

## **DISEÑO DE UN SOFTWARE PARA EL CALCULO DE LAS CARACTERISTICAS TERMODINAMICAS DE LOS PRODUCTOS DE LA COMBUSTION DE COMBUSTIBLES LIQUIDOS Y GASEOSOS**

**Georgiy Polupan, Florencio Sánchez Silva,  
Guillermo Jarquin López, \*Ricardo Israel Calzada Salas**

**Instituto Politécnico Nacional, SEPI-ESIME- IPN. Av. IPN, s/n, Colonia Lindavista.  
UPALM,  
C.P. 07738, México D.F. Tel. 57 29 60 00 ext. 54 783. Fax. 57 29 60 00 ext. 54 754  
gjarquin@mexico.com**

**\*Instituto Politécnico Nacional. ESIME- IPN. UPC. Av. Santa Ana No. 1000 Col. San  
Francisco Culhuacán. México, D.F. C.P. 04430 Tel. 56 24 20 00 Ext. 73 011.**

**Palabras clave:** software, productos de la combustión, gas natural, combustoleo, exceso de aire, entalpía.

### **RESUMEN**

**El principal propósito de este trabajo fue desarrollar un software para el cálculo de las características termodinámicas de los productos de la combustión. Este software fue diseñado para ser aplicado a calderas y permite calcular los volúmenes de los productos de la combustión cuando se queman combustibles líquidos y gaseosos. Además, calcula las entalpías teóricas y reales de dichos productos de la combustión en diferentes elementos de la caldera a diferentes coeficientes de exceso de aire. Las ecuaciones de cálculo utilizadas están basadas en las relaciones estequiométricas para una combustión completa. Cabe señalar que las relaciones estequiométricas para combustibles líquidos son diferentes a los combustibles gaseosos. Porque los cálculos de combustibles líquidos se basan en 1 kg de combustible, y se considera la composición másica de los elementos del combustible (C, H, S, N, O), así como también el contenido de humedad y cenizas. Para el cálculo de combustibles gaseosos se basan en un metro cúbico y se considera una composición volumétrica de los diferentes gases componentes (hidrocarburos, CO, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S) y humedad. El software ha sido usado para realizar cálculos térmicos en calderas y generadores de vapor. Con ayuda de este software es posible analizar la variación de las características termodinámicas al cambiar los porcentajes de los componentes del combustible y los coeficientes de exceso de aire. En este trabajo se presenta un ejemplo de cálculo de las características termodinámicas para una caldera que usa combustibles mexicanos líquidos y gaseosos. Para validar el software, se tomaron datos y se realizó un análisis de los resultados obtenidos con el software en una caldera de 350 MW.**

## INTRODUCCION.

Este trabajo surge de la necesidad de contar con un software de cálculo de las características termodinámicas de los productos de la combustión, ya que al realizarlos manualmente se invierte mucho tiempo y existe una mayor probabilidad de cometer errores en los cálculos. Este trabajo se realiza de manera conjunta entre la sección de Estudios de Posgrado e Investigación y la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Profesional Culhuacán. En lo que respecta a la metodología de cálculo y ejemplos de cálculo usando combustóleo corresponde a la Sección de estudios de Posgrado. La parte específica del software, el cual incluye el diseño del algoritmo, codificación, prueba de escritorio y corrida del programa así como la comparación de los resultados obtenidos se llevó a cabo por especialistas en Electrónica y Computación de ESIME Culhuacán.

El software calcula volúmenes de los gases producto de la combustión, así como también sus entalpías teóricas y reales para diferentes elementos de la caldera. En este software se puede variar la composición química de combustibles líquidos, así como también los coeficientes de exceso de aire que se requieran y se obtienen resultados de manera inmediata.

Por otro lado, para observar de manera correcta los resultados obtenidos por el software se requieren los siguientes requisitos: procesador pentium 100 Mhz, windows 95 o superior, 16 MB de RAM, 20 MB libres en disco duro, monitor SVGA con resolución de 800x600 y un mínimo de 256 colores.

El software está basado en una interfaz gráfica clásica de Windows llamada MDI o MULTI DOCUMENT ITERFACE por sus siglas en inglés el cual consta, por el momento de tres tipos de ventana básicas: Una ventana corresponde a la entrada de datos, otro corresponde a los cálculos de volúmenes de los productos de la combustión y otro a la entalpía de los gases, para el rango de temperaturas establecidos por el usuario.

