es  $22.26 \text{ m}^3$ . Por lo tanto:

$$V_{\text{CO}_2} = \frac{22.26}{12} * \frac{c^{\text{r}}}{100} = 1.86 \frac{c^{\text{r}}}{100} \text{ m}^3/\text{kg} \quad (5)$$

# METODOLOGÍA DE CÁLCULO

Por analogía, en el supuesto de  $\rho_{SO_2} = 2.927 \text{ kg/m}^3$  y el volumen molar de  $SO_2 = 21.89 \text{ m}^3$

$$V_{SO_2} = 0.68 \frac{S_v^r}{100} \quad , \text{ m}^3/\text{kg} \quad (6)$$

Por lo tanto:

$$V_{RO_2} = 1.86 \frac{C^r + 0.37 S_v^r}{100} \quad ; \text{ m}^3/\text{kg} \quad (7)$$

o, la suma de  $C^r +$  indicada por  $K^r$

$$V_{RO_2} = 1.86 \frac{K^r}{100} \quad \text{m}^3/\text{kg} \quad (8)$$

# METODOLOGÍA DE CÁLCULO



El volumen teórico de nitrógeno, es la suma del volumen de nitrógeno introducido en el horno con la cantidad teórica necesaria de aire e igual a  $0,79 V^o$  (la fracción de volumen de nitrógeno, argón y otros gases inertes en el aire atmosférico es de 0,79), y el volumen de nitrógeno tomado a partir del combustible  $0,8 N^r/100$ , donde 0.8 es el volumen específico de nitrógeno en  $m^3/kg$ :

$$V_{N_2}^o = 0.79 V^o + 0.8 \frac{N^r}{100} \quad m^3/kg \quad (9)$$

El volumen teórico de los gases secos

$$V_{dg}^o = V_{RO_2} + V_{N_2}^o = 1.86 \frac{k^r}{100} + 0.79 V^o + 0.8 \frac{N^r}{100} \quad m^3/kg \quad (10)$$

# METODOLOGÍA DE CÁLCULO

Con el exceso de aire coeficiente  $\alpha > 1$ , el volumen de gases secos es:

$$V_{dg} = V^{\circ}_{dg} + (\alpha - 1)V^{\circ} \text{ m}^3/\text{kg} \quad (11)$$

donde  $(\alpha - 1)$  es la cantidad de exceso de aire. En consecuencia:

$$V_{H_2O} = V^{\circ}_{H_2O} + 0.0161(\alpha - 1)V^{\circ} \text{ m}^3/\text{kg} \quad (12)$$

El volumen total de gases.

$$V_g = V_{RO_2} + V^{\circ}_{N_2} + V_{H_2O} + (\alpha - 1)V^{\circ} \text{ m}^3/\text{kg} \quad (13)$$

# METODOLOGÍA DE CÁLCULO

Cuando los combustibles gaseosos son quemados, los volúmenes de aire y de los productos de combustión son determinados de manera similar, basados en las relaciones estequiométricas:

$$V^o = 0.0476 \left[ 0.5CO + 0.5H_2 + \sum \left( m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n + 1.5H_2S - O_2 \right] \quad m^3/m^3 \quad (14)$$

$$V_{RO_2} = 0.01 \left[ CO_2 + 0.5 + \sum mC_m H_n + H_2S \right] \quad m^3/m^3 \quad (15)$$

$$V_{N_2}^o = 0.79V^o + 0.01N_2 \quad (16)$$

$$V_{H_2O}^o = 0.01 \left[ H_2 + \sum \frac{n}{2} C_m H_n + H_2S + 0.124d_g \right] + 0.0161V^o \quad m^3/m^3 \quad (17)$$

En las ecuaciones de arriba, CO, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, etc., son los porcentajes de volumen de los constituyentes del combustible gaseoso; d<sub>g</sub> es la humedad contenida en el combustible gaseoso en gramos por un metro cúbico de gas seco.

