

**Medio Ambiente -
Desarrollo Sostenible -
Combustión
(Cómo proteger la madre
naturaleza)
Segunda parte. Control de
Emisiones en vehículos,
Norma y Modelo**

Ángel Zayas Moreno



*Documento de trabajo n° 59, Buenos Aires,
Septiembre de 2011*



www.ceid.edu.ar
admin@ceid.edu.ar
Buenos Aires
Argentina


Centro de Estudios Internacionales para el Desarrollo

Medio Ambiente - Desarrollo Sostenible - Combustión (Cómo proteger la madre naturaleza) Segunda parte. Determinación de los parámetros de eficiencia en la combustión del generador de vapor (SADECA. 12,6 m3).

Ángel Zayas Moreno*

1



La naturaleza no tiene celos como los hombres. No tiene odios, ni miedo como los hombres, no cierra el paso a nadie, porque no teme a nadie. Los hombres siempre necesitarán los productos de la naturaleza.

José Martí

Resumen

Para llevar a cabo esta investigación con la situación económica que atraviesa el país fue necesario establecer el estudio de una guía metodológica, compilación de datos y textos legales, para determinar los parámetros que más influyen en el proceso de la eficiencia de la combustión.¹ Se aplicó la técnica de expertos con la cual se establecieron los factores estudiados y su influencia en el medio ambiente.

Se efectuaron los cálculos, del poder calorífico para el combustible diesel, el volumen de aire necesario para la combustión, el calor específico medio de los gases de la combustión y peso específico de los gases de la combustión, para la mayor efectividad de las regulaciones del proceso de la combustión, que nos proponemos en el análisis.

La investigación se llevo a cabo en varios talleres de reparación, horarios e intercepciones de mayor afluencia de vehículos y fundamentalmente en la planta de inspección técnica de vehículos en

* Docente de la Universidad de las Ciencias Informáticas, Cuba, zayas@uci.cu

¹ López Planes R. *Diseño estadístico de experimentos*. Editorial Científico Técnico, La Habana.1993.

el municipio Centro Habana donde se certifica el estado técnico para su circulación, además de determinar de manera objetiva los valores de eficiencia de la combustión.

Para corroborar los resultados obtenidos se efectuó un diseño experimental factorial a dos niveles completo con tres variables, que son los más influyentes, obteniéndose el modelo matemático a partir del cual y para las condiciones de experimentación, se puede evaluar el comportamiento de los mismos sobre la eficiencia y los productos al medio ambiente.

2

Introducción

El presente trabajo, no es más que una reflexión que forma parte de la política ambiental y justicia², la cual tiene como misión difundir información clave en materia de la eficiencia de la combustión de derecho ambiental, relacionadas con la mejor aplicación y cumplimiento de la legislación y normativa ambiental vigente en Cuba. El trabajo incluye investigaciones, estudios, guías metodológicas, compilación de documentos dirigidos a la eficiencia de portadores energéticos y textos. Según el diagnóstico realizado en el 2009 de la Normativa Técnica sobre Calidad del Aire en La Habana, concluyó que las regulaciones sobre emisiones vehiculares en la normativa, presentan varias deficiencias ya sea en la definición de los procedimientos de prueba de emisiones, o en los límites aplicados, que contienen normas que regulan adecuadamente el tema de las emisiones vehiculares se observa una ausencia de mecanismos de evaluación del impacto de la implementación de dichas regulaciones y de su aplicación .

Capítulo 2. Determinación de los parámetros de eficiencia en la combustión del generador de vapor (SADECA. 12,6 m³)³



² Ley 81 "Del Medio Ambiente", aprobada en fecha 11 de julio de 1997, derechos y obligaciones de la sociedad en general.

³ UNE 9-205- 1987. Cálculos relativos a la combustión.

Fenómenos en combustión en los generadores de vapor.

En el presente capítulo se recogen los resultados de las investigaciones realizadas a las calderas de baja potencia en la Empresa de Gas Carbónico, las cuales han permitido una mejor explotación de los generadores de vapor allí instalados, a la vez pueden servir para generalizarlos al resto del país y hacia los cuales debe enfocarse el trabajo futuro.

3

Las principales problemáticas a estudiar son:

1-Determinación de los principales parámetros que influyen en la combustión.

2-Characterización físico química de cada tipo de petróleo combustible utilizado, determinando los parámetros medios, máximo y mínimos de cada uno de ellos y en base a estos datos mejorar las condiciones de explotación de los generadores de vapor.

3- Prevención de como se comportarán estas propiedades y análisis de las principales dificultades de estos combustibles en relación con los procesos de combustión.

4-Diseño y construcción de un equipo para el precalentamiento del combustible, con el objetivo de disminuir la viscosidad en el menor tiempo posible.

6-Criterios de cómo mantener la temperatura de salida de los gases de la combustión según normas.

7-Desarrollo del diagnóstico de la combustión, como forma de bajar el exceso de aire en los generadores de vapor.

8-Contar con el quemador adecuado en nuestro.

Otros tipos de quemadores:

El petróleo combustible constituye el principal recurso energético utilizado en casi todos los generadores de vapor de baja, mediana y alta presión en Cuba.

