

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE UN HORNO QUE UTILIZA COMO COMBUSTIBLE CASCARILLA DE ARROZ

Evaluation of the power efficiency of a furnace that uses like combustible husk of rice

RESUMEN

Existen solo unas pocas maneras mediante las cuales el hombre produce la energía para satisfacer sus necesidades, y la mayoría de estas maneras implican la combustión de un combustible ya sea sólido, líquido ó gaseoso, buscando que la eficiencia térmica y de la combustión se acerque lo más posible al 100 %.

En este estudio se discuten los procedimientos para cuantificar la eficiencia térmica y de la combustión, en un horno que utiliza como combustible cascarilla de arroz, mediante la aplicación de la norma soviética y el método indirecto, se analizan los factores más influyentes sobre esta, realizando pruebas experimentales para obtener algunas variables.

PALABRAS CLAVES: Cascarilla de arroz, Combustión, Eficiencia, Energética

ABSTRACT

Few ways exist single by means of which the man produces the energy to satisfy his necessities and most of these ways they imply the combustion of a solid fuel or, liquid or gaseous, looking for that the thermal efficiency and of the combustion approaches most possible 100%.

In this study the procedures are discussed to quantify the thermal efficiency and of the combustion, in a furnace that uses like combustible husk of rice, by means of the application of the Soviet norm and the indirect method, analyze the most influential factors on this, making experimental tests to obtain some variables.

KEYWORDS: husk of rice, combustion, efficiency, power

1. INTRODUCCIÓN

Los hornos en la industria molinera del Departamento del Tolima son utilizados para calentar aire a partir de la energía obtenida en la combustión de la cascarilla de arroz (Figura 1). Normalmente son construidos en ladrillo Tolete en su parte externa y en ladrillo refractario en su parte interna.

La cascarilla llega al horno por sistemas de transporte como sinfines y es alimentada a la tolva por medio de un elevador de cangilones. Es dosificada al quemador por cuatro sinfines alimentadores de cascarilla que son accionados sincrónicamente por un motorreductor controlado por un temporizador. [1]

El aire es insuflado por un ventilador al sistema de combustión, dentro del hogar.

Las cenizas se deslizan por efectos de la gravedad hasta el sinfín de evacuación, al mismo tiempo que se alimenta cascarilla. La cascarilla es apagada por un sistema de aspersión de agua, con el objeto de bajar la temperatura a la ceniza, y evitar que se quemé totalmente, ya que no se podría vender como subproducto (abono para flores).

AGUSTÍN VALVERDE G.

Ingeniero Mecánico, M.Sc.

Director grupo de investigación en Eficiencia Energética y Medio Ambiente GEMA.

Universidad de Ibagué

Agustin.valverde@unibague.edu.co

BIENVENIDO SARRIA L.

Ingeniero Mecánico, Ph.D.

Centro de Estudio de Energía y Medio Ambiente CEEMA

Universidad de Cienfuegos Cuba.

Bslopez2000@yahoo.es

JOSÉ P. MONTEAGUDO Y.

Ingeniero Mecánico, Ph.D.

Centro de Estudio de Energía y Medio Ambiente CEEMA.

jpmyanes@yahoo.es

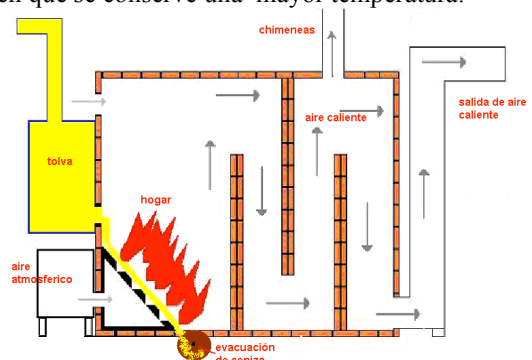


Figura 1. Vista transversal de un horno de cascarilla de arroz

El horno ha sido operado para quemar hasta 1000 Kg /h de cascarilla de arroz, pero debido a la presencia de

algunos agrietamientos en el ladrillo tolete en la actualidad se está trabajando con 500 Kg / h.

La temperatura de entrada del aire ambiente es de 35.6°C y la salida de la mezcla de aire más gases de combustión de 500°C.