Al correr por primera vez el programa se observa una ventana vacía y un menú principal, para comenzar el proceso de cálculo es necesario proporcionar datos de composición química del combustible en la ventana de entrada de datos, la cual se crea al desplegar la persiana de la barra de menú al sub-menú "DATOS" y presionar dentro de este desplegado " ENTRADA" esto desplegará una ventana nueva en donde se indica a través de recuadros de textos donde se deben de colocar los datos, una parte corresponde a la composición del combustible y otro a las variaciones del volumen de aire, en este ultimo aspecto es necesario ingresar los rangos para cada variación de volumen de aire. En esta versión se requiere el nombre del archivo de salida, y los puntos de interpolación para cada una de las variantes de exceso de aire Alfa, para el cálculo de las entalpías reales.

La salida de los resultados es por medio de texto normal de tipo lineal en donde es posible visualizar toda la lista de resultados a través de los desplazamientos de SCROLL de cada una de las ventanas. En los resultados siempre se presenta la referencia Alfa =1 y

todo el rango de entalpías que corresponden al rango de temperaturas de los productos de la combustión y fue de 100° a 2200°C.

## **DESARROLLO DEL SOFTWARE**

La metodología de cálculo de las características termodinámicas de los productos de la combustión se presenta en [1]

El tipo de programación del software propuesto en este trabajo, se basa en un código fuente en lenguaje C orientado a objetos, específicamente Borland C++ 5.02 por lo que el algoritmo utiliza una serie de objetos de trabajo, tanto para las ventanas como para los cálculos. Este software está integrado por tres objetos:

### **Primer objeto**

En el primer objeto se diseñó la primera ventana del software. Esta ventana sirve para introducir los datos de entrada para la composición química del combustible líquido. Así como también se pueden introducir los nombres de los elementos de la caldera con sus respectivos coeficientes de exceso de aire. En esta ventana se debe introducir además: el volumen teórico del aire necesario para quemar un kilogramo de combustible líquido. También esta ventana permite al usuario establecer los límites inferior y superior de temperatura para calcular sus respectivas entalpías. Finalmente en la parte inferior de la ventana se le da un nombre al archivo de salida de los resultados. La ventana con datos de entrada se muestra en la fig. 3.

### **Segundo objeto**

En el segundo objeto se diseña la segunda ventana, la cual contiene las ecuaciones y el procedimiento de cálculo para calcular los productos de la combustión como son: el volumen teórico de los gases triatómicos ( $\text{SO}_2$  Y  $\text{CO}_2$ ), el volumen teórico del vapor de agua, el volumen total de los productos de la combustión. El diagrama de flujo de este objeto se muestra en la fig. 1

### **Tercer objeto**

En el tercer objeto se diseña la tercera y cuarta ventana. La tercera ventana sirve para calcular las entalpías teóricas (dentro del rango dado por el usuario) de los productos de la combustión en el siguiente orden: entalpia del aire, entalpia de los gases triatómicos, entalpia del nitrógeno, entalpia del vapor de agua y entalpia del volumen total de los productos de combustión. En la cuarta ventana contiene las instrucciones para graficar los resultados de temperatura contra entalpia de los productos de la combustión. El diagrama de flujo de este objeto se muestra en la fig. 2.