Con el aumento del desarrollo del país, se requiere aumentar considerablemente la potencia y la presión de estos generadores, esto a su vez trae aparejado el sobre consumo de combustible, y a un aumento de los problemas de la combustión y de la corrosión de los generadores, los cuales, causan grandes pérdidas por conceptos de sobre gastos en mantenimiento, roturas y paradas no planificadas, etc. Estos fenómenos están muy relacionados entre sí, siendo necesario su estudio en conjunto, ya que en muchos casos se requiere llegar a un compromiso entre cómo obtener una adecuada

combustión, minimizando lo más posibles los problemas de la corrosión por baja y alta temperatura. En el presente trabajo la corrosión no será objeto de estudio.

En nuestro país estos fenómenos requieren de estudios particulares de la problemática debida fundamentalmente a las siguientes causas:

1-Las características de los petróleos utilizados en el país es muy variables, utilizándose petróleo de diferentes procedencias y provenientes de las distintas refinerías cubanas y además el petróleo crudo cubano, sólo o en mezcla. Esta diversidad de petróleo combustible requiere de distintos enfoques para enfrentar los problemas de la combustión adecuadamente.

2-Existe una gran gama de tecnologías de diferentes países, lo que provoca que exista diversidad de criterios sobre un mismo enfoque en algunos problemas de la combustión, siendo difícil apreciar en algunos casos las más efectivas. También debemos tener en cuenta que muchos de estos generadores no han sido diseñados para este tipo de combustible que por necesidad tenemos que quemar.

La combustión del oxígeno con el carbono, el hidrógeno y el azufre, se efectúa en proporciones de peso bien determinados, así pues, por cada átomo de carbono se necesitan 2 átomos de oxígeno para llegar a la combustión perfecta, formando el gas anhídrido carbónico (CO_2), aunque también se puede combinar un átomo de carbono con uno de oxígeno cuando el carbono quema con una deficiencia de aire, formando el gas "óxido de carbono" (CO), producto de la combustión incompleta, que debe evitarse, porque la combustión del carbono en forma de (CO) no da más que aproximadamente el 30% del calor que resulta de la combustión perfecta en forma de (CO_2).

El hidrógeno se combina siempre en proporción 2 átomos de hidrógeno con uno de oxígeno, formando vapor de agua H_2O , y el azufre se combina siempre en la proporción de 1 átomo de azufre con 2 átomos de oxígeno y forma el gas anhídrido Sulfuroso SO_2 .

Este gas es muy perjudicial, porque al enfriarse los productos de la combustión del hidrógeno y la que proviene de la humedad del combustible más la del aire de combustión, se condensa y reacciona con el gas anhídrido sulfuroso SO_2 , formando el ácido sulfúrico SO_4H_2 , sumamente corrosivo y que ataca a los conductos de humos, sobre todo a los metálicos.

Desgraciadamente, el azufre está siempre presente, en los combustibles industriales, aunque en pequeñas cantidades. Para aminorar sus efectos corrosivos, en los generadores de vapor es conveniente dejar escapar los gases de la combustión hacia la chimenea, a una temperatura suficientemente alta, tanto más alta

cuanto mayor es la proporción de azufre que contiene el combustible, lo que va en detrimento del rendimiento y del medio ambiente.

Hay que observar que, generalmente, los combustibles contienen ya una pequeña cantidad de oxígeno, y esa cantidad debe ser sustraída del peso total de oxígeno que exige la combustión de los elementos C, H, S, puesto que esta cantidad no se toma del aire, sino que ya lo suministra el mismo combustible. Tabla:2.1

Para evitar que el combustible tome una temperatura mayor de los 105⁰C se instaló una válvula [anexo: 24] de control de temperatura entre la línea de vapor de la unidad de calentamiento y el tanque de diario y así evitar que el combustible llegue a la boquilla del quemador con temperatura que ocasionen la solidificación de los sedimentos que contiene el combustible usado y evitamos la obstrucción de los orificios y por tanto el rendimiento de la combustión.

2.1-Cálculo de la combustión para diferentes tipos de combustibles.⁴

Se utiliza para los cálculos de la combustión tres tipos de combustibles. Crudo ligero de Martín Mesa, fuel-oíl y diesel DT.

Estos han sido seleccionados en función de su disponibilidad en las zonas cercanas a la capital, por constituir una representación de los diferentes tipos de combustibles que tienen posibilidad de ser utilizados en las distintas condiciones de explotación, así como permiten establecer la comparación de los resultados obtenidos.

Calculo del poder calorífico para el Crudo ligero de bajo contenido de azufre (Martín Mesa), fuel-oíl y diesel.

Tabla:2.5

Metodología a seguir para el cálculo de los parámetros de la combustión.

2.1.1-Según análisis físico químico.⁴

- Poder calorífico superior (P.C.S.)
- Poder calorífico inferior (P.C.I.) - Poder calorífico según se quema (P.C.Q.)
- Poder calorífico útil (P.C.U.)

⁴. UNE 9-205- 1987. Cálculos relativos a la combustión.

