



# Rutina para la Estimación del Rendimiento Energético de Distintos Combustibles de Caldera.

Menjívar, I., Morán, L., Chávez, F.

*Departamento de Ingeniería de Procesos y Ciencias Ambientales, Universidad Centroamericana José Simeón Cañas, fchavez@uca.edu.sv*

**Abstract**—En el campo de la investigación de combustibles alternos, se realizó un estudio para la Evaluación de los subproductos y desechos cerveceros, poda municipal y King Grass para ser empleados como fuentes combustibles, en sustitución del fueloil utilizado actualmente en la industria de elaboración de cerveza [1]. Parte de dicho estudio, comprendió la elaboración de una rutina de cálculo en el lenguaje de programación MATLAB®, para la estimación del rendimiento energético esperado en la combustión de los distintos sustitutos evaluados.

La rutina fue desarrollada en base al planteamiento ecuaciones de balances de materia y energía, propios de la combustión en una caldera y ecuaciones auxiliares, tales como ajustes de densidad en función de temperatura, capacidad calorífica y leyes de los gases ideales, de tal forma que se pudiese trabajar con el fueloil 6 y los combustibles sólidos evaluados en el estudio anteriormente mencionado.

De esta forma, se pudo estimar el calor neto y la eficiencia térmica que puede alcanzarse en una combustión de biomasa o fueloil 6 bajo condiciones específicas de los materiales como la humedad, poder calorífico superior seco (los cuales fueron

obtenidos experimentalmente en la primera parte del estudio), composición elemental teórica y parámetros atmosféricos del aire propios del lugar de instalación de la caldera. Adicionalmente por medio de los balances de materia fue posible estimar los flujos de gases de chimenea, el flujo de aire seco necesario para la combustión y las toneladas de dióxido de carbono a emitir.

Finalmente se realizó un consolidado de la información obtenida en los análisis llevados a cabo en la primera parte del trabajo junto con los resultados de la evaluación en la rutina de cálculo, para realizar una comparación entre las distintas opciones y establecer los materiales que pudiesen desempeñarse eficientemente en una caldera de combustibles sólidos.

**Palabras claves**—Biomasa, Combustibles Alternativos, Energía Térmica, Interfaz gráfica.

## I. INTRODUCCIÓN

Entre los estudios realizados en este ámbito, se puede citar el realizado por Alfaro, Burgos y Durán [2] en el análisis de eficiencia energética en calderas de biomasa Dicho estudio



consistió en la evaluación como fuentes energéticas de algunos desechos agroindustriales generados en El Salvador, tales como la cáscara de arroz en granza, la tusa del maíz, el carbón y la estopa de coco. Dichos materiales fueron evaluados en base a un sistema de ecuaciones de balances de materia y energía, para simular la combustión en una caldera bagacera, resultado la cascarilla de arroz como la biomasa con la eficiencia de combustión más alta con respecto a los demás materiales estudiados.

A pesar del trabajo anteriormente descrito y, muchos otros referentes al estudio el aprovechamiento de subproductos y desechos, no existe un precedente de la evaluación o del uso de los éstos materiales cuando son provenientes de la industria de elaboración de cerveza y de la poda municipal, a pesar que ésta última se genera en grandes cantidades.

Adicionalmente no se encontraron registros de rutinas de cálculo en las que se pudieran evaluar energéticamente tanto a un combustible fósil como el fuel Oil 6 y los subproductos o desechos de biomasa cervecera o de poda municipal.

Adicionalmente, a la evaluación de las propiedades de los materiales descrita en la primera parte del trabajo, se realizó una evaluación energética de éstos por medio del desarrollo de una rutina de cálculo dentro de una interfaz gráfica que determina los flujos de gases propios de la combustión, y que a la vez estima teóricamente la cantidad del calor de combustión que puede ser aprovechado para los procesos de producción de vapor y el rendimiento térmico de cada uno de los combustibles.

Esta rutina fue desarrollada en base al planteamiento ecuaciones de balances de materia y energía propios de la combustión en una caldera y algunas ecuaciones auxiliares como ajustes de densidad en función de temperatura para el caso del fuel Oil 6, correlaciones para la estimación de la capacidad calorífica de los materiales de manera que puedan ser ingresados a distintas temperaturas y leyes de los gases ideales para la estimación de los volúmenes de aire seco requeridos.

