



Revista Venezolana de Ciencia y Tecnología de Alimentos. 1 (2): 113-126. Julio-Diciembre, 2010  
<http://www.rvcta.org>  
ISSN: 2218-4384 (versión en línea)  
© Asociación RVCTA, 2010. RIF: J-29910863-4. Depósito Legal: ppi201002CA3536.

Nota Técnica

## **Sustitución de combustible diésel por gas licuado de petróleo en un tostador de café de la Torrefactora del Este en Cuba**

Substitution of diesel fuel by liquefied petroleum gas in a coffee roaster from the East  
Coffee Roasting Factory in Cuba

Jehannara **Calle Domínguez**<sup>1\*</sup>, José **Gandón Hernández**<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Investigaciones para la Industria Alimenticia. Carretera al Guatao, km 3½, La Lisa, Ciudad de La Habana, Cuba, C. P. 19200. \*Autora para correspondencia: [yannara@iiaa.edu.cu](mailto:yannara@iiaa.edu.cu)

<sup>2</sup>Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. Calle 114, N° 11901, entre 119 y 129, Cujae, Marianao, Ciudad de La Habana, Cuba. E-correo: [gandon@quimica.cujae.edu.cu](mailto:gandon@quimica.cujae.edu.cu)

Aceptado 18-Noviembre-2010

### **Resumen**

El tema del uso racional de la energía y el cuidado del medio ambiente se ha convertido en una preocupación para dirigentes y técnicos relacionados con la investigación y los servicios, por el encarecimiento de los portadores energéticos y el impacto medioambiental. Actualmente en Cuba, el tostado de café se realiza utilizando diésel como portador energético, sin embargo, es conocido que a nivel mundial se utilizan preferentemente combustibles gaseosos, tales como, el gas natural y gas licuado de petróleo. En este trabajo se estudiaron algunos aspectos de factibilidad técnica-económica de sustitución del combustible diésel por gas licuado de petróleo en la Torrefactora del Este del Grupo Empresarial Cubacafé. Se realizó un balance de energía. Se calculó el volumen del tanque de almacenamiento requerido. Se obtuvo que la cantidad de gas licuado de petróleo necesaria sería de 1240 L diarios con un gasto de 496 dólares. En relación al aspecto ambiental, fue favorable, ya que se dejarían de emitir 383,8 kg de CO<sub>2</sub> y 7,9 kg de SO<sub>2</sub> por día; garantizándose una reducción en la cantidad de emisiones a la atmósfera.

**Palabras claves:** uso racional de la energía, cuidado medio ambiente, tueste del café, GLP.

### Abstract

The theme of the rational use of energy and the environmental care has become a worry for leaders and technicians due to the increase in the price of energy carriers and the environmental impact. At present in Cuba, coffee roasting is done using diesel as energy carrier, however, is known worldwide that are used preferably gaseous fuels, such as, natural gas and liquefied petroleum gas. In this work some aspects of techno-economic feasibility of replacement of the diesel fuel by liquefied petroleum gas in the East Coffee Roaster of the Cubacafe Group, were studied. An energy balance was performed. The storage tank volume required was calculated. It was found that the amount of liquefied petroleum gas required would be of 1240 L per day at an expense of US\$ 496. In relation with the environmental aspect, it was favorable, because 383.8 kg of CO<sub>2</sub> and 7.9 kg of SO<sub>2</sub> per day would not be emitted; which guarantee an emissions reduction into the atmosphere.

**Key words:** coffee roasting, environmental care, LPG, rational use of energy.

### INTRODUCCIÓN

El ahorro y uso racional de portadores energéticos cada día reviste más importancia, convirtiéndose para establecimientos industriales e instituciones de servicios, en un aspecto a materializar mediante la aplicación de medidas y soluciones concretas que al mismo tiempo sean factibles y efectivas. En Cuba, bajo este contexto emergió la Tecnología de Gestión Total de Eficiencia de la Energía (TGTEE), la cual mediante una serie de procedimientos y herramientas aplicados continuamente y basados en el manejo de la calidad total, permite establecer nuevos hábitos en el control, diagnóstico y uso de la energía, con miras al ahorro, conservación y reducción de los costos (Núñez-Jover *et al.*, 2008).

El uso racional se vincula con la eficiencia, la que a su vez está muy relacionada con la selección adecuada de los equipos y los portadores energéticos. Por otro lado en los proyectos resulta determinante el análisis del impacto ambiental de proceso que se estudia, ya que prácticamente en todos los casos se produce emisión de contaminantes líquidos, sólidos y atmosféricos (Alfaro y Rodríguez, 1994). El uso de energías, menos agresivas y menos contaminantes del medio

ambiente es el principal tema que se ha venido tratando desde hace ya algún tiempo (AIGLP, 2009). Es interés fundamental del estado cubano que se encamine el estudio de todos los procesos industriales en este sentido ya que se ha demostrado que las emisiones de los gases de combustión como el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), el monóxido de carbono (CO), los compuestos orgánicos volátiles (COVs), los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el metano (CH<sub>4</sub>) y los clorofluorocarbonos (CFCs) principalmente, han venido incrementando la concentración de material particulado (MP) en la atmósfera, además son los principales contaminantes atmosféricos. Estos gases son los principales responsables del efecto invernadero e influyen directamente en la respiración de una atmósfera contaminada, con efectos secundarios en la salud humana (CDPHE, 2006). Adicionalmente, es de hacer notar que el calentamiento global está ofreciendo una nueva dimensión en el futuro de la producción de café (Delgado-Assad, 2010) con escenarios no favorables, desde el punto de vista del cultivo. En estudios recopilados por Silveira-Pinto (2009), enfocados en la producción de café en Brasil; el autor señala que en plantas tipo C3 como el cafeto (*Coffea arabica*), las cuales pre-