Cálculo del poder calorífico según análisis químico:

- Poder calorífico Superior

$$\mathbf{P.C.S. = 8000 * (C) + 34160 * (H) + 2500 * (S) \left[\frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}} \right]} \quad (1)$$

- Poder calorífico Inferior:

$$\mathbf{P.C.I. = P.C.S - (9*600)* (H)} \quad (2)$$

- Poder calorífico Según se Quema:

$$\mathbf{P.C.Q. = P.C.I. * (1-w) \text{ [Kcal/kg.]}} \quad (3)$$

- Poder calorífico Útil:

$$\mathbf{P.C.U. = P.C.Q. - 600 (w) \text{ [Kcal/kg.]}} \quad (4)$$

Resultados obtenidos según metodología de Cálculo para los diferentes combustibles



Tabla: 2.5

N°	Tipo de combustible	Poder calorífico[Kcal/Kg]				Volumen del aire de la combustión				
		P.C.S	P.C.I	P.C.Q	P.C.U	m³/Kg	m³/Kg	m³/m³ de aire húmeo	m³	m³
						V _a ⁰	V _{a(w)} ⁰	V _x	V _x ⁰	V _{ax} ⁰
	Crudo ligero	10595,96	10023,56	10003,51	10002,31	10,544	10,5229	0,0299	0,02721	10,8389
	Fuel-oil	9929,4	9443,4	9344,24	9334,244	9,9455	9,8371	0,0299	0,0272	10,2235
	Diesel	10626,53	10043,33	9926,85	9958,05	10,5552	10,471	0,0255	0,02311	10,5552

2.1.2-Volumen del aire de combustión.⁵

Para que una combustión sea perfecta o completa, es necesario un volumen de aire superior al volumen de aire estequiométrica, siendo este último el estrictamente necesario para que se pueda producir la combustión, según las necesidades de oxígeno que requiera cada combustible de acuerdo con su composición química específica.

A continuación se establecen las ecuaciones fundamentales correspondientes a este punto.

$$\lambda = V_a^1 / V_a^0 \quad (5)$$

Donde:

- λ: Índice del exceso de aire

⁵. UNE 9-205- 1987. Cálculos relativos a la combustión

- V_a^1 : Volumen de aire necesario para la combustión
- V_a^0 : Volumen de aire estequiométrica o teórico.
- $(\lambda-1) = V_a^1/V_a^0 - 1 = (V_a^1 - V_a^0)/V_a^0$ (6)

Donde:

- $(\lambda-1)$: exceso de aire se calcula:

Calculo del volumen de aire estequiométrica o teórico. Tabla: 2.5

$$V_a^0 = 1/0,21 \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{S}{32} - \frac{O}{32} \right) * 22,4 \text{ [m}^3/\text{kg]} \quad (7)$$

- Cálculo del volumen de aire estequiométrica a partir de la composición del combustible referida a base seca.

$$V_{a(w)}^0 = (1 - w) V_a^0 \text{ [M}^3/\text{kg]} \quad (8)$$

- Corrección para el aire húmedo a temperatura ambiente 27 °C. Humedad relativa 85% [6] [51]

$$P = 363,54 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right] \text{ Para } 27^\circ\text{C pág.6 [48]}$$

$$\Phi = \frac{P'}{P} \rightarrow P' = \Phi * P \quad [\text{Kg/cm}^2] * 10\,000 = [\text{Kg/m}^2]$$

DONDE:

P' : Es la presión parcial del vapor a la temperatura (t)

P^0 : Es la presión barométrica igual a $10333 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right]$

Φ : Es la temperatura de la humedad relativa

P : Es la presión de saturación del vapor a temperatura (t), en $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right]$

$$V_x = \frac{P'}{P_0} = \frac{P}{P_0} * \Phi \text{ [m}^3\text{]} \quad (11)$$

V_x : Es el volumen del vapor de agua en 1 m³ de aire húmedo a temperatura (t)



t: Es la temperatura del aire, en $^{\circ}\text{C}$

i: Es el contenido de calor de 1kg. de aire saturado con vapor de agua, en $\left[\frac{\text{kcal}}{\text{kg}}\right]$

X': Es el contenido de vapor de 1 kg. de aire saturado con vapor de agua, en $\left[\frac{\text{kg}}{\text{kg}}\right]$

$$V_x^0 = V_x * 273 / (273 + t) \quad (12)$$

V_x^0 : Es el volumen de V_x en condiciones normales 0°C y atmósfera

$$-V_{ax}^0 = V_a^0 * 1 / 1 - V_x^0 \quad (13)$$

V_{ax}^0 : Es el volumen de aire húmedo necesario para tener V_a^0 .

8

2.1.3- Volumen de los gases de la combustión- Cálculo a partir del análisis químico.⁶

$$V_H' = V_H^0 + (\lambda - 1) * V_a^0 \quad (14)$$

Donde:

$$V_H^1 = \text{Es el volumen de los gases de la combustión} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right]$$

V_H^0 : Es el volumen teórico de los gases.

$(\lambda - 1) * V_a^0$: Es el exceso de aire con que sea realizado la combustión.

Calculo del volumen teórico de los gases de la combustión.

$$V_H^0 = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{S}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2} + V_w \quad (15)$$

$$V_H^0 = 22,4 \left(\frac{\text{C}}{12} + \frac{\text{H}}{2} + \frac{\text{S}}{32} + \frac{\text{N}}{28} \right) + \frac{79}{21} * 22,4 \left(\frac{\text{C}}{12} + \frac{\text{H}}{4} + \frac{\text{S}}{32} - \frac{\text{O}}{32} \right) + 1,262 * W \quad (16)$$

Resultados obtenidos según cálculos:

⁶ . UNE 9-205- 1987. Cálculos relativos a la combustión

Tabla: 2.6: Volumen de los gases de la combustión

Tipos de combustible	Volumen teórico de los gases (m ³ /Kg (V _H [']))	Volumen de los gases de la combustión (m ³ /Kg) (V _H ⁰)
Crudo ligero	13,2525	11,437
Fuel-oil	12,467	10,4786
Diesel	13,3191	11,2081

9

- Porcentaje de CO₂ y O₂ en función del exceso de aire: (λ).