2. BALANCE DE MASA

La masa que entra como combustible, más la masa del aire, debe ser igual a la masa que sale formando parte de los gases de combustión más la cantidad de cenizas que sale por los ceniceros 1 y 2.

$$\dot{m}_a + \dot{m}_c = \dot{m}_{ce} + \dot{m}_g \quad (1.0)$$

El flujo másico de combustible (\dot{m}_c) obtenido por mediciones directa es de 500 Kg / h.

2.1 Determinación del flujo másico de aire (\dot{m}_a)

Para calcular la cantidad de aire necesaria para la combustión de la cascarilla de arroz hacemos uso de la siguiente ecuación:

$$w_a = 11.53 C + 34.54 (H - (O / 8)) + 4.295 S \quad (2.0)$$

El análisis elemental de la cascarilla de arroz para el Departamento del Tolima es el siguiente:

Carbono = 39%; Hidrógeno = 5.2%; Oxígeno = 3.7%; Azufre = 0.32%. [3] [5]

De la aplicación de la ecuación 2.0 se obtuvo

$w_a = 4.71$ (Lb de aire / Lb de cascarilla) En condiciones estequiométricas.

$$\dot{m}_a = 49.68 \text{ Kg/min} \quad (2980.8 \text{ Kg/h}).$$

2.1.1 Flujo volumétrico de aire necesario para la combustión (\dot{V}_m).

El flujo volumétrico de aire necesario para la combustión de la cascarilla de arroz en condiciones estequiométricas, se obtuvo, calculando inicialmente el volumen específico del aire y multiplicándolo por el flujo másico de cascarilla.

Haciendo uso de la ecuación 3.0 se calculó el volumen específico del aire.

$$V = W_a * R (t_a + 460) / (144 * P_a) \quad (3.0)$$

La temperatura promedio durante el día en el Espinal es de 96.08 °F y la presión atmosférica de 12.936 Psia, reemplazando estos valores en la ecuación (3.0) tenemos:

$$V = 74.94 \text{ Pie}^3 / (\text{lb}).$$

Al multiplicar el volumen específico por el flujo másico de cascarilla (500 Kg / h).

$$\dot{V}_m = 1373.9 \text{ CFM. En condiciones Estequiométricas}$$

2.1.2 Flujo Volumétrico de aire Proporcionado por el Ventilador Existente (\dot{V}_m)

Este se cálculo por mediciones directa para lo cual se midió la velocidad del aire proporcionado por cada ventilador en cinco puntos distintos en forma transversal al flujo Tabla 1. y se obtuvo los valores promedio de velocidad del aire 973.8, 976.4 (Pie / min) para los ventiladores uno y dos respectivamente. Este valor promedio de velocidad multiplicado por el área transversal (10 X 12) pulgadas, (alto X Ancho) del ducto nos proporciona el flujo volumétrico (\dot{V}_m).

Ventilador 1 Velocidad (Pie / min)	Ventilador 2 Velocidad (Pie / min)
965	966
990	980
970	988
976	972
968	976
973.8	976.4

Tabla 1. Determinación de la velocidad del aire en los Ventiladores

$$\dot{V}_{m1} = 811.17 \text{ CFM}$$

$$\dot{V}_{m2} = 813.34 \text{ CFM}$$

$$\dot{V}_a = \dot{V}_{m1} + \dot{V}_{m2} = 1624.51 \text{ CFM} \quad (46 \text{ m}^3 / \text{min})$$

2.1.3 Porcentaje de Exceso de aire (α_a)

Con los valores de \dot{V}_m y \dot{V}_a obtenemos el porcentaje de exceso de aire

$$\alpha_a = (1624.51 - 1373.9) * 100 / (1624.51) = 15.4 \%$$

Con el valor de \dot{V}_a y la densidad del aire (ρ) calculamos el flujo másico de aire aplicando la siguiente ecuación.

$$\dot{m}_a = \rho * \dot{V}_a \quad (4.0)$$

$\rho = 1.08 \text{ Kg} / \text{m}^3$ para las condiciones de Ibagué (0.95 bar y 35 °C).

$$\dot{m}_a = 49.68 \text{ Kg/min} \quad (2980.8 \text{ Kg/h}).$$

2.2 Determinación del flujo másico de cenizas \dot{m}_{ce} .

Para determinar este flujo se pesó la cantidad de ceniza que salía por los ceniceros 1 y 2 recolectada durante una hora, esta operación se realizó durante cinco días una vez

por día los resultados de las mediciones se presentan en la tabla 2.