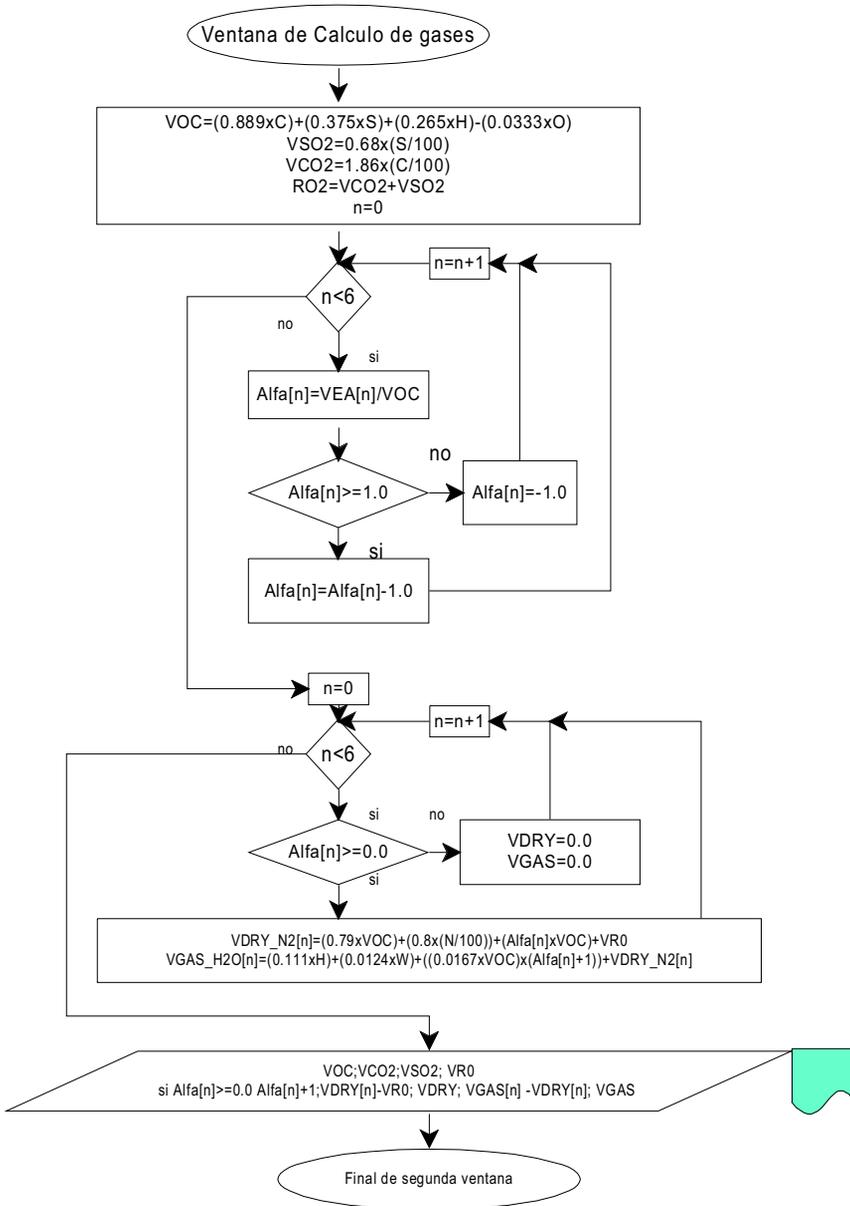


Fig. 1. Diagrama de flujo del segundo objeto

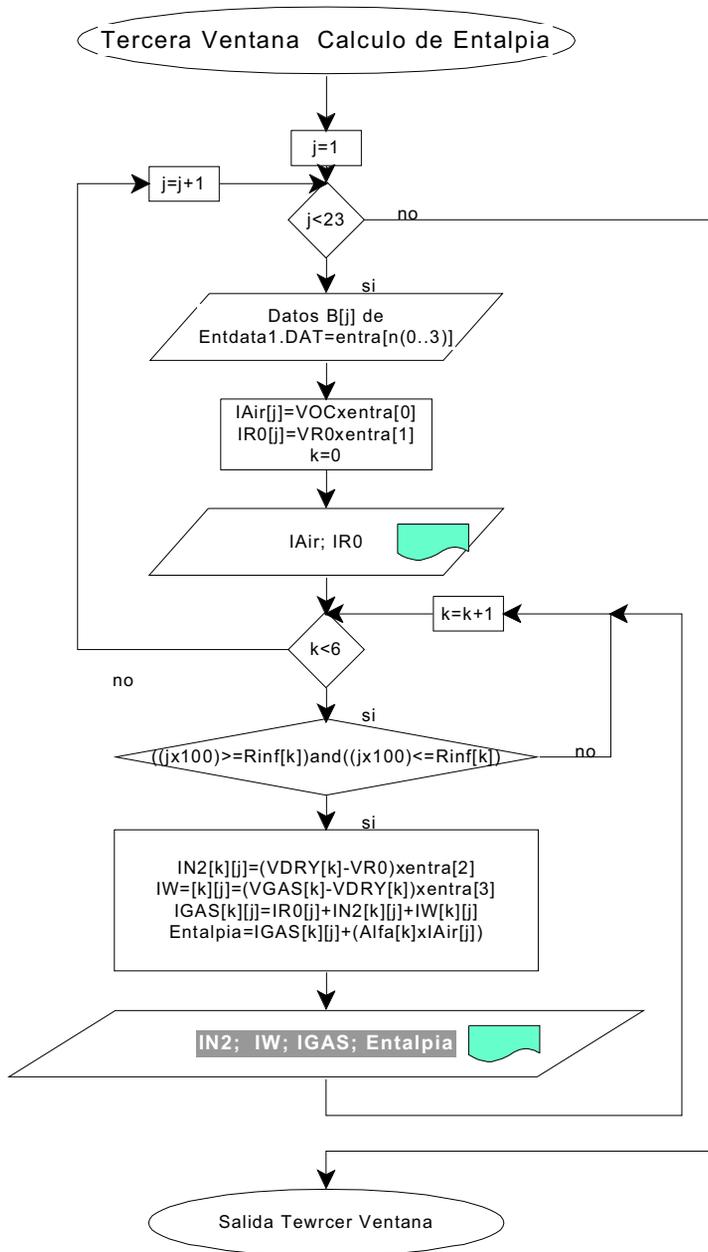


Fig. 2. Diagrama de flujo del tercer objeto

**RESULTADOS**

La primer ventana que crea el software se muestra en la fig. 3. En ella se introducen todos los datos de entrada.

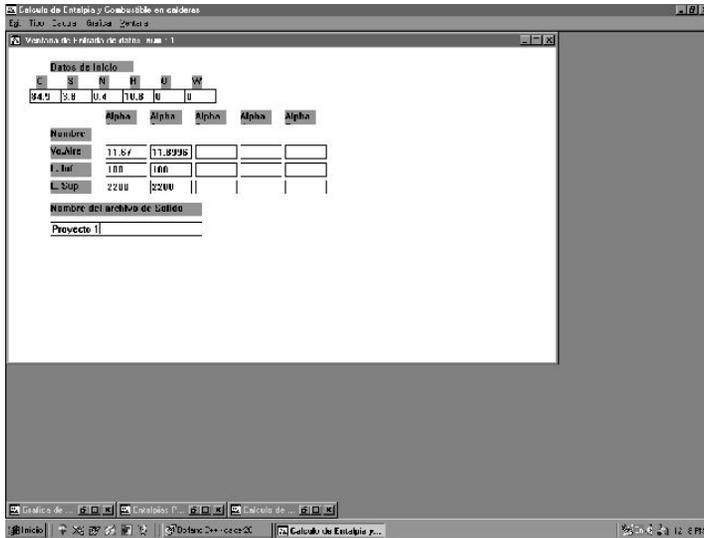


Fig. 3. Ventana de entrada de datos para el software

Para realizar el ejemplo de cálculo por el método manual y con el software se tomaron los resultados del COMBUSTOLEO de (PEMEX) que quema la caldera de la Central Termoeléctrica de Manzanillo II, con la siguiente composición química: C = 84.9% H = 10.8% N = 0.4% S = 3.8% Z = 0.1%, donde Z es la cantidad de cenizas.

Tabla 1. Coeficientes de exceso de aire y resultados de volúmenes de productos de combustión [3].

N	EVALUACIÓN	UNIDADES	S. HOGAR	S. ECONOM.	S. PRECALENT.
1	Exceso de aire en ductos (∞)	-	1.05	1.05	1.129
2	$V_{RO_2}$	m <sup>3</sup> /kg	1.61	1.61	1.61
3	$V_{R_2} = V^o_{N_2} + (\alpha - 1)V^o$	m <sup>3</sup> /kg	8.85	8.85	9.69
4	$V_{H_2O} = V^o_{H_2O} + 0.0161(\alpha - 1)V^o$	m <sup>3</sup> /kg	1.38	1.38	1.39
5	$V_{gas} = V_{RO_2} + V_{R_2} + V_{H_2O}$	m <sup>3</sup> /kg	11.84	11.84	12.69

Estos resultados obtenidos se resumen en las tablas 1 y 2. En la figura 4 se muestran los resultados de los productos de la combustión obtenidos mediante el software. En la figura 5 se presentan los resultados de temperaturas y entalpías de los productos de la combustión. En esta ventana aparecen las entalpías teóricas en primer lugar, y después se muestran los resultados de entalpías reales en cada uno de los elementos de la caldera. Para visualizarlos es necesario realizar desplazamientos de SCROLL. En la fig. 6 se presenta la gráfica generada por el software de temperatura - entalpia de los productos de la combustión.