El máximo porcentaje de CO₂ + SO₂ en los gases de la combustión se obtiene para (λ = 1) Tabla: 2.7

$$\%CO_2 = \frac{V_{CO_2} + V_{SO_2}}{V_{HS}^0 + (\lambda - 1)V_a^0} \quad (17)$$

$$\%CO_{2\text{ Máx}} = \frac{V_{CO_2} + V_{SO_2}}{V_{HS}^0} \quad (18)$$

Donde:

V_{CO₂}: Es el volumen de CO₂ [m³/kg]

V_{SO₂}: Es el volumen de SO₂, en [m³/kg]

V_{HS}⁰: Es el volumen de humos teóricos secos, en [m³/kg]

$$- V_{CO_2} = \frac{22,4}{12} * C \quad (19)$$

$$- V_{SO_2} = \frac{22,4}{32} * S \quad (20)$$

$$- V_{HS}^0 = V_H^0 - \left(\frac{22,4}{2} * H + 1,262 * w \right) \quad (21)$$

Resultados obtenidos del cálculo es el que se muestra en la tabla a continuación.

Tabla: 2.7.

Tipo de combustible	CO ₂ +SO ₂ (λ) igual 1		O ₂ y CO ₂ % (λ) igual 1		Humos teóricos secos "V _{HS} ⁰ " (m ³ /kg)
	V _{CO₂}	V _{SO₂}	O ₂	CO ₂	V _{HS} ⁰
Crudo ligero	1,624	0,0042		16,35	9,954
Fuel-oil	1,5866	0,0154		16,09	9,954
Diesel	1,6146	0,00483		16,215	9,9871

Para los combustibles líquidos tiene que cumplirse que:

$$0,94 \leq \frac{V_{HS}^0}{V_a^0} \leq 0,96 \quad \text{pág. [48]}^7$$

Resultados obtenidos de los cálculos para los tres tipos de combustibles son los siguientes:⁷

Crudo ligero.

$$0,94 \leq \frac{V_{HS}^0}{V_a^0} \leq 0,96$$

$$0,94 \leq 0,944 \leq 0,96$$

Fuel-oil.

$$0,94 \leq \frac{V_{HS}^0}{V_a^0} \leq 0,96$$

$$0,94 \leq 0,9509 \leq 0,96$$

Diesel.

$$0,94 \leq \frac{V_{HS}^0}{V_a^0} \leq 0,96$$

$$0,94 \leq 0,9462 \leq 0,96$$

Por lo que al hacer $V_{HS}^0 = V_a^0$ el error que se produce es despreciable, al tomar como fórmula práctica: [7], pág.10

$$\%CO_2 = \%CO_{2m\acute{a}x} / \lambda \quad (22)$$

$$\%O_2 = 21(\lambda - 1) / \lambda \quad (23)$$

TRIÁNGULO DE LA COMBUSTIÓN:

Porcentaje CO₂ y O₂ en función del exceso de aire.

⁷. UNE 9-205- 1987. Cálculos relativos a la combustión

Cálculo de CO₂ y del O₂ variando el exceso de aire según la ecuación (22 y 23).

Los resultados obtenidos para los combustibles estudiados se muestran en las

Tablas: 2.8, 2.9 y 2.10.

CO ₂ máx: 16,35 %	λ	λ	λ	CO ₂	CO ₂	CO ₂	O ₂	O ₂	O ₂
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	1,0 1	1,11	1,21	16,19	13,82	13,51	0,207	2,08	3,64
	1,0 2	1,12	1,22	16,03	14,59	13,4	0,411	2,25	3,78
	1,0 3	1,13	1,23	15,87	14,46	13,29	0,611	2,41	3,92
	1,0 4	1,14	1,24	15,72	14,34	13,18	0,8	2,57	4,06
	1,0 5	1,15	1,25	15,57	14,21	13,08	1	2,73	4,2
	1,0 6	1,16	1,26	15,42	14,09	12,97	1,18	2,89	4,33
	1,0 7	1,17	1,27	15,28	13,97	12,87	1,37	3,05	4,46
	1,0 8	1,18	1,28	15,13	13,85	12,77	1,55	3,2	4,59
	1,0 9	1,19	1,29	15	13,73	12,67	1,73	3,35	4,72
	1,1	1,2	1,3	14,86	13,62	12,57	1,9	3,5	4,84

11

Tabla: 2.9 Triángulo de la combustión. Fuel-oíl.

CO ₂ máx16,93%	λ	λ	λ	CO ₂	CO ₂	CO ₂	O ₂	O ₂	O ₂
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	1,00	1,11	1,21	16,93	15,25	13,99	0,207	2,08	3,64
	1,02	1,12	1,22	16,76	15,11	13,87	0,411	2,25	3,78
	1,03	1,13	1,23	16,59	14,98	13,76	0,611	2,41	3,92
	1,04	1,14	1,24	16,43	14,85	13,65	0,8	2,57	4,06
	1,05	1,15	1,25	16,27	14,72	13,54	1	2,73	4,2
	1,06	1,16	1,26	16,12	14,59	13,43	1,18	2,89	4,33
	1,07	1,17	1,27	15,97	14,47	13,33	1,37	3,05	4,46
	1,08	1,18	1,28	15,82	14,34	13,22	1,55	3,2	4,59
	1,09	1,19	1,29	15,53	14,22	13,12	1,73	3,35	4,72
	1,1	1,2	1,3	15,39	14,1	13,02	1,9	3,5	4,84

Tabla: 2. 10 Triángulo de la combustión. Diesel. Fig. 3.