Muestra	Cenicero 1 Kg	Cenicero 2 Kg
1	53.00	24.10
2	55.40	26.30
3	54.50	25.00
4	52.60	23.20
5	51.30	23.60
Total	266.8	122.2
Promedio	53.36	24.4

Tabla 2. Datos muestras Flujo de cenizas cenicero 1 y 2

La Tabla 2. Proporciona los valores de los flujos másicos de ceniza el cual corresponde a los valores promedios obtenidos durante las mediciones, a saber:

2.2.1 Cálculo del flujo másico de las cenizas en el horno (\dot{m}_{ci}).

$$\dot{m}_{ci} = \dot{m}_c \times \% Ce / 100 \quad (5.0)$$

$$\dot{m}_{ci} = 89 \text{ Kg / h}$$

2.2.2 Determinación del flujo másico de cenizas volátil (\dot{m}_{cv}).

Para determinar el flujo másico de las cenizas volátiles hacemos uso del balance de masa el cual representamos en la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_{cv} = \dot{m}_c - \dot{m}_{c1} - \dot{m}_{c2}$$

$$\dot{m}_{cv} = 11.24 \text{ Kg / h}$$

$$\dot{m}_{c1} = 53.36 \text{ Kg / h mediciones directa Tabla 2.}$$

$$\dot{m}_{c2} = 24.4 \text{ Kg / h mediciones directa Tabla 2.}$$

2.2.3 Determinación de la fracción de cenizas que salen por los ceniceros 1, 2 y volátil.

$$\%C_v = (\dot{m}_{cv} / \dot{m}_{ci}) \times 100 = 12.62$$

$$\%C_1 = (\dot{m}_{c1} / \dot{m}_c) \times 100 = 59.95$$

$$\%C_2 = (\dot{m}_{c2} / \dot{m}_c) \times 100 = 27.41$$

2.2.3 Determinación del flujo masico de gases \dot{m}_g .

Si de la ecuación 1.0 despejamos el flujo másico de gases tenemos:

$$\dot{m}_g = 3391.8 \text{ Kg/h}$$

Teniendo en cuenta que en el horno se realiza una mezcla de gases producto de la combustión, con aire frío, con el fin de elevarle la temperatura a este último. Para determinar la cantidad de aire adicional que ingresa al horno, se realizó un balance de masa entre los gases producto de la combustión, el aire frío adicionado y la mezcla de los gases que sale del horno hacia el proceso de secado.

$$\dot{m}_g + \dot{m}_{ad} = \dot{m}_m \quad (6.0)$$

En la determinación del flujo másico de la mezcla, se tuvo en cuenta las dimensiones de los ductos (1.5 × 1.35 m), para un área transversal de 2.025 m², y con la velocidad promedio de la mezcla (123.3 m/h) se obtuvo el flujo másico mediante la utilización de la ecuación de continuidad 7.0

$$\dot{m}_m = \rho \times V \times A \quad (7.0)$$

ρ = Densidad de la mezcla de gases (0.648 Kg / m³) obtenida por tabla con la temperatura de la mezcla (318°C)

$$\dot{m}_m = 9705.66 \text{ Kg / h}$$

Despejando el flujo másico de aire frío adicional de la ecuación 6.0 tenemos:

$$\dot{m}_{ad} = \dot{m}_m - \dot{m}_g$$

$$\dot{m}_{ad} = 6313.86 \text{ Kg/h}$$

3. BALANCE DE ENERGÍA

Mediante el funcionamiento del horno la energía que entra es empleada una parte para elevarle la temperatura al aire y la otra para satisfacer las pérdidas.