Los datos a ingresados por el usuario se refieren al flujo e combustible, las condiciones de ingreso de los materiales combustibles (humedad y temperatura), las propiedades del aire utilizado en la combustión (humedad relativa, temperatura y presión atmosférica), la composición elemental de los combustibles como porcentaje másico, y algunos datos de concentración sobre los gases de chimenea que se estima se producirán en la combustión. Consecuentemente, a partir del ingreso de los datos anteriormente descritos la rutina fue capaz de estimar el calor neto y la eficiencia térmica que puede alcanzarse en una combustión de biomasa o fueloil 6; adicionalmente por medio de los balances de materia fue posible estimar los flujos de gases de chimenea, el flujo de aire seco necesario para la combustión y las toneladas de dióxido de carbono a emitir.

Finalmente, todos los resultados obtenidos fueron comparados contra las características que se reportan para el King Grass y el Fuel Oil, permitiendo la obtención de un panorama más real del desempeño como combustibles que podrían tener los materiales evaluados, y además se logró la obtención de los datos referentes a la cobertura de la demanda térmica que

llegarían a suplir, de ser éstos empleados como fuentes energéticas.

## II. MÉTODO

La metodología utilizada comprende tres etapas principales, la primera es la etapa de delimitación del sistema por medio de un diagrama de la operación, la segunda etapa es el desarrollo de las ecuaciones de materia y energía del sistema planteado y la última es la evaluación con datos reales de la combustión de los materiales previamente seleccionados.

### A. Diagrama de la operación

Para el desarrollo de la rutina de cálculo fue preciso plantear un diagrama de la cámara de combustión, como se muestra en la Fig. 1, incluyendo en éste todas las corrientes de materiales de entrada y salida del sistema; posteriormente se explican cada uno de los flujos planteados en el diagrama en base a un período de operación mensual.

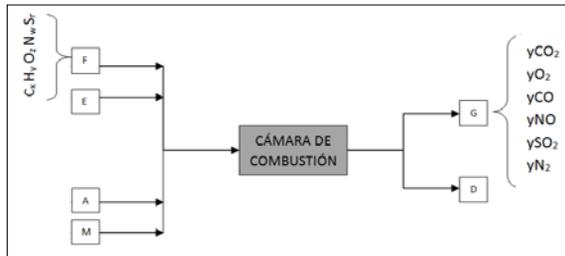


Fig. 1 Diagrama de la cámara de combustión

- Flujo de combustible seco (F): Se refiere a la cantidad del combustible seco que ingresa a la cámara de combustión, con una composición elemental porcentual (x, y, z, w, r) donde los elementos predominantes son el carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y azufre.

- Flujo de agua del combustible (E): Se refiere a la cantidad de agua libre que ingresa con el combustible, es decir, el porcentaje de humedad del combustible.
- Volumen de aire requerido para la combustión (A): Es la cantidad de aire total que se requiere para que ocurra la combustión; a pesar que el flujo se define como aire total, fue necesario expresarse éste valor como cantidad de aire seco creando una nueva variable para denotar la cantidad de agua del aire.
- Cantidad de agua contenida en el aire atmosférico (M): Es la cantidad de agua que presenta el aire atmosférico, expresada como la humedad relativa del aire.
- Flujo de gases de combustión en base seca (G): Es la cantidad de gases de combustión. Se estima que sus componentes principales son los siguientes: dióxido de carbono, oxígeno, monóxido de carbono, óxido nítrico, dióxido de azufre y nitrógeno [3].
- Cantidad de agua en los gases de combustión (D): Es la cantidad de agua que se evacúa del sistema en forma de vapor. Este flujo está teóricamente conformado por el vapor del agua de la corriente de aire, el agua del combustible en forma de vapor y el agua formada en la combustión como vapor.

### B. Balance de materia

Para el sistema delimitado solamente algunos flujos son realmente conocidos, por lo cual por medio del planteamiento de un sistema de ecuaciones moleculares podrán conocerse las demás variables que definen al sistema. Estas variables de interés con sus respectivas unidades de medición se encuentran descritas en la TABLA I.

TABLA I  
VARIABLES Y UNIDADES DEL BALANCE DE MATERIA

Variable	Descripción	Unidades en interfaz
$F$	Flujo de combustible seco	kg
$E$	Cantidad de agua del flujo de combustible	% (b.h)
$A$	Flujo de aire total	m <sup>3</sup>
$M$	Cantidad de agua en el aire atmosférico	kg
$G$	Flujo de gases de chimenea en base seca	Tm
$D$	Flujo de agua en los gases de combustión	Tm
$x$	Composición elemental de carbono del combustible	%
$y$	Composición elemental de hidrógeno del combustible	%
$z$	Composición elemental de oxígeno del combustible	%
$w$	Composición elemental de nitrógeno del combustible	%