CO ₂ máx: 16,09%	λ	λ	λ	CO ₂	CO ₂	CO ₂	O ₂	O ₂	O ₂
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	1,01	1,11	1,21	16,05	14,61	13,4	0,207	2,08	3,64
	1,02	1,12	1,22	15,9	14,48	13,29	0,411	2,25	3,78
	1,03	1,13	1,23	15,74	12,47	13,19	0,611	2,41	3,92
	1,04	1,14	1,24	15,59	14,23	13,08	0,8	2,57	4,06
	1,05	1,15	1,25	15,44	14,18	12,97	1	2,73	4,2
	1,06	1,16	1,26	15,3	13,88	12,87	1,18	2,89	4,33
	1,07	1,17	1,27	15,16	13,86	13,22	1,37	3,05	4,46
	1,08	1,18	1,28	15,02	13,74	12,67	1,55	3,2	4,59
	1,09	1,19	1,29	14,88	13,63	12,57	1,73	3,35	4,72



Los volúmenes de cada componente y el total serán:

$$-V_{CO} = V_{CO_2} = \frac{22,4}{12} * C \quad (24)$$

$$-V_{SO_2} = \frac{22,4}{32} * S \quad (26)$$

$$V_{H_2O} = 0,111H^t + 0,0124w^t + 0,0327V_a^0 + 1,24 [m^3/kg] \quad (25)$$

$$V_{N_2} = 0,79 * V_a^0 + 0,008N^t [m^3/kg] \quad (27)$$

$$V_{O_2} = (0,21 * V_a^0) + O_2/32 * 22,4 - 1,34 [m^3/kg] \quad (28)$$

$$V_g = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{O_2} [m^3/kg] \quad (29)$$

$$\%CO_{Max} = V_{CO_2} / V_g \quad (30)$$

$$\%O_{2Max} \text{ para } CO_{Max} = V_{O_2} / V_g \quad (31)$$

Donde:

H^t: Concentración gravimétrica de trabajo del hidrogeno (%)

w^t: Concentración gravimétrica de trabajo de la humedad en el combustible.

V_a⁰: Volumen teórico de aire seco (líquido) m³/kg.

El resultado de los volúmenes parciales de cada componente de los gases para la combustión incompleta con CO_{máx} y el volumen total será según muestra a continuación:

Tabla: 2.11.

Componentes de los gases	Crudo ligero	Fuel-oil	Diesel
$V_{CO}=V_{CO_2}$	1,624[m ³ /kg]	1,5866[m ³ /k]	1,61466[m ³ /k]
V_{H_2O}	1,1872[m ³ /kg]	1,008[m ³ /kg]	1,2096[m ³ /kg]
V_{SO_2}	0,0042 [m ³ /kg]	0,0154[m ³ /k]	0,00483[m ³ /k]
V_{N_2}	9,429 [m ³ /kg]	7,8589[m ³ /kg]	8,338[m ³ /kg]
V_{O_2}	0,756 [m ³ /kg]	0,766[m ³ /kg]	0,884[m ³ /kg]
V_g	11,81 [m³/kg]	10,227[m³/kg]	10,84[m³/kg]
%CO _{Max}	12,49%	14,12%	11,77%
%O _{2Max} =para CO _{Max}	5,8%	6,81%	7,33%

13

La relación entre (λ y % CO₂) es:

$$\%CO_2 = 16,35_{M\acute{a}x}/\lambda \quad (32)$$

Con esto se obtiene el triángulo de la combustión correspondiente para cada tipo de combustible: ver anexo. [25, 26 y 27].

2.1.4- Calor específico medio de los gases de la combustión.⁸

Esto es importante para los cálculos térmicos, es de vital importancia el conocer el calor específico medio de los gases de la combustión a las diversas temperaturas, desde las temperaturas máximas de combustión hasta la temperatura de evacuación de los mismos a la atmósfera a través de la chimenea.

- Cálculo a partir de su composición.

Conociendo la composición de los gases de la combustión en sus componentes básicos CO₂, O₂, N₂, SO₂, y H₂O, se obtiene el calor específico de la mezcla, C_{pm}^t sumando los productos de cada porcentaje del componente por su valor específico respectivo.

Calor específico medio de la mezcla. [48] pág. 20 Anexo: [18]: Calor Específico de los Gases.

Partiendo del (P.C.I). del combustible, por lo que para conocer el calor específico medio de los gases deberá utilizarse el [Anexo:18], que nos da en función del P.C.I. y tipo de combustible, el valor calor específico medio en 0^oC y t^oC leído sobre la escala de la ordenada de la derecha en función de la temperatura.

Además, en dicho gráfico se indica el calor específico medio entre 0^o y t^oC.

⁸⁸. UNE 9-205- 1987. Cálculos relativos a la combustión.

Del aire, a las diversas temperaturas, en los puntos de intersección de las curvas correspondiente a la temperatura con la escala de ordenada de la izquierda .