sentan menor tolerancia que las tipo C4 a las altas temperaturas; cuando se exceden los 33 °C, en la fase de floración, se transforman sus botones florales normales a botones florales abortados ('estrelinhas') ocasionando fallas en la polinización. También destaca que a 40 °C la fotosíntesis es interrumpida, además de plantear un escenario futuro de transferencia de los cultivos del sureste al sur del país. Kufa (2010), por su parte, ha expresado que en África no es raro observar un cafeto que se seca por desórdenes fisiológicos entre los crecimientos vegetativo y reproductivo, por efecto del cambio climático.

Actualmente en Cuba, el proceso de tostado de café se lleva a cabo utilizando petróleo combustible o diésel como portador energético (Medina *et al.*, 2008); sin embargo, es bien conocido que a nivel mundial se usan preferentemente combustibles gaseosos, tales como el gas manufacturado y el gas licuado de petróleo (GLP). La utilización de este tipo de combustible además de ventajosa desde el punto de vista energético y mucho más recomendable desde el punto de vista medioambiental, favorece la calidad del producto final. Esto último está determinado por la naturaleza de los gases producidos y los residuos de combustible que pudieran producirse por ineficiencias de la reacción de combustión.

En el país existen 17 plantas torrefactoras donde se lleva a cabo el tueste del café que consume la población y el que se destina a la exportación, a los servicios hoteleros y al turismo. Estas torrefactoras se encuentran ubicadas en los mismos vecindarios donde la población realiza todas sus actividades cotidianas, por lo que se precisa de una detallada y eficiente labor por parte de los trabajadores. Es con este fin que se realizan labores de saneamiento en estos lugares, dirigidas principalmente a la preservación de la salud y el medio ambiente, haciendo principal énfasis en el control de emisiones que provocan un impacto ambiental no deseado. Miravet-Sánchez *et al.* (2004) en un estudio de evalua-

ción ambiental del Municipio Plaza de la Revolución, en Cuba, consideraron como una de las fuentes principales de contaminación por emisiones de gases a la atmósfera, la Torrefactora de Café "Pilón".

El ahorro de la energía es el principal tema que se deriva del uso de este combustible, además que está en relación directa y no menos importante a la cantidad de emisiones contaminantes que acompañan a la combustión del diésel. Es por ello que se deben realizar estudios detallados que justifiquen debidamente el empleo del mismo en las condiciones de trabajo. Medina *et al.* (2008) realizaron un estudio para determinar la estructura de consumo de portadores energéticos en la Empresa Torrefactora de Café "Manuel Ascunce Doménech", ubicada en Villa Clara, Cuba; además de las potencialidades de ahorro y el impacto sobre la calidad del aire de las emisiones de gases contaminantes de esa entidad, definiendo importantes acciones a tomar para disminuir los consumos de energía y sugiriendo controles mensuales del consumo de diésel y medidas para disminuir afectaciones ambientales.

La necesidad del uso de un combustible noble y menos agresivo, en este caso los combustibles gaseosos, son preferentes ya que el contenido de impurezas es casi inexistente. Se utiliza en aquellos procesos que requieren de un combustible limpio porque su composición está prácticamente libre de azufre y sus compuestos. Los productos de su combustión no generan residuos ni hollín, como tampoco subproductos peligrosos para el medio ambiente. Por otra parte tienen un poder calorífico alto.

Utilizar diésel combustible como portador energético tiene todos estos inconvenientes, sin dejar de mencionar que puede afectar de manera considerable la calidad del producto, ya que los gases de combustión interactúan directamente con los granos de café en el proceso de tueste. Este trabajo estuvo encaminado fundamentalmente

al estudio de la sustitución del combustible diésel por un combustible gaseoso, en este caso el GLP, para minimizar todos los riesgos anteriormente expuestos. Destacando que ya se dispone de los quemadores para este tipo de gas pero se carece de los elementos técnicos necesarios para su instalación.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La torrefactora objeto de estudio fue la Torrefactora del Este, integrada al Grupo Empresarial Cubacafé que se encuentra ubicada en la calle Narciso López entre Torroella y Final, Reparto Debeche, Municipio de Guanabacoa, Ciudad de La Habana, Cuba.

### Descripción del equipo

En esta experiencia se utilizó el método directo de tostado en una tostadora de café natural de fabricación española, marca Innoenvas, modelo TNI-120, de dimensiones 1900 x 3900 x 3280 mm, producción 480 kg/h, capacidad 120 kg y potencia 11,5 kW (Fig. 1), con calentamiento del aire para el proceso, mediante la mezcla e intercambio de calor directo con los gases de combustión. El tostador está provisto de un conducto por donde toda la masa de gases que se produce en esta operación, es expulsada al exterior, mediante un extractor centrifugo. Estos gases son los productos de la combustión del diésel, gases del propio café que se liberan de los granos al ser tostados y la masa de vapor de agua que se forma al extraerle humedad al grano. Debido al poder contaminante de los mismos, antes de ser expulsados a la atmósfera son incinerados mediante un quemador acoplado a la chimenea denominado quemador de humo (Fig. 2).