# METODOLOGÍA DE CÁLCULO

## Determinación de la entalpía de los productos de combustión

Los resultados del análisis de gas se utilizan para calcular la entalpía  $h$  (contenido de calor) de los productos de la combustión de combustibles.

La entalpía se determina a partir de las fórmulas generales  $h = V(cpT)$  y se expresa en kilojulios por kilogramo de combustible sólido y líquido, o en kilojulios por metro cúbico de combustible gaseoso.

Con  $\alpha = 1$  y la temperatura  $T$  °C y en los procesos de horno, la entalpía de los gases se determina a partir de la fórmula:

$$h^o_g = V_{RO_2} (CpT)_{RO_2} + V^o_{N_2} (CpT)_{N_2} + V^o_{H_2O} (CpT)_{H_2O} \quad (18)$$

# METODOLOGÍA DE CÁLCULO

La entalpía del aire a  $\alpha=1$  es:

$$h_{air}^{\circ} = V^{\circ}(C_p T)_{air} \quad (19)$$

Con un coeficiente de exceso de aire  $\alpha > 1$ , la entalpía de los productos combustión es:

$$h_{cp} = h_{cp}^{\circ} + (\alpha - 1)h_{air}^{\circ} \quad \text{kJ/m}^3 \quad (20)$$

La entalpía  $h_{cp}$  es calculada de valores diferentes de  $T$  y  $\alpha$ , los datos obtenidos son tabulados. En resumen, esto es útil para usar los resultados calculados y graficar curvas mostrando la dependencia de  $h$  sobre  $T$  para diversos valores de  $\alpha$ . Una gráfica de este tipo es conocida como el diagrama  $h-T$ .



# METODOLOGÍA DE CÁLCULO

## SOFTWARE COMBUST 1.0

 **Calculo de Entalpia y Combustible COMBUST 1.0**

Programa Tipo Calcular Graficar Ventana

Combustible Liquido

Combustible Gaseoso

# METODOLOGÍA DE CÁLCULO

## COMBUSTIBLES; LÍQUIDO Y GAS

Combustóleo	Elemento	%
	C	84.9
	H	10.8
	S	3.8
	O	0
	N	0.4
	W	0
	Z	0.1
	Total	100

Gas natural	Compuesto	%
	CH <sub>4</sub>	91.97
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	7.12
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.0
	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	0.0
	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0.91
	C <sub>4</sub> H <sub>4</sub>	0.0
	H <sub>2</sub>	0.0
	CO <sub>2</sub>	0.0
	S	0.0
	Total	100

# RESULTADOS

## Resultados para el combustoleo

Empleando COMBUST V1.0 se alimenta la ventana: entrada de datos para el caso de combustibles líquidos como se muestra en la figura 5:

The screenshot shows the 'Ventana de Entrada de datos (Combustoleo)' window. It contains a table for 'Datos de Inicio del Combustoleo' with columns for C, S, N, H, O, and W. Below this is a table for five different fuel types (Alfa 1 to Alfa 5) with rows for Nombre, Razon, L. Inf, L. Sup, Interpol1, Interpol2, and Interpol3. At the bottom, there is a text field for 'Nombre del archivo de Salida'.