C_{pm} : Calor específico medio a presión constante de la mezcla de gases de la combustión a 0°C a 760 mm Hg

$$C_{pm} = \sum_{x=1}^{x=n} C_{p(x)} * fV_{(x)} \left[\frac{\text{kcal}}{\text{m}^3 \text{ } ^\circ\text{C}} \right] \quad (33)$$

X: Componentes químicos de la mezcla

$C_{p(x)}$: Calor específico medio a presión constante del componente químico de la mezcla.

Antes de comenzar los cálculos tendremos en cuenta que la norma consultada establece que el calor específico medio del SO₂ es igual al del CO₂ ($C_{pm} \text{ SO}_2$ es igual $C_{pm} \text{ CO}_2$)

Calor específico de los gases siguiendo la norma, calculamos para cada combustible tipo que hemos tomado, su calor específico medio a 200, 500 y 800°C utilizando el [anexo 18] tomamos los calores específico medios de cada componente y comparando los valores obtenidos con lo que se tienen por aplicación del anexo

Para obtener por cálculo el valor específico medio es necesario calcular el % de cada componente en volumen de gases de la combustión

Tomamos como índice de exceso de aire $\lambda=1,2$.

Tabla. 2.12.

$$V_a^0$$

$$V_H^1$$

$$C_{pCO_2} * f_{VCO_2} = C_p \quad (40)$$

$$C_{pH_2O} * f_{VH_2O} = C_p \quad (41)$$

$$C_{pSO_2} * f_{VSO_2} = C_p \quad (42)$$

$$C_{pN_2} * f_{VN_2} = C_p \quad (43)$$

$$C_{pO_2} * f_{VO_2} = C_p \quad (44)$$

$$V_{CO_2} = V_{CO_2} = \frac{22,4}{12} * C$$

$$f_{VCO_2} = V_{CO_2} = \frac{22,4}{12} * C * 100 / Vg \text{-----} (\%) \quad (34)$$

$$V_{H_2O} = 0,111H^t + 0,0124w^t + 0,0327V_a^0 \text{ [m}^3/\text{kg]}$$

$$f_{VH_2O} = V_{H_2O} * 100 / Vg \text{-----} (\%) \quad (35)$$

$$V_{SO_2} = 22,4/32 * S$$

$$f_{V_{SO_2}} = V_{SO_2} * 100 / V_g \text{ ----- } (\%) \quad (36)$$

$$V_{N_2} = (N_2 + 0,79 * \lambda) * V_a^0$$

$$f_{V_{N_2}} = V_{N_2} * 100 / V_g \text{ ----- } (\%) \quad (37)$$

$$V_{O_2} = (\lambda - 1) * 0,21 * V_a^0 =$$

$$f_{V_{O_2}} = V_{O_2} * 100 / V_g \text{ ----- } (\%) \text{ ----- } \quad (38)$$

$$\text{Total ----- } V_g [m^3/kg] \text{ ----- } 100,00\% \quad (39)$$

El resultado obtenido de la metodología de cálculo es el que se muestra en la tabla siguiente:



Tabla: 2.12.

Componente de los gases	Crudo ligero		Diesel		Fuel-oil	
	Volumen [m ³ /kg]	Fracción en (%)	Volumen [m ³ /kg]	Fracción en (%)	Volumen [m ³ /kg]	Fracción en (%)
V _a ⁰	10,544		10,5552		9,9455	
V _H ¹	13,2525		13,4		12,467	
V _{CO2}	1,624	12,1519	1,6146	12,1701	1,5866	12,73
V _{H2O}	1,1872	8,8835	1,20	9,1151	1,008	8,08
V _{SO2}	0,0042	0,0042	0,0048	0,0428	0,0154	0,12
V _{N2}	10,1013	75,5853	10,006	75,3531	9,433	75,69
V _{O2}	0,4474	3,3478	0,443	3,3189	0,443	3,38
Total	13,641	100,00	13,278	100,00	12,4621	100,00

Tabla: 2.12

Componente de los gases	Crudo ligero		Diesel		Fuel-oil	
	Volumen [m ³ /kg]	Fracción en (%)	Volumen [m ³ /kg]	Fracción en (%)	Volumen [m ³ /kg]	Fracción en (%)
V _a ⁰	10,544		10,5552		9,9455	
V _H ¹	13,2525		13,4		12,467	
V _{CO2}	1,624	12,1519	1,6146	12,1701	1,5866	12,73
V _{H2O}	1,1872	8,8835	1,20	9,1151	1,008	8,08
V _{SO2}	0,0042	0,0042	0,0048	0,0428	0,0154	0,12
V _{N2}	10,1013	75,58538	10,006	75,3531	9,433	75,69
V _{O2}	0,4474	3,3478	0,443	3,3189	0,443	3,38
Total	13,641	100,00	13,278	100,00	12,4621	100,00

Aplicando valores y obteniendo el valor de calor específico con el gráfico, teniendo un P.C.I. [Kcal/kg] resulta el cuadro siguiente: Tabla: 2.13, 2.14 y 2.15.