Se entiende por balance térmico del horno la igualdad del calor disponible con la suma del calor útil más las perdidas de calor ecuación 8.0.

$$Q_D = Q_1 + \Sigma Qi \quad (8.0)$$

3.1 Calor disponible (Q_D)

El flujo calórico que ingresa al horno está dado por el calor que ingresa con el combustible (Q_c) y el calor que ingresa con el aire (Q_a) de tal manera que el calor disponible lo podemos expresar por: [4]

$$Q_D = Q_C + Q_a \quad (9.0)$$

Pero:

$$Q_c = \dot{m}_c \times HHL$$

$$Q_c = 8945000 \text{Kj / h (2484.72KW)}$$

$$Q_a = \dot{m}_{at} \times ha$$

$$ha = 306.18 \text{ Kj / Kg a } 306 \text{ K [6]}$$

$$\dot{m}_{at} = \dot{m}_a + \dot{m}_{ad}$$

$$\dot{m}_{at} = 9282.66 \text{ Kg / h}$$

$$Q_a = 2842164.8 \text{ Kj / h (789.49 KW)}$$

Reemplazando en la ecuación 9.0

$$Q_D = 3274.1 \text{ Kw}$$

3.2 Calor aprovechado para elevarle la temperatura al aire (Q₁)

Este lo calculamos utilizando la siguiente ecuación: [4]

$$Q_1 = \dot{m}_m \times h_m \quad (10.0)$$

$$h_m = 597.1 \text{ Kj / Kg [6]}$$

Resolviendo la ecuación 10.0

$$Q_1 = 5\,795\,249.59 \text{ Kj / Kg (1610 Kw)}$$

3.3 Pérdidas de calor (ΣQ_i).

En la realización de este cálculo no se tiene en cuenta las pérdidas ocasionadas por los gases de escape (Q₂) y la incombustión química incompleta (Q₃). En el horno los gases producto de la combustión se mezclan con aire frío, diluyendo el monóxido de carbono. [4]

$$\Sigma Q_i = Q_4 + Q_5 + Q_6 \quad (11.0)$$

3.3.1 Perdida de calor por combustión mecánica incompleta Q₄

La pérdida por combustión mecánica es propia de los combustibles sólidos y está dada por la combustión de partículas sólidas del horno. Estas partículas de combustible contienen carbono, hidrógeno y azufre. Parte de estas partículas salen del horno con los residuos de la combustión, mientras que la otra parte salen del horno a la atmósfera junto a los gases de escape. [4]

Las pérdidas la podemos calcular aplicando la ecuación 11.0.

$$Q_4 = Q_D \times (q_4 / 100) \quad (12.0)$$

Donde:

$$q_4 = (32650 * A^t / Q_D) * (a_p * C_p / (100 - C_p) + a_v * C_v / (100 - C_v)) \quad (13.0)$$

En la determinación de las perdidas por incombustión mecánica se realizó un análisis de cenizas en los dos ceniceros 1 y 2 para cuantificar el contenido de carbono.

Toma de la Muestra

Para la toma de la muestra se siguieron los siguientes pasos:

- **Selección del punto de muestreo:** Como el horno tiene dos ceniceros se seleccionaron los dos como puntos de muestreo y se identificaron como cenicero 1 y 2 respectivamente.

- **Determinación del número de puntos:** Se determinó tomar la muestra de tres puntos por cenicero, Lado izquierdo Centro y lado derecho del cenicero.
- **Cantidad:** la cantidad seleccionada fue de 200 g por punto, es decir 600 g por cenicero.

Después de algunos análisis previos a la ceniza se determinó como tiempo límite de temperatura para evacuación de humedad dos (2) horas a 105°C y para quemar totalmente el carbono presente en la cenizas seis (6) horas a 700°C.

Análisis de Resultados

En las tablas 3 y 4 se presentan los procesamientos de los análisis de laboratorios, de las muestras seleccionadas a diferentes temperaturas.

En la columna (a) se presentan los valores del peso inicial de la muestra, mientras que en la (b) aparecen los pesos después de haberle extraído la humedad a una temperatura de 105 °C.

La humedad expresada en unidad de peso se da en la columna (c), El peso de la ceniza obtenido después de quemar toda la sustancia combustible se registra en la columna (d), en la columna (e) se exprésale contenido de carbono en porciento del peso registrado sobre la masa seca y en la columna (f) se expresa el contenido de ceniza en porciento del peso de la masa seca.

El máximo contenido de ceniza obtenido con la muestra en los ceniceros 1 y 2 fue de 90.78% que no supera el Límite de control superior (LCS) y el mínimo de 88.98% que es superior al obtenido en el límite de control inferior (LCI) por lo cual el proceso se puede considerar estable con un valor medio de contenido de cenizas de 90% El valor máximo obtenido del porcentaje de carbono en los dos ceniceros es de (11.22%), no supera el límite de

Pi ₁ (a)	P ₁₁ (b)	W (c) %	Ce (d) P ₁₂	C (e) %	Ce (f) %
200	120.00	40.00	108.000	10	90
200	129.95	35.02	116.950	10	90
200	123.88	38.07	111.616	9.89	90.11
200	127.27	36.36	113.270	11.02	88.98
200	124.76	37.62	113.278	9.23	90.77

Tabla 3. Análisis de resultados muestra cenicero 1.