Datos de Inicio del Combustoleo					
C	S	N	H	O	W
84.9	3.8	0.4	10.8	0.0	0.0

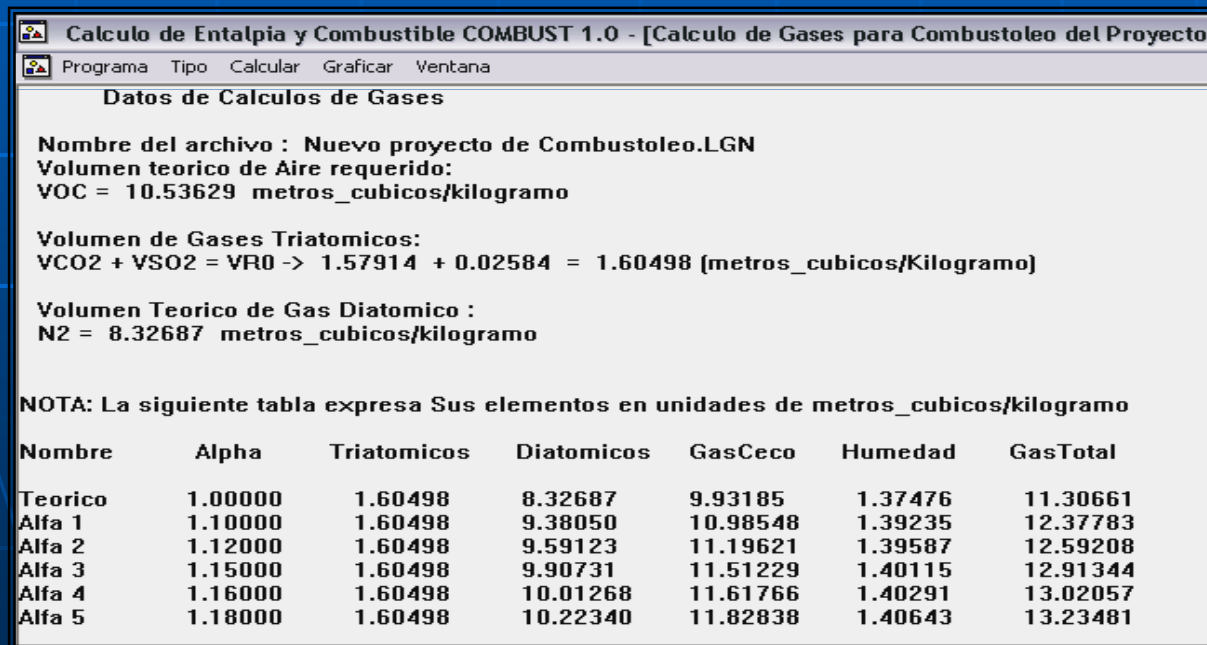
	Alpha 1	Alpha 2	Alpha 3	Alpha 4	Alpha 5
Nombre	Alfa 1	Alfa 2	Alfa 3	Alfa 4	Alfa 5
Razon	1.1	1.12	1.15	1.16	1.18
L. Inf	100	100	100	100	100
L. Sup	2200	2200	2200	2200	2200
Interpol1					
Interpol2					
Interpol3					

Nombre del archivo de Salida  
Nuevo proyecto de Combustoleo

Figura 5. Ventana del software COMBUST para ingresar la composición másica del combustoleo

# RESULTADOS

La presentación que usuario observará se muestra en la figura 6, y representa una salida de corrida típica en donde se muestran la cantidad de aire requerido para la combustión y es de 10.53 m<sup>3</sup>/kg, el volumen de los gases triatómicos es de 1.60 m<sup>3</sup>/kg y el volumen de nitrógeno es de 8.32 m<sup>3</sup>/kg para el combustóleo ingresado. En esta ventana se pueden observar los valores de los excesos de aire calculados (alfas).



Calculo de Entalpia y Combustible COMBUST 1.0 - [Calculo de Gases para Combustoleo del Proyecto:  
Programa Tipo Calcular Graficar Ventana

**Datos de Calculos de Gases**

Nombre del archivo : Nuevo proyecto de Combustoleo.LGN  
Volumen teorico de Aire requerido:  
VOC = 10.53629 metros\_cubicos/kilogramo

Volumen de Gases Triatomicos:  
VCO2 + VSO2 = VR0 -> 1.57914 + 0.02584 = 1.60498 (metros\_cubicos/Kilogramo)

Volumen Teorico de Gas Diatomico :  
N2 = 8.32687 metros\_cubicos/kilogramo

NOTA: La siguiente tabla expresa Sus elementos en unidades de metros\_cubicos/kilogramo