### Balance de energía en el tostador. Cálculos

Sobre la base de 53 tostadas diarias, se realizaron los cálculos correspondientes. Se calcu-



**Figura 1.-** Tostador continuo (marca Innoenvas, modelo TNI-120).

ló la masa de combustible diésel técnicamente fundamentada para compararla con la masa real de combustible que se estima mediante los reportes diarios de consumo en la torrefactora, esto permitió conocer cuánto se alejan los consumos reales y calculados.

Con el propósito de calcular el consumo de combustible necesario, para que se genere la cantidad de calor con el cual se produce el tueste del grano de café verde, se aplicó un balance total de calor en el proceso (Chupakhin y Dormenko, 1986; Incropera y DeWitt, 1996).

El balance se expresa mediante las siguientes ecuaciones:

Ecuación (1):

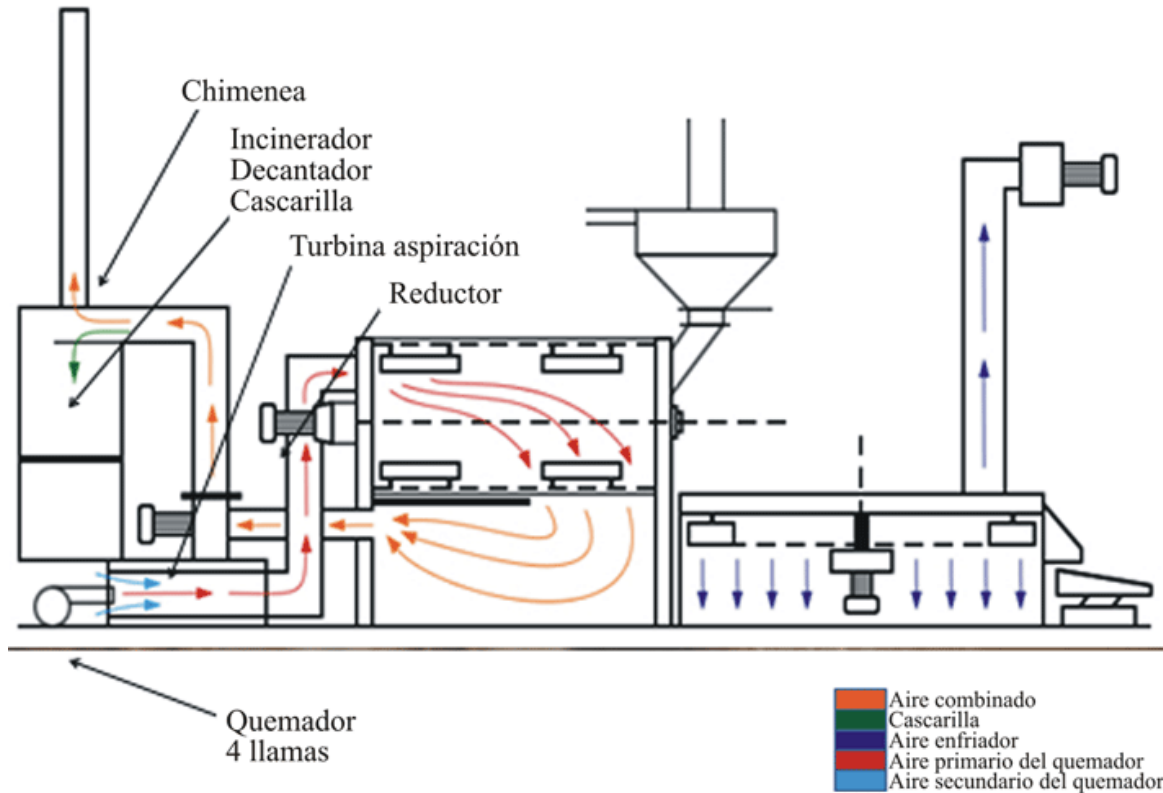
$$Q_t = Q_a + Q_p + Q_{pr} + Q_{ac} + Q_e$$

Ecuación (2) 
$$Q_t = M_{cb} \cdot VCI_{cb}$$

Donde:

$Q_t$ : calor total que se genera, kJ

$Q_a$ : cantidad de calor necesario para calentar el aire, kJ



**Figura 2.-** Esquema del funcionamiento del tostador.

$Q_p$  : cantidad de calor perdido, kJ

$Q_{pr}$  : cantidad de calor que se utiliza en el proceso de secado del grano, kJ

$Q_{ae}$  : cantidad de calor que se utiliza en evaporar el agua, kJ

$Q_e$  : cantidad de calor que se utiliza en el calentamiento de los equipos, kJ

$M_{cb}$  : masa de combustible, kg

$VCI_{cb}$  : valor calórico inferior del combustible diésel, kJ/kg

Cada cantidad de calor se calculó en dependencia del proceso en cuestión.