Variable	Descripción	Unidades en interfaz
	combustible	
$r$	Composición elemental de azufre del combustible	%
$yCO_2$	Composición de dióxido de carbono en chimenea	%
$yO_2$	Composición de oxígeno en chimenea	%
$yCO$	Composición de monóxido de carbono en chimenea	ppm
$yNO$	Composición de óxido nítrico en chimenea	ppm
$ySO_2$	Composición de dióxido de azufre en chimenea	ppm
$yN_2$	Composición de nitrógeno en chimenea	%
$xi$	Composición de agua en el aire atmosférico	%

Fuente: Elaboración Propia

A partir de las variables y unidades establecidas en la F1 y la T1 se desarrollaron una serie de 7 ecuaciones en las cuales 5 de



ellas correspondían a los balances moleculares de los elementos involucrados en la combustión: carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre; una de ellas es la sumatoria de la composiciones molares de los gases de combustión secos, y la última se refiere a la relación entre la composición de agua en el aire y la humedad relativa.

Cabe destacar que la resolución del sistema planteado anteriormente se puede llevar a cabo solamente si se proveen las entradas necesarias para que el número de ecuaciones coincida con el número de variables a determinar (o salidas); los valores de entrada y salida se determinaron a partir del conteo de variables y ecuaciones mostrado en la TABLA II.

TABLA II  
CONTEO DE VARIABLES Y ENTRADAS DEL SISTEMA

Variables	Ecuaciones	Entradas
18	7	$F$
		$E$ (Como % de Humedad)
		$xi$ (Como % Humedad relativa (%Hr))
		$x, y, z, w, r$ (Como % elemental )
		$yO_2, yNO, yCO$ (Como concentración )

Fuente: Elaboración Propia

C. Balance de energía

Los valores de los flujos obtenidos a partir del balance molecular muestran información sobre las cantidades y concentraciones de las especies involucradas, sin embargo para poder realizar un cálculo teórico de la eficiencia térmica del combustible a las condiciones de operación debe realizarse un

balance energético, en el cual es necesario introducir al sistema información como las temperaturas de los flujos de materiales y el poder calorífico superior del combustible seco, a su vez es necesario plantear un esquema de desarrollo de la combustión en el cual se incluya toda la información necesaria para el planteamiento del sistema de ecuaciones. Este esquema de resolución se encuentra planteado en la Fig. 2, y las nuevas variables mostradas se describen en la TABLA III.

Como puede observarse, el balance energético precisa el cálculo de nuevas variables la interfaz solicita datos de entrada adicionales a los detallados en la TABLA II; éstas nuevas entradas consisten en las temperaturas de entrada del combustible, la temperatura del aire, la temperatura estimada de los gases de chimenea y el más fundamental el poder calorífico superior de los combustibles secos, el cual fue determinado dentro de los análisis de calorimetría descritos en la primera parte del artículo.

TABLA III  
CONTEO DE VARIABLES Y ENTRADAS DEL SISTEMA

Variable	Descripción	Unidades
$T_{co}$	Temperatura de entrada del combustible	°C
$T_a$	Temperatura de entrada del aire	°C
$T_g$	Temperatura de salida de los gases de chimenea	°C
25	Temperatura de referencia de las entalpías	°C
$\Delta H_1$	Calor sensible por el cambio de $T_{co}$ hasta 25°C	Btu
$\Delta H_2$	Calor sensible por el cambio de	Btu

Variable	Descripción	Unidades
	Tco hasta 25°C	
$\Delta H_3$	Calor sensible por el cambio de Ta hasta 25°C	Btu
$\Delta H_4$	Calor sensible por el cambio de Ta hasta 25°C	Btu
$\Delta H_5$	Calor de reacción por combustión a 25°C	Btu
$PCS_0$	Poder calorífico superior del combustible seco	Btu/lbmol
$\Delta H_6$	Calor de formación de CO a partir de CO <sub>2</sub> a 25 °C	Btu
$\Delta H_{7_1}$	Calor sensible por paso de agua líquida de 25 °C a 100 °C	Btu
$\Delta H_{7_2}$	Calor latente por paso de agua líquida a agua vapor	Btu
$\Delta H_{7_3}$	Calor sensible por paso de vapor de 100 °C a 25 °C	Btu
$\Delta H_7$	Suma de entalpías por cambio de fase del agua a 25 °C	Btu
$\Delta H_8$	Suma de entalpías por cambio de 25 °C a Tg	Btu
$\Delta H_{8_n}$	Calor sensible de los productos gaseosos (base seca)	Btu

Fuente: Elaboración Propia

De los datos obtenidos en el balance energético son de interés especial el calor neto aportado por la combustión y la eficiencia térmica calculada en base al poder calorífico superior del combustible seco.