Nombre	Alfa	Triatomicos	Diatomicos	GasCeco	Humedad	GasTotal
Teorico	1.00000	1.60498	8.32687	9.93185	1.37476	11.30661
Alfa 1	1.10000	1.60498	9.38050	10.98548	1.39235	12.37783
Alfa 2	1.12000	1.60498	9.59123	11.19621	1.39587	12.59208
Alfa 3	1.15000	1.60498	9.90731	11.51229	1.40115	12.91344
Alfa 4	1.16000	1.60498	10.01268	11.61766	1.40291	13.02057
Alfa 5	1.18000	1.60498	10.22340	11.82838	1.40643	13.23481

Figura 6.  
Ventana del software COMBUST mostrando los resultados de los volúmenes de los productos de la combustión del combustóleo

# RESULTADOS

## Entalpías del aire y de los productos de la combustión

En la figura 8 se muestra la gráfica temperatura-entalpía total para cada coeficiente de exceso de aire ( $\alpha$ ). Por defecto el software calcula para exceso de aire igual a uno, los restantes cinco valores los ingresa el usuario. La importancia de la gráfica es que permite calcular la temperatura adiabática del horno de las calderas, ya que se trata de un proceso a presión constante

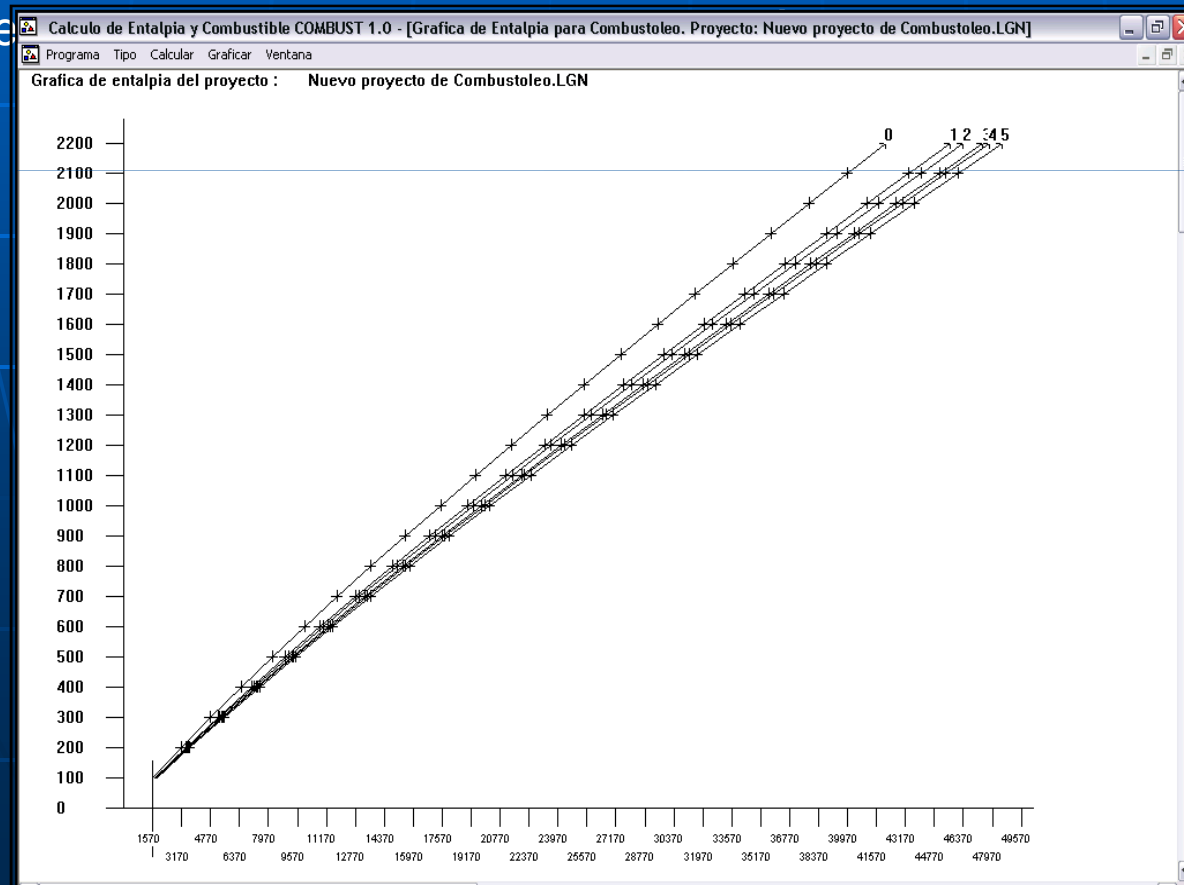


Figura 8.  
Ventana que muestra la gráfica realizada por el software COMBUST Temperatura contra Entalpía de los resultados obtenidos para el combustoleo 21