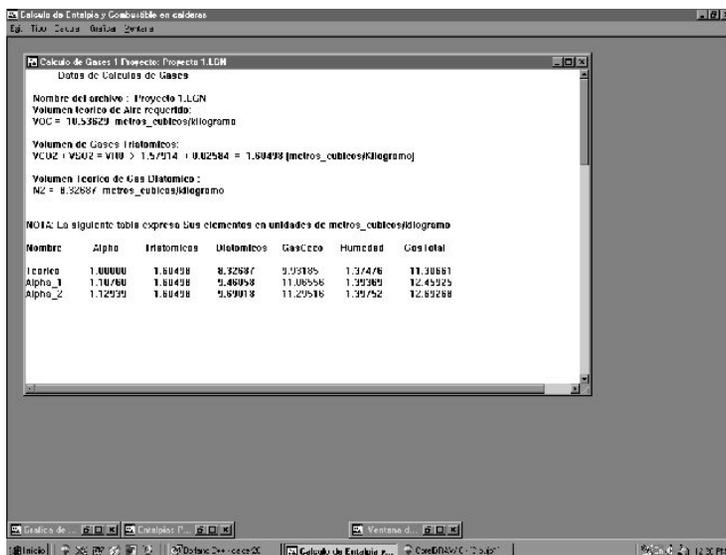


Fig. 4. Resultados de los productos de la combustión obtenidos por el software

Tabla 2 Resultados de entalpías del aire y de los productos de la combustión [3].

T °C	$V_{\text{aire}}^o = \dots \text{M}^3$	$V_{\text{RO}_2} = \dots \text{M}^3$	$V_{\text{N}_2}^o = \dots \text{M}^3$	$V_{\text{H}_2\text{O}}^o = \dots \text{M}^3$	
	$I_{\text{aire}}^o = V_{\text{aire}}^o (c \cdot t)_{\text{aire}}$	$I_{\text{RO}_2} = V_{\text{RO}_2} (c \cdot \vartheta)_{\text{RO}_2}$	$I_{\text{N}_2}^o = V_{\text{N}_2}^o (c \cdot \vartheta)_{\text{N}_2}$	$I_{\text{H}_2\text{O}}^o = V_{\text{H}_2\text{O}}^o (c \cdot \vartheta)_{\text{H}_2\text{O}}$	$I_{\text{gas}}^o = I_{\text{RO}_2} + I_{\text{N}_2}^o + I_{\text{H}_2\text{O}}^o$
100	1390.79	272.23	1082.49	206.63	1561.36
200	2802.65	575.06	2164.99	416.00	3156.05
300	4246.13	900.45	3264.13	633.59	4798.17
400	5710.67	1243.56	4388.26	856.64	6488.46
500	7206.82	1604.38	5529.04	1086.54	8219.96
600	8745.12	1968.43	6694.80	1323.28	9986.51
700	10315.03	2337.31	7868.89	1569.59	11775.79
800	11906.01	2744.84	9101.27	1826.86	13672.97
900	13496.99	3142.72	10350.30	2085.49	15578.51
1000	15130.12	3547.04	11607.66	2360.55	17515.24
1100	16805.39	3957.80	12865.02	2635.60	19458.42
1200	18385.83	4376.61	14114.05	2916.13	21406.79
1300	20345.58	4793.81	15404.71	3207.61	23406.14
1400	21873.34	5219.07	16728.68	3500.45	25448.21
1500	23590.76	5644.33	18019.35	3802.88	27466.56
1600	25318.71	6067.98	19343.32	4106.67	29517.97
1700	27036.13	6499.68	20667.29	4415.94	31582.91
1800	28753.54	6931.38	21999.59	4732.05	33663.02
1900	30523.64	7363.08	23356.87	5046.79	35766.74
2000	32283.20	7801.22	24680.85	5372.47	37854.54
2100	34127.05	8239.37	26038.13	5694.06	39971.55
2200	35812.86	8677.51	27395.41	6019.74	42092.66