En el caso del cálculo del calor neto aportado (Q), éste se define como la fracción de la energía aportada por la reacción de

combustión que teóricamente se puede aprovechar en la operación y es determinado por medio de la Ec. 1, la cual consiste en una sumatoria de los deltas de entalpía producidos por cambios de temperatura de los materiales de entrada y los productos ( $\Delta H_1$  al  $\Delta H_4$  y  $\Delta H_8$ ), el calor liberado en la combustión ( $\Delta H_5$ ), el calor de formación del monóxido de carbono de carbono por ser reacción incompleta ( $\Delta H_6$ ), y el paso a vapor del agua que permanece líquida al cabo de la reacción ( $\Delta H_7$ ) [3].

$$Q = \Delta H_1 + \Delta H_2 + \Delta H_3 + \Delta H_4 + \Delta H_5 + \Delta H_6 + \Delta H_7 + \Delta H_8 \quad (\text{Ec. 1})$$

En el caso del cálculo de la eficiencia térmica (o porcentaje de rendimiento), éste representa la fracción aprovechable de energía liberada en la combustión, y es determina en base al calor neto aportado (Q) y el calor liberado por la reacción ( $\Delta H_5$ ), tal como se muestra en la Ec. 2; cabe recordar que el calor liberado por la reacción ha sido determinado en base al poder calorífico superior del combustible seco.

$$\%Rendimiento = \frac{Q}{-\Delta H_5} * 100 \quad (\text{Ec. 2})$$

#### D. Evaluación energética

Al utilizar la interfaz creada fue necesario proporcionar datos específicos de cada una de las materias evaluadas, a fin de determinar todos los flujos de materiales y su correspondiente rendimiento térmico. Dentro de ésta evaluación asimismo fueron incluidos el cultivo energético King Grass (50 y 14% de humedad) y el combustible utilizado actualmente en la cervecería para la producción de vapor, el fuel Oil 6.