# RESULTADOS

## Resultados para el gas natural

Empleando COMBUST V1.0 se alimenta la ventana: entrada de datos para el caso de combustibles gaseosos que en este caso es el gas natural como se muestra en la figura 11

Calculo de Entalpia y Combustible COMBUST 1.0  
Programa Tipo Operación Ventana

Ventana de Entrada de datos (Gas Natural)

Datos de Inicio Para Gas Natural

S	N	H	O	CO	CO2	H2S	dmf
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10

C	H	C	H	C	H	C	H	C	H
1	4	2	4	2	6	3	6	3	8
91.97		7.12		0.0		0.0		0.91	

C	H	C	H	C	H	C	H	C	H
4	4	0	0	0	0	0	0	0	0
0.0		0.0		0.0		0.0		0.0	

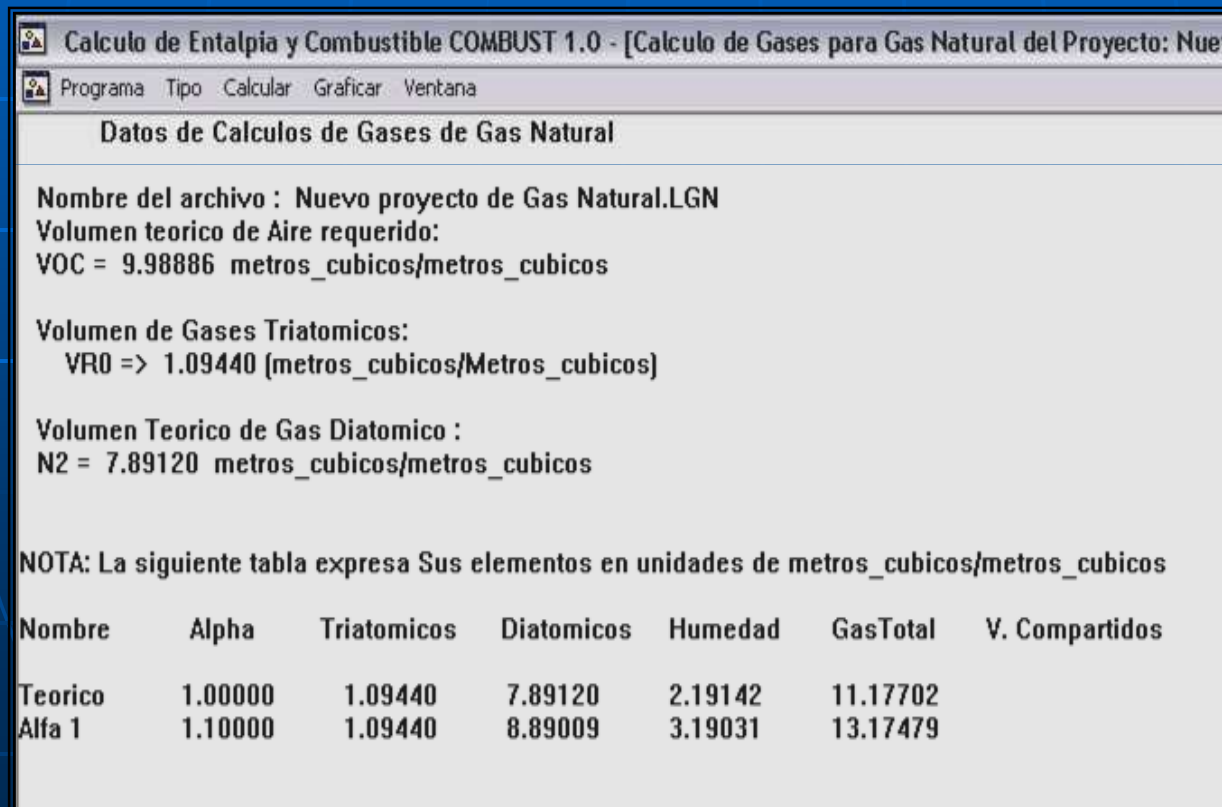
	Alpha 1	Alpha 2	Alpha 3	Alpha 4	Alpha 5
Nombre	Alfa 1	Alfa 2	Alfa 3	Alfa 4	Alfa 5
Razon	1.10				
L. Inf	100				
L. Sup	2000				
Interpol1					
Interpol2					
Interpol3					