- Calor específico medio de los gases de la combustión:

Sustituyendo en (33). Según gráfico y el calculado.

$$C_{pm} = C_{pCO_2} * f_{V_{CO_2}} + C_{pH_2O} * f_{V_{H_2O}} + C_{pSO_2} * f_{V_{SO_2}} + C_{pN_2} * f_{V_{N_2}} + C_{pO_2} * f_{V_{O_2}}$$

Tabla 3 pág. 13 [7]

-C_p: De los componentes a 200, 500, 800 °C y 760 mm Hg y 0 °C [Kcal/m³ °C]

$$-C_{pCO_2} * f_{VCO_2} = C_p \quad (40)$$

$$C_{pH_2O} * f_{VH_2O} = C_p \quad (41)$$

$$C_{pSO_2} * F_{VSO_2} = C_p \quad (42)$$

$$C_{pN_2} * f_{VN_2} = C_p \quad (43)$$

$$C_{pO_2} * f_{VO_2} = C_p \quad (44)$$

El resultado obtenido del Calor específico medio de los gases de la combustión para el Crudo ligero es el que se muestra en la tabla:

Tabla: 2.13

Temperatura	Valor de cálculo	Valor según gráfico
200 ⁰ C	0,335974[Kcal/m ³ °C]	0,331[Kcal/m ³ °C]
500 ⁰ C	0,341286[Kcal/m ³ °C]	0,345[Kcal/m ³ °C]
800 ⁰ C	0,35096[Kcal/m ³ °C]	0,357[Kcal/m ³ °C]

El resultado obtenido del Calor específico medio de los gases de la combustión para el fuel-oil es el que se muestra en la tabla:

Tabla: 2.14

Temperatura	Valor de cálculo	Valor según gráfico
200 ⁰ C	0,334831[Kcal/m ³ °C]	0,336[Kcal/m ³ °C]
500 ⁰ C	0,3450784[Kcal/m ³ °C]	0,346[Kcal/m ³ °C]
800 ⁰ C	0,35256[Kcal/m ³ °C]	0,359[Kcal/m ³ °C]

El resultado obtenido del Calor específico medio de los gases de la combustión para el diesel es el que se muestra en la tabla:

Tabla: 2.15

Temperatura	Valor de cálculo	Valor según gráfico
200 ⁰ C	0,332[Kcal/m ³ °C]	0,331[Kcal/m ³ °C]
500 ⁰ C	0,345[Kcal/m ³ °C]	0,346[Kcal/m ³ °C]
800 ⁰ C	0,354[Kcal/m ³ °C]	0,357[Kcal/m ³ °C]

2.1.5-.Temperatura adiabática⁹

Para la determinación de la temperatura adiabática de la llama se utiliza el sistema planteado a partir de la pág. 18 de la norma [48] que se refiere a los cálculos relativos a la combustión en la caldera.

Para ellos se utilizan dos ecuaciones, para el cálculo del calor introducido [Q]. Estos son los siguientes:

⁹ . UNE 9-205- 1987. Cálculos relativos a la combustión.

$$Q = V_{HS}^1 (C_{em}^h) * (t_h) + (w) * (i) \left[\frac{\text{Kcal}}{\text{kg}} \right] \quad (45)$$

Donde:

Q: Es el calor introducido.

V_{HS}^1 : Es el volumen de gases sin tener en cuenta el vapor de agua correspondiente a la humedad del combustible, en $[m^3/Kg]$.

t_h : Es la temperatura adiabática de la llama, en $^{\circ}C$.

i: Es la entalpía del vapor de agua a presión parcial correspondiente, en $[Kcal/Kg]$

C_{pm}^h : Es el calor específico medio de los gases a la temperatura t_h

w: Es el tanto por uno de la humedad del combustible

$$V_{HS}^1 = V_H^0 + [(\lambda - 1) * V_a^0] - w \quad [m^3/Kg] \quad (46)$$

$$Q = P.C.U. + (w) * (640) + V_a^1 * (C_e^A) * t_a \quad (47)$$

Donde:

P.C.U. Poder calorífico útil

Es el tanto por uno de la humedad de combustible

V_a^1 : Volumen de aire de combustión en $[m^3/Kg]$

C_e^A : Es el calor específico medio de los humos a su temperatura en $[Kcal/m^3]$

t_A : Es la temperatura de combustión en $^{\circ}C$

C_{pm}^t : Es el calor específico medio de los gases a la temperatura t_h

El dato del calor específico medio de los humos (C_e^A) se obtiene utilizando la gráfica II del anexo A correspondiente al cuerpo de la norma antes mencionada. Con los valores del P.C.I. del combustible, del índice de exceso de aire (λ) y de la temperatura de humo de la combustión ($200^{\circ}C$) vamos al gráfico y obtemos la magnitud deseada.

El calor introducido [Q] también se puede determinar utilizando la ecuación [47], en la cual aparece el término de la temperatura adiabática de la llama t_h

Observando cada término de la ecuación nos aparecen inicialmente tres (3) incógnita, (C_{pm}^h , i, t_h).

Para determinar la primera, utilizamos nuevamente el gráfico mencionado anteriormente mencionado. Con el P.C.I. del combustible, el índice del exceso de aire y asumiendo un valor de t_h , obtenemos el valor de C_{pm}^h $[Kcal/m^3 \text{ } ^{\circ}C]$

Como se puede observar, solo nos resta determinar la magnitud de la tercera incógnita (i), que con la utilización de la [tabla 3] perteneciente a los anexos del tomo III de Termodinámica Técnica --[Autor. D.C. Ing. Emilio Fernández Conde].