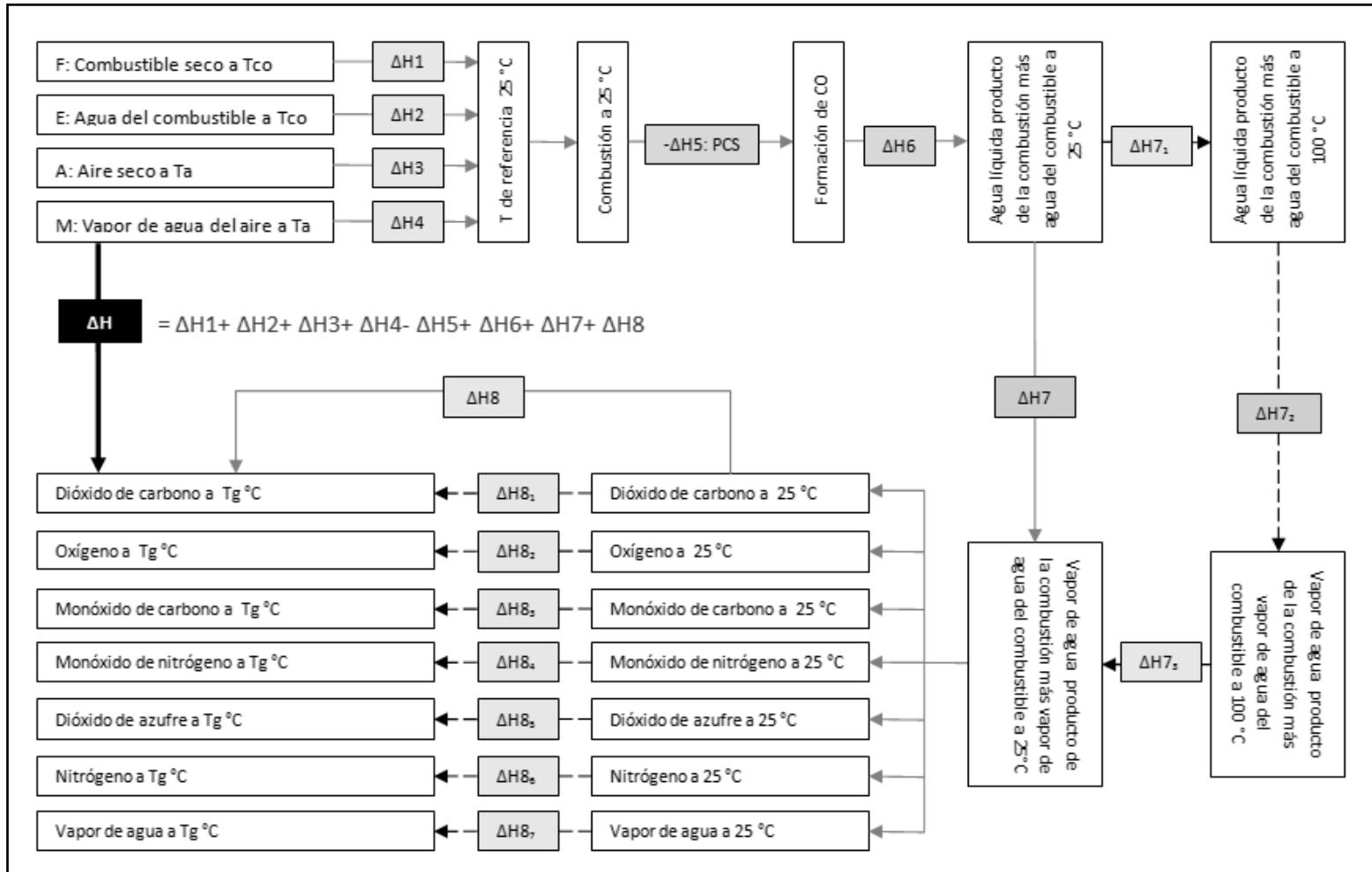


Fig. 2. Diagrama del balance de energía

Inicialmente las entradas principales al programa fueron los flujos de combustible mensuales correspondientes a todos los meses de un año de operación (abril 2013 a marzo de 2014), los cuales son datos que se investigaron como parte de la sección de caracterización y disponibilidad que se detalla en la primera parte del artículo.

Asimismo, para todos los combustibles evaluados, un grupo de entradas requeridas por el sistema de cálculo fueron las condiciones del aire a utilizar en el proceso de combustión (TABLA IV); éstas condiciones fueron proporcionadas como valores promedios de humedad relativa y temperatura, registrados en el año 2013 en la estación meteorológica del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales ubicada en el aeropuerto de Ilopango [4]

TABLA IV  
CONDICIONES ATMOSFÉRICAS PROMEDIO

Parámetro	Valor	Unidades
Temperatura del aire	24	°C
Humedad relativa	78	%

Fuente: Elaboración Propia

Las siguientes entradas requeridas, fueron las composiciones de cada una de las materiales. Para los combustibles biomásicos (TABLA V), las composiciones elementales fueron extraídas de bases de datos que se encuentran disponibles en línea [5] [6], las cuales poseen información de análisis elementales, para gran variedad de biocombustibles, llevados a cabo en distintas universidades y centros de investigación a nivel mundial; en el caso del Fuel Oil 6, todos los parámetros

son reportados para éste combustible (ver [7], [8]) y pueden ser consultados en la (TABLA VI).

Las últimas entradas requeridas, se basan en la información referente a la temperatura y los gases de chimenea producidos al usar biomasa como combustible sólido. Estos datos fueron tomados como los valores típicos reportados en la literatura [9] para calderas de biomasa, tal como se muestra en TABLA VII.

TABLA V  
COMPOSICIONES ELEMENTALES DE LA BIOMASA EVALUADA

Granza (10%)		Cáscara de malta		Cartón	
Humedad del combustible (%)	10.00	Humedad del combustible (%)	3.46	Humedad del combustible (%)	8.55
C (%)	51.1	C (%)	54.10	C (%)	49.60
H (%)	6.87	H (%)	6.60	H (%)	6.00
O (%)	36.92	O (%)	33.90	O (%)	43.70
N (%)	4.66	N (%)	4.70	N (%)	0.20
S (%)	0.44	S (%)	0.40	S (%)	0.10
Madera		Poda		King Grass	
Humedad del combustible (%)	10.14	Humedad del combustible (%)	37.62	Humedad del combustible (%)	14.00-50.00
C (%)	48.0	C (%)	49.50	C (%)	49.64
H (%)	5.90	H (%)	5.60	H (%)	5.66
O (%)	45.60	O (%)	44.20	O (%)	43.97
N (%)	0.30	N (%)	0.30	N (%)	0.63
S (%)	0.20	S (%)	0.10	S (%)	0.14

Fuente: Elaboración Propia

TABLA VI  
PROPIEDADES Y COMPOSICIONES DEL FUEL OIL 6

Poder calorífico superior (kJ/kg)	Composición elemental porcentual (%)	
43000	%C	85.7
	%H	10.5
	%O	0.4
	%N	0.5
	%S	2.8
Parámetro	Valor	Unidades
Temperatura de los gases	230.0	°C
Composición de oxígeno (O <sub>2</sub> )	2.60	%
Composición de óxido nítrico (NO)	279.0	ppm
Composición de monóxido de carbono (CO)	37.00	ppm