Nombre del archivo de Salida  
Nuevo proyecto de Gas Natural

Figura 11. Ventana del software COMBUST para ingresar la composición volumétrica del gas natural

# RESULTADOS

Los resultados principales resultados que se muestran son: el volumen teórico de aire que se requiere para quemar 1 m<sup>3</sup> de gas natural y es de 9.98 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> , el volumen de los gases triatómicos es de 1.09 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> y el volumen de nitrógeno es de 7.89 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>



Calculo de Entalpia y Combustible COMBUST 1.0 - [Calculo de Gases para Gas Natural del Proyecto: Nuev

Programa Tipo Calcular Graficar Ventana

**Datos de Calculos de Gases de Gas Natural**

Nombre del archivo : Nuevo proyecto de Gas Natural.LGN  
Volumen teorico de Aire requerido:  
VOC = 9.98886 metros\_cubicos/metros\_cubicos

Volumen de Gases Triatomicos:  
VR0 => 1.09440 (metros\_cubicos/Metros\_cubicos)

Volumen Teorico de Gas Diatomico :  
N2 = 7.89120 metros\_cubicos/metros\_cubicos

NOTA: La siguiente tabla expresa Sus elementos en unidades de metros\_cubicos/metros\_cubicos

Nombre	Alpha	Triatomicos	Diatomicos	Humedad	GasTotal	V. Compartidos
Teorico	1.00000	1.09440	7.89120	2.19142	11.17702	
Alfa 1	1.10000	1.09440	8.89009	3.19031	13.17479	

Figura 12.  
Ventana del  
software  
COMBUST  
mostrado los  
resultados de  
los volúmenes  
de los  
productos de la  
combustión del  
gas natural

# RESULTADOS

El programa computacional COMBUST V1.0 despliega una gráfica Temperatura- entalpía para los productos de la combustión con dos excesos de aire con  $\alpha = 1$  y con  $\alpha = 1.10$  mostradas en la figura 14