### Cálculo del calor para calentar el aire

( $Q_a$ )

$$\text{Ecuación (3)} \quad Q_a = M_a \cdot C_{p_{\text{aire}}} (T_{fa} - T_{ia})$$

Donde:

$M_a$  : masa de aire, kg

$C_{p_{\text{aire}}}$  : calor específico del aire, kJ/kg · °C

$T_{fa}$  : temperatura final del aire, K

$T_{ia}$  : temperatura inicial del aire, K

En el proceso, como se explicó anteriormente en la descripción del mismo, se tuvo en cuenta que el volumen de gases totales que extrae la turbina ( $V_{tb}$ ) no sólo está compuesto por aire, sino que también están presentes los gases producto de la combustión y gases propios del café que se forman por el tueste de los granos. Por estas razones la ecuación quedó de esta manera:

$$\text{Ecuación (4)} \quad M_a = (V_{tb} - V_g - V_m) \rho_a$$

Donde:

$V_{tb}$  : volumen total de gases que extrae la turbina, m<sup>3</sup>

$V_g$  : volumen de los gases de combustión,  $m^3$   
 $V_m$  : volumen de la merma,  $m^3$   
 $\rho_a$  : densidad del aire,  $kg/m^3$

El volumen de los gases de combustión ( $V_g$ ) se calculó por medio del siguiente procedimiento:

$$N_i = M_{cb} \cdot \frac{X_i}{MM_i}$$

Ecuación (5)

Donde:

$N_i$  : cantidad de moles de cada componente, kmol  
 $X_i$  : fracción másica de cada componente, %  
 $MM_i$  : masa molar de cada componente, kg/kmol

Se supuso combustión completa y se dividió para cada componente la cantidad de moles entre su densidad. La densidad ( $\rho$ ) se calculó de la siguiente forma:

Ecuación (6):

$$\rho = \frac{P}{R(T + 273)} \cdot MM$$

Donde:

$P$  : presión atmosférica, Pa  
 $R$  : constante de los gases,  $Pa \cdot m^3/mol \cdot K$   
 $T$  : temperatura, K  
 $MM$  : masa molar, kg/kmol

Mediante la suma de los volúmenes de cada componente, se obtuvo el volumen total de los gases por kg de combustible.

El volumen de la merma ( $V_m$ ) se calculó por medio de la expresión siguiente:

$$Ecuación (7) \quad V_m = V_{ae} + V_{gc}$$

Donde:

$V_{ae}$  : volumen del agua evaporada,  $m^3$   
 $V_{gc}$  : volumen de los gases del café,  $m^3$

### Cálculo de las pérdidas de calor ( $Q_p$ )

Se realizaron 10 mediciones de temperaturas de superficie en diferentes puntos, las cuales se promediaron y su valor promedio es el que se utilizó para los cálculos. Además se midieron las longitudes y los diámetros de los conductos, fornalla y el cuerpo del tostador. En el caso del cálculo de las pérdidas de calor, la ecuación fue la siguiente:

$$Ecuación (8) \quad Q_p = h_a \cdot A (T_s - T_a)$$

Donde:

$h_a$  : coeficiente de convección-radiación,  $W/m^2 \cdot K$   
 $A$  : área de transferencia de calor,  $m^2$   
 $T_s$  : temperatura de superficie, K  
 $T_a$  : temperatura aire, K

En el caso de las tapas planas y cónicas, el coeficiente  $h_a$  se calculó de la siguiente forma:

$$Ecuación (9) \quad h_a = h_c + h_r$$

Donde:

$h_c$  : coeficiente de convección,  $W/m^2 \cdot K$   
 $h_r$  : coeficiente de radiación,  $W/m^2 \cdot K$

$$Ecuación (10) \quad h_c = 1,17 (T_s - T_a)^{1/4}$$

Ecuación (11):

$$h_r = 5,67 \cdot \varepsilon \left[ \left( \frac{T_s}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_a}{100} \right)^4 \right] / (T_s - T_a)$$

Donde:

$\varepsilon$  : emisividad

Para calcular el área de transferencia de las tapas planas y cónicas se utilizaron las siguientes ecuaciones:

Para las secciones planas:

$$\text{Ecuación (12)} \quad A = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

Donde:

A : área de la sección plana, m<sup>2</sup>

D : diámetro de la sección en cuestión, m

Para las secciones cónicas:

$$\text{Ecuación (13)} \quad A_{\text{Lateral}} = \pi \cdot S (r + r')$$

$$\text{Ecuación (14)} \quad S = \sqrt{(r - r')^2 + h^2}$$

Donde:

A : área lateral de la sección cónica, m<sup>2</sup>

r : radio mayor, m

r' : radio menor, m

h : altura, m

S : distancia lateral, m.