En la tabla de temperatura de saturación (27°C), observamos la necesidad de interpolar para determinar la entalpía del

vapor de agua presente en el aire saturado, debido a la existencia de dos valores de entalpía correspondiente para 25 y 30 °C.

Interpolando, el valor hallado es:

$$i = 2550,84 \text{ [Kj/Kg]} = 609,2576 \text{ [Kcal/Kg]}$$

Según la norma consultada, al igualar las ecuaciones [45 y 47] para el cálculo de [Q], estamos en condiciones de aplicar el método de tanteo que consiste en asumir valores lógicos de temperatura (t_h) para la llama adiabática.

La ecuación 47 se puede simplificar a través del término:

$$R = C_{pm}^h * t_h + S * i \tag{8}$$

Donde:

S: Coeficiente numérico = 0,0706

R. Coeficiente numérico

Este resultado satisface la exactitud requerida para el cálculo, por lo tanto la temperatura adiabática de la llama [t_h] asumida por tanteo es correcta.

En tabla 2.16 se encuentran los resultados de los cálculos para los tres combustibles de la temperatura Adiabática de la llama:

Tabla: 2.16

Componetes	Crudo ligero	Fuel-oil	Diesel
P.C.U	10023,56[Kcal/Kg]	9334,24[Kcal]	9958,05[Kcal/K]
V ¹ _{Hs}	13,34 [m ³ /Kg]	12,46[m ³ /Kg]	13,31 [m ³ /Kg]
W	0,002	0,002	0,009[Kcal/K]
V ¹ _a	12,78[m ³ /Kg]	11,93[m ³ /Kg]	12,67[m ³ /Kg]
C ^A _e	0,331[Kcal/m ³]	0,334[Kcal/m ³]	0,334[Kcal/m ³]
i	609,26[Kcal/Kg]	609,25[Kcal/Kg]	609,26 [Kcal/Kg]
S	0,071	0,071	0,071
R	758,313	758,51	755,13
Q	9948,59 [Kcal/Kg]	9948,59[Kcal/K]	10077,36[Kcal/g]
C ^h _{pm}	0,394[Kcal/m ³ °C]	0,394[Kcal/m ³ °C]	0,394[Kcal/m ³⁰ °C]
t _h	1820,1 °C	1815,8°C	1820,1 °C

$$Q \approx Q \text{ [Kcal/Kg]}$$

Este resultado satisface la exactitud requerida para el cálculo, por lo tanto la temperatura adiabática de la llama $[t_h]$ asumida por tanteo es correcta. $t_h = 0^\circ\text{C}$

2.1.6-. *Calculo del peso específico de los gases de la combustión (P_{eh}^0) en condiciones normales 0°C , 760 mm Hg.*

$$P_{eh}^0 = (V_a^1 * 1,293 + 1 - A) / V_{H.}^1 \text{ [Kg/m}^3\text{]} \quad (49)$$

Donde:

A: Es el tanto por uno de cenizas e inquemados que se producen en la combustión de 1Kg. de combustible.

$$V_A^1 = (V_a^0 * \lambda) \text{ [m}^3\text{/Kg]} \quad (50)$$

- Peso específico de los gases de la combustión a $t = 27^\circ\text{C}$.

$$P_{eh}^{27^\circ\text{C}} = P_{eh}^0 \cdot \frac{273}{273 + t} \quad (51)$$

Los resultados obtenidos de la metodología de cálculo del peso específico de los gases de la combustión (P_{eh}^0) en condiciones normales 0°C , 760 mm Hg y a 27°C :

Tabla: 2.17

Gases de la combustión	Crudo ligero	Fuel-oil	Diesel
A	0,0042	0,00	0,001
P_{eh}^0	1,322 [m ³ /Kg]	1,318	1,297[m ³ /Kg]
$P_{eh}^{27^\circ\text{C}}$	1,203[m ³ /Kg]	1,199	1,180[m ³ /Kg]

Conclusiones

1. En la selección y determinación de la metodología y la realización de los cálculos de la combustión, así como en los métodos a emplear se puede señalar que:

1. El quemador Baltur-300 cumple con las normas técnicas establecidas para las pruebas a realizar así como las regulaciones para el experimento.

2. Se comprobó que los resultados de los cálculos teóricos son correcto al estar en correspondencia con los resultados obtenidos de las mediciones realizadas con el analizador de gases y su diferencia no resultaron significativas. Anexo:19

3. Se comprobó que la utilización del triángulo de la combustión para calcular los parámetros de los gases de la combustión es correcta.

4. Se demostró que el poder calorífico de los combustibles depende de la composición química del mismo.



Centro de Estudios Internacionales para el Desarrollo

20

INTERNATIONAL RESEARCH CENTER FOR DEVELOPMENT

*CENTRO DE ESTUDOS INTERNACIONAIS
PARA O DESENVOLVIMENTO*

*CENTRE D'ÉTUDES INTERNATIONALES
PAR LE DÉVELOPPEMENT*

*CENTRUM STUDIÓW MIĘDZYNARODOWYCH
NA RZECZ ROZWOJU*

국제 개발 연구소

Enviar correspondencia a:

**Centro de Estudios Internacionales para el Desarrollo - CEID
Av. Juan Bautista Alberdi 6043 8°
C1440AAL - Buenos Aires
Argentina**

**Telefax: (5411) 3535-5920
admin@ceid.edu.ar
www.ceid.edu.ar**