Fuente: Elaboración Propia

TABLA VII  
CONDICIONES GASES DE CHIMENEA DE CALDERAS DE BIOMASA

Parámetro	Valor	Unidades
Temperatura de los gases	200	°C
Composición de oxígeno (O <sub>2</sub> )	10.5	%
Composición de óxido nítrico (NO)	350	ppm
Composición de monóxido de carbono (CO)	305	ppm

Fuente: Elaboración Propia

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### A. Interfaz gráfica

El resultado del desarrollo de la rutina de cálculo y la interfaz gráfica, puede observarse en la Fig. 3, en la cual se presenta la pantalla de inicio, donde se tiene la opción de escoger si el combustible a evaluar será el fuel Oil 6 o algún tipo de combustible biomásicos como la poda municipal, los subproductos, desechos y residuos cerveceros, y el cultivo energético King Grass.

Al ingresar a una de las opciones (Fig. 4) es posible observar una sección para la introducción de los datos, así como también una sección para visualizar los resultados en la parte derecha de la pantalla.

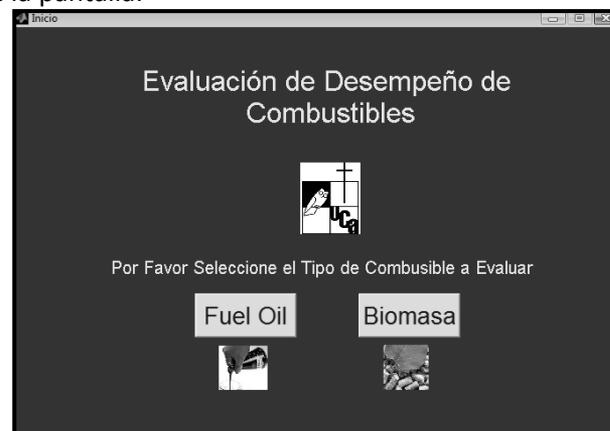


Fig. 3 Pantalla de inicio de la interfaz gráfica

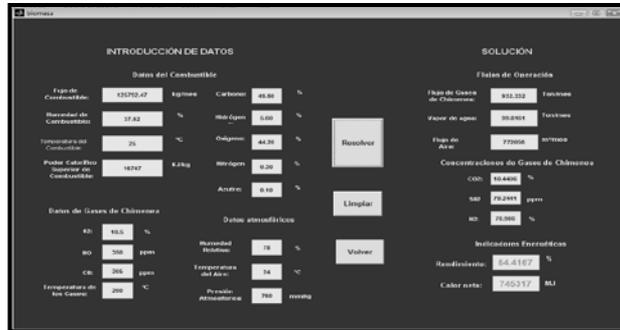


Fig. 4 Pantalla para la evaluación energética de la biomasa

**B. Resultados del calor neto aportado anualmente**

La TABLA VIII resume la disponibilidad teórica de calor neto que se obtuvo de todos los combustibles evaluados, en comparación con la cantidad de calor que se estima al generar con King Grass (con un 14% de humedad) y el calor producido por el Fuel Oil 6 que se utilizó entre abril de 2013 y marzo de 2014.

**TABLA VIII  
CALOR NETO APORTADO POR LOS COMBUSTIBLES EVALUADOS**

Combustible	Calor aportado (MJ/año)	Porcentaje con respecto a Fuel Oil 6 (%)	Porcentaje con respecto a King Grass (%)
Granza (10% humedad)	18809040.00	24.0	18.6
Cáscara de malta	4820088.00	6.2	4.8
Cartón	3990307.00	5.1	3.9

Combustible	Calor aportado (MJ/año)	Porcentaje con respecto a Fuel Oil 6 (%)	Porcentaje con respecto a King Grass (%)
Madera	265873.00	0.3	0.3
Poda	8943804.00	11.4	8.9
Fuel Oil 6	78345090.00	100.0	77.5
King Grass (14% humedad)	101025480.00	128.9	100.0
Materiales cerveceros más poda	36829112.00	47.0	36.5
Materiales cerveceros	27885308.00	35.6	27.6

Fuente: Elaboración Propia

A partir de los datos de la T8 se puede establecer que el King Grass (14% de humedad) es el combustible que mayor aporte energético generaría si se utilizara siempre la cantidad mensual estimada, ya que llega a sobrepasar el calor generado con el Fuel Oil 6. Asimismo se hace notar que la madera es el combustible alternativo que a pesar de poseer un poder calorífico similar al del King Grass y baja humedad, genera un calor neto mucho menor que los demás combustibles alternativos evaluados debido a su baja disponibilidad.

Cabe destacar también que de todos los combustibles alternativos estudiados la granza húmeda representa el mayor porcentaje de la cantidad de calor que se utilizó en el período de tiempo evaluado, con un 24% del calor generado por el Fuel



Oil y 18% para lo que estima se puede generar con el King Grass.