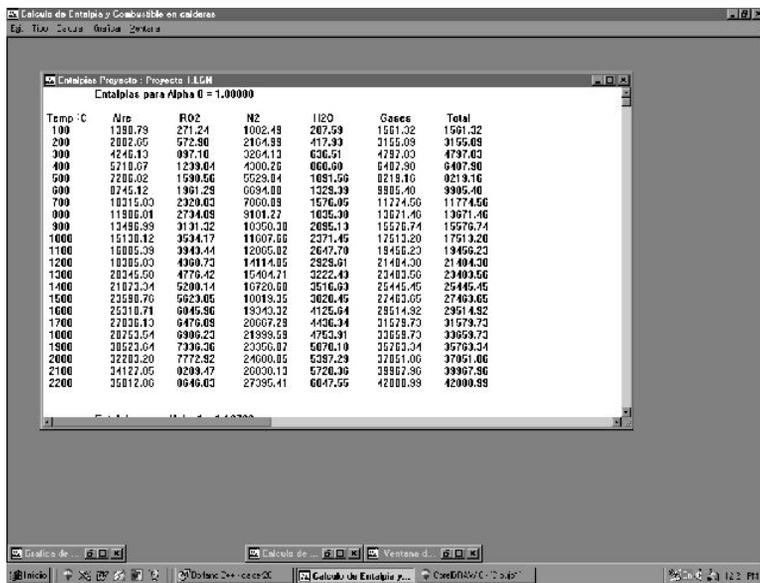


Fig. 5. Resultados obtenidos por el software de entalpías del aire y de los productos de la combustión.

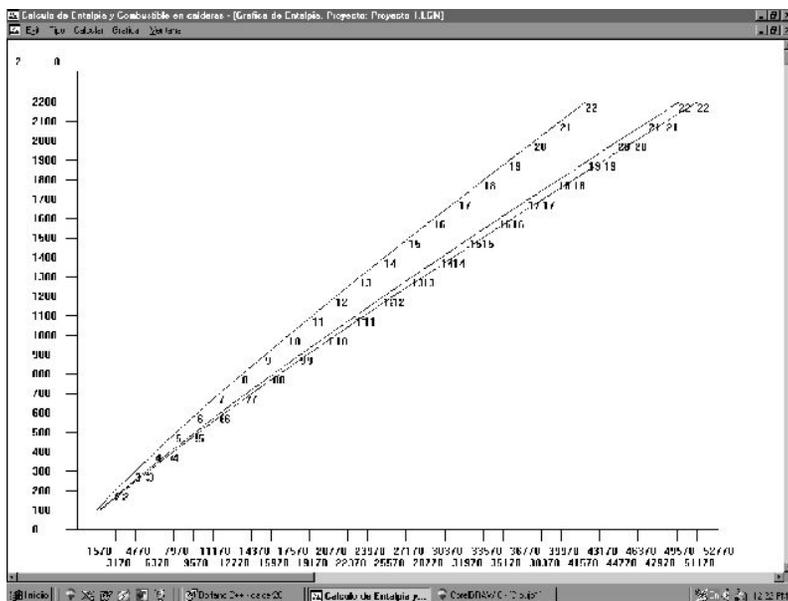


Fig. 6. Gráfica obtenida mediante el software de temperatura- entalpía de los productos de la combustión.

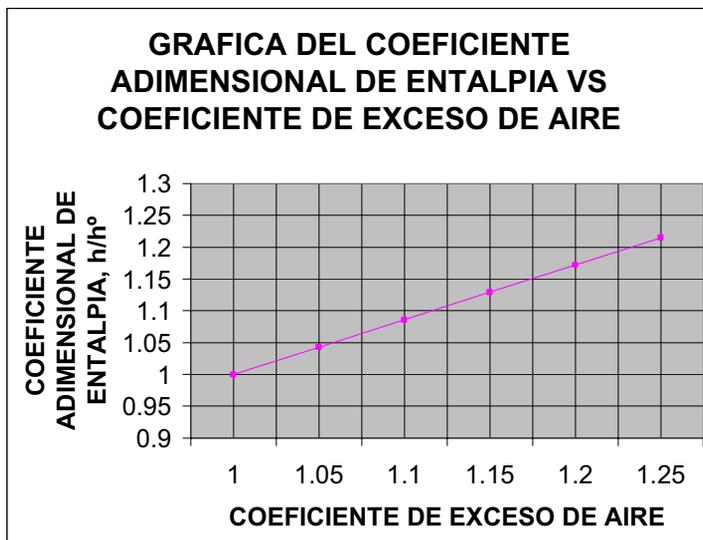


Fig. 7. Gráfica de coeficiente adimensional de entalpía de los productos de la combustión contra exceso de aire, considerando una temperatura de 1000 °C. Donde:  $h$  es cualquier valor de entalpía con un coeficiente de exceso de aire diferente a 1.0 y  $h^\circ$  es el valor de entalpía obtenido al quemar el combustible con un exceso de aire de 1.0.