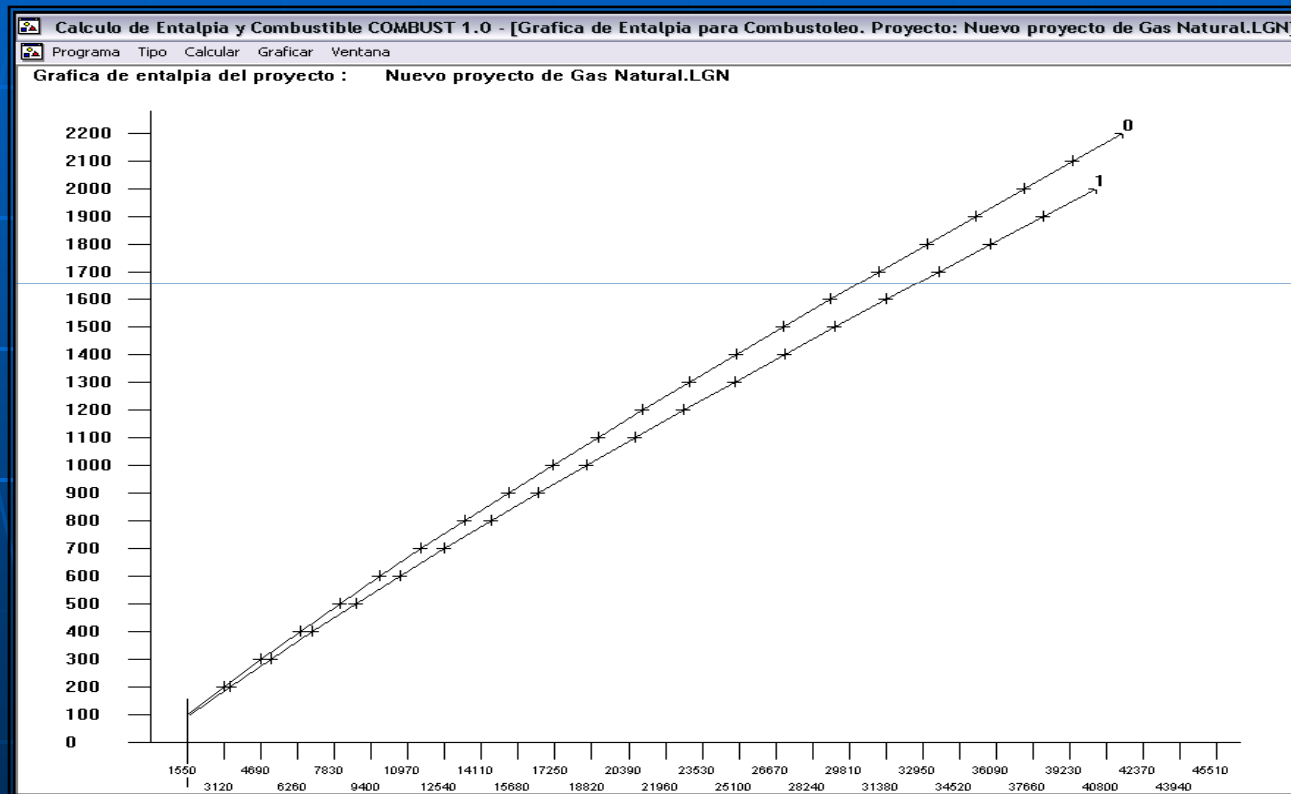


Figura 14.  
Ventana que muestra la gráfica realizada por el software COMBUST Temperatura contra Entalpía de los resultados obtenidos para el gas natural



# CONCLUSIONES

---

- ✦ Se desarrolló un software COMBUST V1.0 destinado para computadoras de uso personal, lo que lo convierte en una herramienta de cálculo muy importante para el análisis térmico y de combustión de calderas.
- ✦ El software realiza el cálculo de los productos de la combustión y sus propiedades termodinámicas, no sólo de forma estequiométrica, sino también con cinco excesos de aire simultáneamente.
- ✦ En definitiva, el uso del programa de cálculo de características termodinámicas de los productos de la combustión Combust, en su versión 1.0 es de gran ayuda para el cálculo térmico de los generadores de vapor al quemar combustibles de tipo fósil, sean estos líquidos o gaseosos.

# CONCLUSIONES

---

Los resultados obtenidos muestran que la cantidad de aire requerido para la combustión de 1 kg de combustóleo es de 10.53 m<sup>3</sup>/kg, el volumen de los gases triatómicos (CO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>) es de 1.60 m<sup>3</sup>/kg y el volumen de nitrógeno es de 8.32 m<sup>3</sup>/kg para la quema del combustóleo.

Por otro lado, el volumen teórico de aire que se requiere para quemar 1 m<sup>3</sup> de gas natural es de 9.98 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>, el volumen de los gases triatómicos es de 1.09 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> y el volumen de nitrógeno es de 7.89 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>.

Los resultados obtenidos de energía liberada en forma de entalpía mediante Combust, tanto para el aire como para los productos de la combustión a diferentes excesos de aire están dentro del rango desde 100 °C hasta 2 200 °C.





# AGRADEZCO SU ATENCIÓN