Simultáneamente se obtuvieron porcentajes sobre el calor neto que podría generarse con todos los materiales evaluados y éste resultó ser un 47% del calor generado con Fuel Oil 6 y un 36% del calor que se generaría con la utilización del King Grass (al 14% de humedad); a su vez, si los porcentajes anteriores se calculan en base solamente a lo que se genera dentro de la planta (materiales cerveceros), se obtiene que solamente con los materiales internos utilizados como combustible se cubrirá un 35% de la demanda de calor por Fuel Oil 6 y un 27% del calor que se hubiese generado utilizando King Grass (al 14% de humedad) en el período evaluado.

#### C. Eficiencia térmica de los combustibles

Los valores de éste parámetro que se obtuvieron se presentan en la TABLA IX, en la cual se puede observar que el combustible que presenta una mayor eficiencia térmica es el Fuel Oil 6 con un 84% seguido por la madera, la cual a su vez, presenta la mayor eficiencia energética de los combustibles alternativos evaluados con un 76%.

Sin embargo, el King grass con un 50% de humedad seguido por los desechos de poda presentan eficiencia térmica más baja, ya que del calor emitido en su combustión solo es aprovechable el 45.90 y 54% respectivamente, a las condiciones de combustión establecidas. Los demás materiales evaluados presentan las eficiencias térmicas mostradas en la TABLA IX, donde éstas son presentadas en orden ascendente para una mejor apreciación.

TABLA IX  
EFICIENCIA TÉRMICA DE LOS COMBUSTIBLES EVALUADOS

Combustible	Eficiencia Térmica (%)
King Grass (50% humedad)	45.90
Poda	54.00
King Grass (14% humedad)	72.00
Cáscara de malta	72.00
Granza (10% humedad)	73.00
Cartón	73.00
Madera	76.00
Fuel Oil 6	84.00

Fuente: Elaboración Propia

#### D. Emisiones de dióxido de carbono provenientes de la biomasa

Como se ha mencionado anteriormente, la manipulación de los datos del flujo de gases de chimenea y su composición, obtenidos por medio de la interfaz creada, permite conocer una estimación de las emisiones de dióxido de carbono que se produce en la quema de la biomasa; dicho parámetro es un indicador positivo, ya que en un sistema sustentable de explotación de recursos el carbono quemado proveniente de este tipo de materiales será luego absorbido por la biomasa forestal [10] por lo que se puede estimar que al utilizarlos como combustible, se dejarían de emitir esas cantidades del dióxido de carbono al no provenir de la quema de Fuel Oil 6, el cual es una fuente de energía no renovable.

En consecuencia, en la TABLA X se muestran las cantidades anuales de dióxido de carbono que dejarían de emitirse por el uso de Fuel Oil 6, si en su lugar se utilizaran los subproductos, desechos y residuos disponibles para cubrir parte de la demanda energética actual.

**TABLA X**  
**TONELADAS DE DIÓXIDO DE CARBONO A EMITIR**

Combustible	Porcentaje de la demanda de Fuel Oil que se cubre (%)	Cantidad de CO <sub>2</sub> proveniente del Fuel Oil que se emite actualmente (Tm/año)	Cantidad de CO <sub>2</sub> proveniente del Fuel Oil que dejaría de emitirse (Tm/año)	Cantidad de CO <sub>2</sub> proveniente del Fuel Oil que se emitiría (Tm/año)
Materiales cerveceros	35.60 %	1068.00	380.23	687.78
Materiales cerveceros más poda municipal	47.00 %		501.97	566.03

Fuente: Elaboración Propia

Como puede observarse, al utilizar los materiales provenientes del proceso cervecero como combustible para la generación de energía térmica, las emisiones de dióxido de carbono se reducen considerablemente: de 1068 a 687 toneladas anuales, lo que indica una reducción de casi el 30% de lo que se emite actualmente; si se utilizan los desechos de poda municipal, éstas emisiones se reducen aproximadamente a la mitad.

#### IV. CONCLUSIONES

De todos los materiales evaluados, la granza con un 10% de humedad, fue el mejor candidato a desempeñar el rol de combustible alternativo, ya que ésta es un material propio de la empresa cervecera y además, se estima que tendrá un buen desempeño de acuerdo a lo mostrado por los resultados de su caracterización y su evaluación en la rutina de cálculo. Cabe destacar además que a pesar de la necesidad del uso de un tratamiento de secado que tiene como consecuencia directa, la reducción de su masa y la inversión en energía, la disponibilidad de la granza a esas condiciones lograría suplir un 24% de la demanda de Fuel Oil que se tuvo en el período de tiempo de estudio.