Para calcular  $h_a$  de las superficies cilíndricas se utilizó la ecuación siguiente:

Ecuación (15):

$$h_a = 9,7 + 0,07 (T_s - T_a)$$

Y el área lateral del cilindro se determinó según:

$$\text{Ecuación (16)} \quad A = \pi \cdot D \cdot L$$

Donde:

$h_a$  : coeficiente de convección-radiación en envolturas cilíndricas, W/(m<sup>2</sup> · K)

D : diámetro del equipo en cuestión, m

L : longitud del equipo en cuestión, m

### Cálculo del calor utilizado en el proceso de secado del grano ( $Q_{pr}$ )

Para calcular el calor del proceso se empleó la siguiente ecuación:

Ecuación (17):

$$Q_{pr} = M_{pr} \cdot C_{p_{pr}} (T_{fpr} - T_{ipr})$$

Donde:

$M_{pr}$  : cantidad de café a procesar, kg

$C_{p_{pr}}$  : calor específico del café, kJ/(kg · °C)

$T_{fpr}$  : temperatura final del proceso de calentamiento, K

$T_{ipr}$  : temperatura inicial del proceso de calentamiento, K

Para calcular el Cp del café se utilizó la siguiente ecuación empírica (Earle, 1988):

Ecuación (18):

$$C_p = 0,8372 + 3,3488X_w$$

Donde:

$C_p$  : calor específico del café, kJ/(kg · °C)

$X_w$  : fracción másica de agua, %

### Cálculo del calor para evaporar el agua ( $Q_{ae}$ )

Para el cálculo del calor para evaporar el agua se empleó el software SteamTab<sup>TM</sup> Companion, versión 2.0 (ChemicaLogic Corporation, Burlington, MA, USA). El calor correspondiente a la evaporación del agua se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Ecuación (19)} \quad Q_{ae} = M_{ae} \cdot \lambda_{cf}$$

Donde:

$M_{ae}$  : masa de agua a evaporar, kg

$\lambda_{cf}$  : calor latente o cambio de fase, kJ/kg

### **Cálculo del calor para calentar los equipos ( $Q_e$ )**

Para el calentamiento de los equipos se necesita una determinada cantidad de calor, esta se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Ecuación (20)} \quad Q_e = M_e \cdot C_{p_e}(T_{fe} - T_{ie})$$

Donde:

$M_e$  : masa del equipo, kg

$C_{p_e}$  : calor específico del material del equipo, kJ/(kg · °C)

$T_{fe}$  : temperatura final de calentamiento del equipo, K

$T_{ie}$  : temperatura inicial de calentamiento del equipo, K

Partiendo de que la masa de aire que se emplea en el proceso del tueste es muy grande en comparación con la estequiométricamente necesaria para la combustión, se consideró que esta se desarrolla en condiciones de un 100 % de conversión y un 100 % de completamiento, es decir, que todos los componentes elementales del diésel C, H, S se convierten por la reacción de oxidación en  $CO_2$ ,  $SO_2$  y  $H_2O$  y que no queda combustible sin reaccionar.

Una vez calculada la cantidad total de combustible consumida en los tostadores y en los quemadores de humo y sobre la base de la composición elemental de este diésel se calcularon los moles de cada componente.

A partir de los moles de cada componente elemental y considerando 100 % de conversión y 100 % de completamiento, se calcularon las cantidades que se forman de  $CO_2$ ,  $SO_2$  y  $H_2O$  y que se emiten a la atmósfera.

### **Cálculo del volumen del tanque de almacenamiento o bala (bombona) de gas**

En correspondencia con los objetivos de este trabajo resultó necesario calcular el volu-

men de la bala de almacenamiento de GLP y que este fuese tal, que garantice el suministro del combustible durante el tiempo requerido o lo que es lo mismo una autonomía racional. Para ello se utilizó el procedimiento propuesto y la normativa empleada por ©Tecnicsuport (Plataforma de soporte informático s.l., Lleida, España).

Para el cálculo se consideró un sistema de evaporación natural del GLP, es decir, que no se necesite de un evaporador auxiliar para lograr la generación del GLP gaseoso que se utilizará para la combustión. La misma temperatura del ambiente sería la responsable de provocar el cambio de fase del gas licuado. Para garantizar el suministro estable de combustible los cálculos se realizaron para condiciones extremas, esto es, cuando la temperatura ambiental sea de 20 °C y que la superficie mojada del tanque, que es por donde se efectuará la transferencia de calor desde el exterior hacia el interior de la bala corresponda a un 20 % del llenado.

Para calcular el volumen del tanque de almacenamiento se emplearon dos criterios:

- Por vaporización; según el consumo.
- Por autonomía; se toman 15 días.

### **Cálculo por vaporización**

Para calcular el volumen que ocupa el GLP primeramente es necesario conocer la superficie necesaria para garantizar los requisitos de evaporación en función del caudal de gas de consumo. Una vez calculada la superficie requerida, se debe consultar con el proveedor y escoger una bala cuyas dimensiones se correspondan con las necesidades, siempre y cuando proporcione la superficie mínima requerida.

La expresión para el cálculo de la superficie necesaria para evaporar el GLP fue la siguiente:



$$S = \frac{E \cdot C_e}{Q_T \cdot C \cdot \Delta T}$$

Ecuación (21)

Donde:

$S$  : superficie necesaria para evaporar el GLP,  $m^2$

$E$  : cantidad de GLP a evaporar, kg

$C_e$  : calor específico para la transformación del líquido a gas (para GLP = 92 kcal/kg)

$Q_T$  : coeficiente de transferencia de calor, kcal/h  $\cdot m^2 \cdot ^\circ C$

$C$  : coeficiente de llenado, %

$\Delta T$  : variación de temperatura ( $T_2 - T_1$ ),  $^\circ C$

$T_1$  : temperatura exterior,  $^\circ C$

$T_2$  : temperatura de evaporización,  $^\circ C$  (para presión de 1,5 kg/cm<sup>2</sup>).