Pi ₂ (a)	P ₂₂ (b)	W (d) %	Ce (e) P ₂₃	C (g) %	Ce (h) %
200	119.97	40.00	107.97	10.00	90.00
200	126.00	37.00	113.65	9.84	90.16
200	131.99	34.00	118.96	9.88	90.12
200	126.36	36.82	112.21	11.22	88.78
200	136.20	31.90	123.67	9.22	90.78

Tabla 4. Análisis de resultados muestra cenicero 2

control superior, y el valor mínimo (9.22%) está por encima del límite de control inferior, Por las razones antes expuestas podemos considerar que el proceso es estable con un valor medio de contenido de carbono en la muestra de 10.032%.

Para la cascarilla de arroz utilizada en el departamento del Tolima $Q_D = 17890 \text{ Kj/Kg}$ con un contenido de humedad del 8.9% y ceniza 17.8%.

Del análisis de cenizas obtuvimos:

$a_p = 87.36 \%$ obtenido al evaluar las muestras de los ceniceros uno y dos.

$a_v = 12.62 \%$; $C_p = 6.28$ y $C_v = 6.28$.

Reemplazando los valores anteriores en la ecuación 12.0 $q_4 = 2.18\%$

Si se lleva el contenido de humedad a condiciones de trabajo real, se puede corregir el porcentaje promedio de carbono.

$$\%C_c = 9.53$$

Recalculando q_4 se tiene:

$$q_4 = 3.42\%$$

Reemplazando el valor de q_4 en la ecuación 11.0

$$Q_4 = 112 \text{ KW}$$

3.3.2 Pérdidas por radiación y convección (Q_5)

Son las que genera el horno con su entorno, es decir el calor cedido por radiación y convección a la atmósfera y este depende de los diferentes tipos de superficie. El cálculo se efectúa desglosando la superficie exterior del horno en partes, y calculando las pérdidas de calor de cada una de ellas, y aplicando la ecuación 14.0 se obtuvieron los resultados que aparecen en la Tabla 5.

$$Q_5 = A \times (T_i - T_e) / \Sigma R_i \quad (14.0)$$

Las paredes del horno están conformadas por ladrillo tolete ($K = 1 \text{ w} / (m \times K)$) y ladrillo refractario ($K = 1.5 \text{ w} / (m \times K)$), cada una con un espesor de 0.1 m. El techo está conformado por una capa de lana mineral ($K = 0.076 \text{ w} / (m \times K)$) y concreto ($K = 1.4 \text{ w} / (m \times K)$) con unos espesores de 0.0762 y 0.102 m, respectivamente. [2]

Tipo de Pared	A (m ²)	t _i (°C)	t _e (°C)	R _i (m ² XK /w)	L (m)	Q (Kw)
L.I	21.72	753	314	0.17	0.10	57.20
L.D	22.08	773	314	0.17	0.10	60.80
F	13.2	773	314	0.17	0.10	36.43
T	31.05	773	314	1.07	0.18	13.50
Total						168 Kw

Tabla 5. Pérdidas por radiación y convección horno Ladrillo tolete

3.3.3 Pérdida de calor sensible con las cenizas (Q_6)

Las pérdidas de calor sensible con las cenizas se obtiene despejando del balance de energía ecuación 8.0 [4]

$$Q_6 = 1.384.1 \text{ Kw}$$

4. EFICIENCIA TÉRMICA DEL HORNO (η)

Para el cálculo de la eficiencia térmica se utiliza la ecuación 14.0: [4]

$$\eta = Q_1 \times 100 / (Q_D \times (1 - q_4/100)) \quad (14.0)$$

$$\eta = 51\%$$

5. EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN (η_c)

En la determinación de la eficiencia de combustión se utiliza la ecuación 15.0: [4]

$$\eta_c = 100 - q_4 \quad (15.0)$$

$$\eta_c = 96.8\%$$

6. CONCLUSIONES

Los hornos de cascarilla son una excelente solución al problema de generación de calor y electricidad, en la industria molinera, por que se elimina la compra de energía, y de combustibles costosos, pero se incrementan los problemas ambientales, debido a la baja eficiencia térmica y de combustión con que operan (51% y 96.8%).