Los demás materiales cerveceros seleccionados (poda, cartón y cascarilla de malta), presentan resultados satisfactorios en su caracterización ya que poseen poderes caloríficos iguales o ligeramente mayores a los del cultivo energético King Grass y una baja humedad, lo que hace que no sea necesario hacerlos pasar por tratamientos de secado para su utilización. A pesar de que la principal desventaja de estos productos es su baja disponibilidad, si se hubiesen utilizado junto con la granza con un 10% de humedad, se estima que podrían llegar a cubrir el 35% de la demanda de Fuel Oil que se tuvo en el período de tiempo estudiado.

A partir de los resultados obtenidos en la caracterización y evaluación energética de los desechos de poda municipal, se estima que no se trata de un material adecuado para ser utilizado como combustible en una caldera de combustibles alternativos. Entre los factores que llevan a establecer esta afirmación, se encuentran la alta humedad y bajo poder



calorífico disponible, lo que produce directamente un bajo rendimiento térmico; asimismo la necesidad de la recolección y traslado de estos desechos desde su disposición hacia la planta generaría costos adicionales para la empresa.

Al realizar una comparación contra el cultivo energético que la empresa cervecera pretende emplear, se determinó que los materiales propios del proceso cervecero poseen una humedad menor al King Grass y además poseen propiedades energéticas similares a las de dicho cultivo energético. Los resultados obtenidos por la rutina de cálculo determinaron además, que los materiales cerveceros resultantes de la segunda delimitación lograrán cubrir un 27.6% de la demanda de King Grass estimada por la empresa. A la vez, los resultados del calor neto aportado por el Fuel Oil comparado con el calor neto que se produciría en el uso del King Grass dejan en evidencia una sobreestimación de la cantidad necesaria para suplir la demanda, ya que la energía térmica que se generó a partir del Fuel Oil representa un 77% de la energía que se estima puede ser producida por la cantidad reportada de King Grass.

Por último, podemos concluir que la metodología utilizada en éste trabajo y, la correspondiente rutina de cálculo empleada, pueden proporcionar un esquema a seguir para futuras investigaciones que posean una índole similar de evaluación para un proceso productivo, en el que se generen desechos, residuos o subproductos biomásicos.

## V. REFERENCIAS

- [1] Menjivar, I. & Morán, L., (2014). *Evaluación de subproductos y desechos cerveceros, poda municipal y King Grass como combustibles de caldera*. Antiguo Cuscatlán: Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas".
- [2] Alfaro, N., Burgoz, A., & Durán, G. (2010). *Análisis de Eficiencia Energética en Calderas de Biomasa*. Antiguo Cuscatlán: Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas".
- [3] Van Ness, H. C. (2005). *Introducción a la termodinámica en ingeniería química* (Séptima edición ed.). México D. F.: Mc. Graw Hill.
- [4] Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (Diciembre de 2013). *Boletín Climático Anual 2013*. Recuperado el Junio de 30 de 2014, de Meteorología MARN:  
<http://www.snet.gob.sv/ver/meteorologia/clima/climatico+anual/>
- [5] Bioenergiesysteme GmbH. (11 de Enero de 2012). *Biomass*. Recuperado el 30 de Mayo de 2014, de BioBank:  
<http://www.ieabcc.nl/database/biomass.php>
- [6] University of Technology Vienna. (1996). *Waste materials*. Recuperado el 22 de Mayo de 2014, de BIOBIB:  
<http://cdmaster2.vt.tuwien.ac.at/biobib/waste.html>



- [7] Cheremisinoff, N., & Dlaventish, A. (2010). *A Guide to Safe Material and Chemical Handling*. New York: John Wiley & Sons.
- [8] Flagan, R., & Seinfeld, J. (1988). *Fundamentals of Air Pollution Engineering Chapter 2: Combustion Fundamentals*. New Jersey: Prentice Hall Inc.
- [9] Zevenhoven, & Kilpinen. (19 de Junio de 2001). Abo Akademi University. Recuperado el 30 de Junio de 2014, de *Fuel Gases and Flue Gases*: [http://users.abo.fi/rzevenho/gases.PDF?bcsi\\_scan\\_1e9aed054bacd1c=0&bcsi\\_scan\\_filename=gases.PDF](http://users.abo.fi/rzevenho/gases.PDF?bcsi_scan_1e9aed054bacd1c=0&bcsi_scan_filename=gases.PDF)
- [10] IMARTEC. (6 de Mayo de 2014). *¿Es realmente la biomasa neutra en emisiones de carbono?* Recuperado el 13 de Junio de 2014, de Biomass Energy Revolution: <http://www.imartec.es/es-realmente-la-biomasa-neutra-en>