Con el valor de la superficie se accedió a las tablas correspondientes y se obtuvieron el volumen del depósito y sus dimensiones.

### Cálculo por autonomía

Para el cálculo de necesidades por autonomía se debió tener en cuenta que el depósito garantizara el suministro por un período de 15 días y se cuantificó cuanto combustible se consumiría en ese período en dependencia de las horas de trabajo diarias.

A partir del valor obtenido, se calculó el volumen del depósito necesario para almacenar el combustible cuantificado. Para esto se tomó en cuenta lo prescrito en la normativa: un depósito no debe sobrepasar el 85 % de su capacidad (MITC, 2006) y no se debe vaciar por debajo de un 20 % de la misma, por lo que el volumen útil ( $V_u$ ) considerado es del 65 % del volumen total geométrico (Fig. 3).

La ecuación para el cálculo del volumen útil fue:

$$V_u = 0,65 \cdot V_t$$

Ecuación (22)

Donde:

$V_u$  : volumen útil,  $m^3$

$V_t$  : volumen total geométrico,  $m^3$

La carga útil se calculó mediante la siguiente expresión:

$$C_u = 0,65 \cdot \rho \cdot V_t$$

Ecuación (23)

Donde:

$C_u$  : carga útil, kg

$\rho$  : densidad del gas en estado líquido,  $\rho = 510 \text{ kg/m}^3$

Conociendo la carga útil y la densidad se calculó el volumen total ( $V_T$ ) mediante la siguiente ecuación:

$$V_T = \frac{C_u}{0,65 \cdot \rho}$$

Ecuación (24)

Donde:

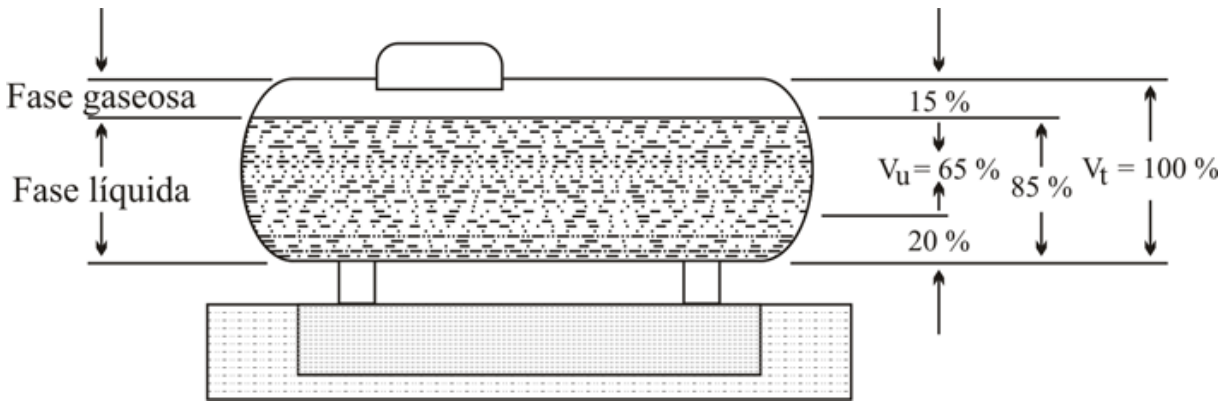
$V_T$  : volumen total de almacenamiento,  $m^3$

Los volúmenes calculados por ambas vías se compararon y se escogió el mayor. Con este resultado se buscaron en el catálogo del fabricante, las características del depósito, cuyo volumen total fuese superior al calculado.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Consumo de combustibles

En el Cuadro 1 se presentan las cantidades de combustibles consumidos, técnicamente fundamentados. Como puede apreciarse en el Cuadro 2, la cantidad de combustible diésel consumido calculado (en volumen técnicamente fundamentado) y el estimado por la fábrica se diferencian en un 7,6 %, lo que representa un resultado perfectamente explicable desde el punto de vista técnico. La diferencia resulta aceptable si se tiene en cuenta que los equipos tienen más de



**Figura 3.-** Volumen útil de una bala de gas.

**Cuadro 1.-** Cantidades de combustibles consumidos.

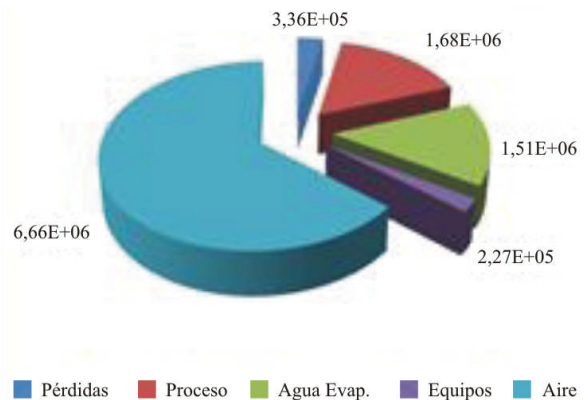
Combustibles	Masa técnicamente fundamentada (kg)	Volumen técnicamente fundamentado (L)
Diésel	248,84	293,79
GLP	229,13	422,20

**Cuadro 2.-** Relación entre los consumos de diésel estimados y calculados.

Consumo de la fábrica (L)	Consumo calculado (L)	Relación	% de diferencia
318	293,79	1,08	7,6

12 años de explotación y su rendimiento ha disminuido. Por otro lado, el control operacional no es totalmente automatizado y no fue posible contabilizar el calor consumido en la producción de los denominados “gases del café”, aunque se tienen referencias de que en el tostado, la mayor parte del calor se invierte en el calentamiento de los granos.