El sistema de aspersión del horno hace que el 42% del calor que entra se pierda con las cenizas en forma de calor sensibles lo cual se constituye en la mayor pérdida de calor que presenta el horno.

En el horno de combustión de cascarilla tan solo el 49 % del calor suministrado es utilizado para calentar el aire frío utilizado en el proceso desecado, el 3.4% se pierde por incombustión mecánica y el 5.6 se pierde por convección y radiación a través de las superficies.

La eficiencia de combustión del horno de ladrillo tolete es baja (96.8) incrementando las pérdidas de calor por incombustión mecánica presentadas por el alto contenido de carbono de las cenizas (10%).

En la cámara de combustión se mezcla el 65% de aire frío con un 35% de gases producto de la combustión.

Debido a lo anterior podemos afirmar que el 60% de la ceniza sale por el cenicero 1, el 27.41 % por el cenicero 2 y el 12.62% son cenizas volátiles que finalmente van a parar al proceso de secado.

El combustible (Cascarilla de arroz) como fuente de energía renovable, aun tiene mucho para ser estudiada bajo el comportamiento de su combustión.

Nomenclatura Utilizada

A = área transversal al flujo en, m^2 .

A^t = Contenido de ceniza en la composición de trabajo del combustible, (%).

a_p = fracción en peso de ceniza, depositada en la parrilla

a_v = Fracción en peso de la ceniza, arrastrada con los gases de escape.

C = Fracción de carbono.

%Ce = porcentaje de cenizas presente en la cascarilla en.

C_p y C_v = Contenido de sustancia combustible en los residuos de la parrilla y en la sustancia volátil, (%).

H = Fracción de hidrógeno.

h_a = entalpía del aire.

HHL = poder calórico inferior del combustible.

K = Conductividad térmica.

L = Espesor de la pared.

•

\dot{m}_a = Flujo másico de aire.

•

\dot{m}_{ad} = Flujo másico de aire frío adicionado.

•

\dot{m}_c = Flujo másico de combustible.

•

\dot{m}_{ce} = Flujo másico de cenizas.

•

\dot{m}_g = Flujo másico de gases calientes.

•

\dot{m}_m = Flujo másico de la mezcla.

O = Fracción de oxígeno.

P_a = Presión del aire en Psia.

Q_4 = Perdida de calor por combustión mecánica incompleta.

Q_5 = Perdida de calor por radiación y convección.

Q_6 = Perdida de calor sensible con las cenizas.

Q_D = Calor disponible, (KJ/Kg).

R = Constante del aire ($53.3 \text{ Pie} \cdot \text{lbf} / (\text{lbm} \cdot ^\circ\text{R})$)

S = Fracción de azufre.

T_a = Temperatura del aire en $^\circ\text{F}$.

T_e = Temperatura externa de la pared del horno en, K

T_i = Temperatura interna de la pared del horno en, K.

V = volumen específico del aire en $\text{Pie}^3 / \text{lbm}$.

v = velocidad de la mezcla de gases en m/h

ΣR_i = Sumatoria de resistencias térmicas.

7. BIBLIOGRAFÍA

[1] CASTILLO, N. Álvaro, GAVIRIA L. Jaime. Molinería de arroz en los trópicos. Editorial Ediagro Ltda. 1999.

[2] CERQUERA, Diego y GALINDO, Oscar Estudio de la eficiencia energética del proceso de secado de arroz del Molino Roa S.A.

Universidad de Ibagué. Ibagué. 2006

[3] CONAE. Comisión Nacional para el Ahorro de Energía. (México)
<http://www.conae.gob.mx/> (Septiembre de 2005)

[4] FERNANDEZ, Beatriz. Tesis de Maestría en Eficiencia Energética, CEEMA, UCF, 2004. Aerodinámica de la combustión con doble Turbolizador Estático.

[5] INDUARROZ. Revista Induarroz, Números varios, Bogotá, D.C., 2000 y 2002.

[6] KENNERH, Wark, JR. Termodinámica Quinta Edición. Mc.Graw Hill .1991