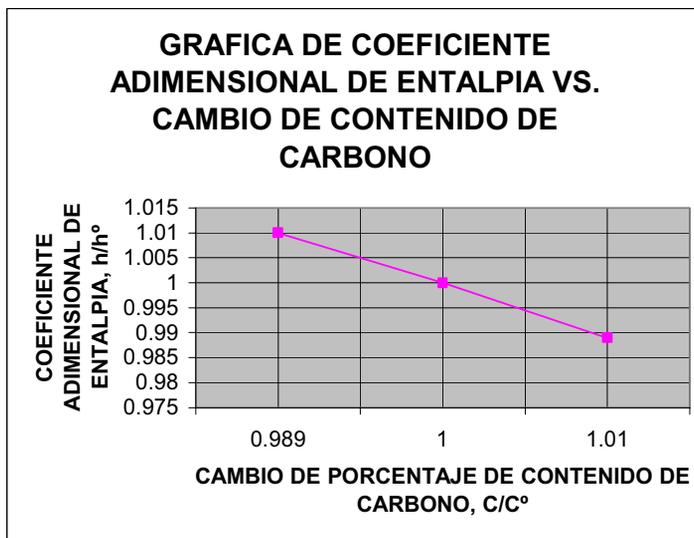


Fig. 8. Gráfica de coeficiente de entalpía adimensional de los productos de la combustión contra cambio de porcentaje de contenido de carbono del combustible, con un exceso de aire de 1.0 y una temperatura de 1000 °C.

Donde:  $C$  es un porcentaje de carbono dentro de los límites del combustible y  $C^\circ$  es el porcentaje de carbono promedio del combustible analizado.

## CONCLUSIONES

Una vez terminado el software se puede concluir lo siguiente:

1. El diseño del software se realizó considerando el uso de combustibles líquidos y gaseosos. Sin embargo, en este trabajo sólo se realizan los cálculos para combustibles líquidos. Una vez comparados los resultados obtenidos de manera manual (prueba de escritorio) y los resultados que desplegó el programa se comprobó que los resultados obtenidos fueron correctos. Por lo consiguiente, las gráficas que de ahí se derivan son correctas.
2. Este software obtiene resultados de los volúmenes de los productos de la combustión para una combustión completa y además despliega las entalpías de los volúmenes individuales y totales para el rango de temperaturas seleccionado por el usuario.
3. Con la aplicación de este software se pueden analizar la dependencia que tiene la entalpía con el exceso de aire (figura 7) y también la dependencia contenido de carbono- entalpía (figura 8).

## REFERENCIAS

- [1] Polupan G., I. Carvajal Mariscal, G. Jarquin López. “Experimental and estimation of the heat balance of a boiler at combustion of solid and liquid fuels”. Memorias de Decimotercera Reunión de Verano de Potencia, Aplicaciones Industriales RVP-AI/2000, México, Julio de 2000, pp.22-227.
- [2] G.Polupan, A.Sanchez Flores, I.Carvajal Mariscal, G.Jarquin Lopez, A.Sanchez Rivera, B.Vasquez Benitez. CALCULOS DE LAS CARACTERISTICAS TERMODINAMICAS DE LOS PRODUCTOS DE COMBUSTION DEL GAS NATURAL Y DEL COMBUSTOLEO. Publicado en las memorias del 6° Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas del 27 al 30 de Noviembre del 2001. Mexico D.F.
- [3] Georgiy P. Polupan, Guillermo Jarquin López, Alfredo Sánchez Flores, Benjamín Vázquez Benitez, Aristóteles Sánchez Rivera. Memorias del XXII taller internacional de capacitación en calderas, recipientes a presión, temas afines, foro tecnológico y exposición industrial. TALLER DE COMBUSTION. BOCA DEL RIO, VERACRUZ. MEXICO, LOS DIAS 8, 9 Y 10 DE AGOSTO 2001
- [4] Borland C++ 3.1. Object Oriented programming. Tercera edición. Editorial SAM DED SAISON, 1993.