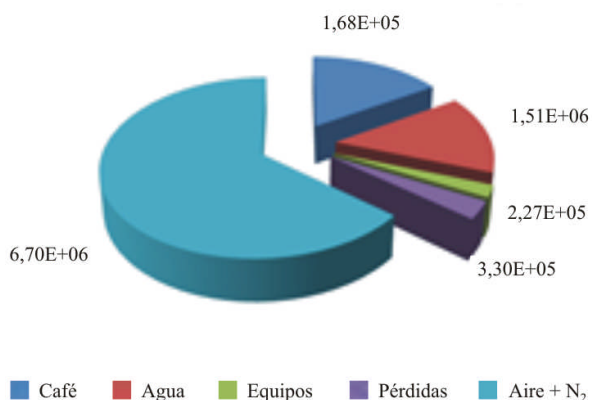
Como se observa en la Fig. 4 donde más se consumió calor fue en el calentamiento del aire pues su caudal es muy grande debido a la necesidad de controlar la temperatura en los tostadores para que no se produzca la incineración de los granos. Del análisis de la



**Figura 4.-** Distribución de los consumos de calor para el diésel (kJ).

misma se aprecia que la pérdida de calor por convección-radiación desde las superficies de los equipos y los conductos es prácticamente insignificante lo que demuestra la eficacia del aislamiento térmico utilizado. Medina *et al.* (2008) determinaron pérdidas de calor en el proceso de tostado del café, de la Torrefactora de Café “Manuel Ascunce Doménech”, de Cuba; en el orden del 73 % e identificando que las mayores pérdidas se llevaron a cabo en la torre del quemador (53 %), por calor sensible de los gases de combustión y en la cuna de enfriamiento (11 %).

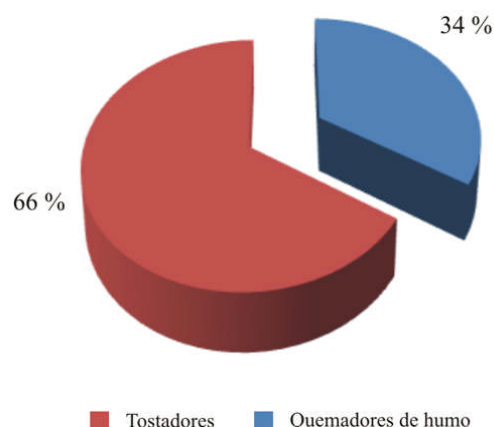
El resultado de la distribución de los consumos con GLP como se observa en la Fig. 5 fue muy similar a la del diésel, ya que los requerimientos del proceso son los mismos con la utilización de cualquier combustible.



**Figura 5.-** Distribución de los consumos de calor para el GLP (kJ).

El consumo de combustible diésel en los quemadores de humo fue 1,9 veces menor al consumo en los quemadores de los tostadores y se corresponde con los criterios de los técnicos de la torrefactora (Fig. 6).

Como puede apreciarse en el Cuadro 3, los gastos diarios se diferencian en un 3,43 % y en primera instancia pudiera considerarse una desventaja en contra del GLP, pero esto debe tratarse con cuidado, pues los resultados siempre estarían condicionados por las características y propiedades de los combusti-



**Figura 6.-** Consumo porcentual de diésel de los tostadores y los quemadores de humo.

bles, que pueden variar en determinados intervalos, así como el precio que también puede estar sujeto a variaciones determinando el costo. Por lo que es más recomendable no inferir ventajas ni desventajas económicas por este motivo. El gasto de 496 dólares refiere a un consumo total de GLP según los cálculos de 1240 L diarios (673 kg diarios).

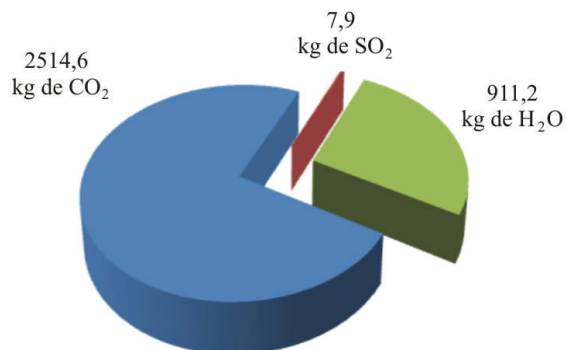
**Cuadro 3.-** Precio y gasto de los combustibles.

Combustible	Precio del combustible (US\$/L)	Gasto (US\$/día)
Diésel	0,5131	479
GLP	0,4005	496

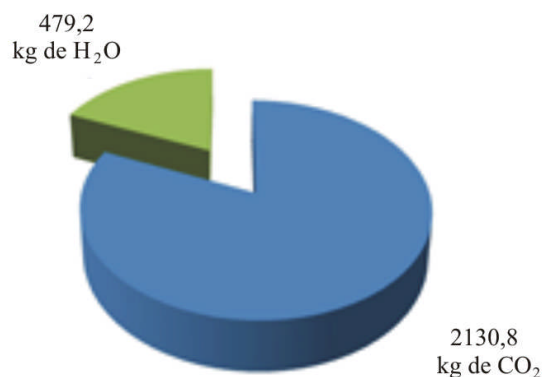
### Emisiones de gases y vapor

La cuantificación de las cantidades de gases y vapor emitidos a la atmósfera para ambos combustibles se muestran en las Figs. 7 y 8.

En cuanto a la emisión de gases contaminantes en los productos de combustión, se determinó que el aporte más significativo fue el del CO<sub>2</sub>; considerado uno de los principales responsables del efecto invernadero. Los resul-



**Figura 7.-** Masa de emisiones de gases y vapor debido a la combustión con diésel.



**Figura 8.-** Masa de emisiones de gases y vapor debido a la combustión con GLP.

tados son más ventajosos en cuanto a la cantidad de CO<sub>2</sub> cuando se utiliza GLP como combustible, ofreciendo una reducción de 383,8 kg por día en relación al diésel. Indudablemente la ventaja principal estuvo relacionada con la no presencia de los productos de la combustión del azufre (SO<sub>2</sub>), cuando se consume GLP.

En el caso de la mayoría de las torrefactoras esto es muy importante, pues se encuentran enclavadas en zonas urbanas residenciales.

### Tanque de almacenamiento de gas

Al comparar los volúmenes determinados a través de los cálculos por vaporización y por autonomía (Cuadro 4), el mayor valor correspondió a un volumen de depósito de 35 m<sup>3</sup>.

La Empresa de equipos industriales “Quintín Bandera”, en Ciudad de La Habana, Cuba; fabrica y oferta recipientes horizontales para GLP o balas de almacenamiento (bajo la marca Regal), desde 1 m<sup>3</sup> hasta 20 m<sup>3</sup> de capacidad. Teniendo en cuenta el volumen necesario, se plantean las siguientes opciones: dos balas de 20 m<sup>3</sup>, cuatro de 10 m<sup>3</sup> o siete de 5 m<sup>3</sup>. El precio de estas variantes se muestra en el Cuadro 5, y atendiendo a los precios y al espacio ocupado por estos recipientes, se propone utilizar la variante de dos tanques de 20 m<sup>3</sup> de capacidad.

**Cuadro 4.-** Resultados de los cálculos para la bala de almacenamiento.

Variables	Criterios	
	Por vaporización	Por autonomía
Volumen (m <sup>3</sup> )	28,10	35,00
Superficie (m <sup>2</sup> )	67,84	82,80
Carga útil (kg)	11802	14700

**Cuadro 5.-** Relaciones entre la cantidad, capacidad y precio de los recipientes.

Cantidad de recipientes	Capacidad (m <sup>3</sup> )	Precio CUP	Precio CUC
7	5	34851	41549
4	10	22098	76856
2	20	11894	52694

CUP: peso cubano nacional. CUC: peso convertible cubano.

## CONCLUSIONES

- La cantidad de combustible diésel calculada y la estimada por la fábrica se diferencian en un 7,6 %.
- El calentamiento del aire es la operación donde más se consume calor en el proceso de tostado.
- Las pérdidas de calor al medio ambiente desde las superficies y conductos fue insignificante.
- El consumo de diésel en los quemadores de humo fue 1,9 veces menor al correspondiente a los quemadores de los tostadores.
- El consumo total de GLP según los cálculos sería de 1240 L diarios (673 kg diarios) con un gasto de 496 US\$/día.
- La utilización del GLP reduciría la emisión de CO<sub>2</sub> y evitaría la emisión de compuestos del S al medio ambiente.
- El volumen del depósito necesario para almacenar el combustible GLP se estimó en 35 m<sup>3</sup>.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AIGLP. 2009. Asociación Iberoamericana de Gas Licuado de Petróleo. Declarações do XXIV Congresso da AIGLP. En XXIV Congresso da Associação Ibero-Americana de Gás LP. 06-08 Maio. Lima, Peru. [http://www.aiglp.org/declaracoesxxivcongresso\\_port.pdf](http://www.aiglp.org/declaracoesxxivcongresso_port.pdf)
- Alfaro, María del Rosario y Rodríguez, José J. 1994. Impacto ambiental del procesamiento del café en Costa Rica. *Agronomía Costarricense*. 18(2):217-225.
- CDPHE. 2006. Colorado Department of Public Health and Environment - Air Pollution Control Division. Coffee roasting. An overview of air quality regulations. <http://www.cdphe.state.co.us/ap/sbap/sbapcoffeefacts.pdf>
- Chupakhin, V. and Dormenko, V. 1986. *Fish-Processing Equipment*. Moscow: MIR Publishers.
- Delgado-Assad, Eduardo. 2010. Climate change and coffee production: vulnerability and possible adaptation. In *Presentations of World Coffee Conference*. 26-28 February. Guatemala City, Guatemala. International Coffee Organization. [http://dev.ico.org/event\\_pdfs/wcc2010/presentations/wcc2010-assad-e.pdf](http://dev.ico.org/event_pdfs/wcc2010/presentations/wcc2010-assad-e.pdf)
- Earle, R.L. 1988. *Ingeniería de los alimentos*. (2da. ed.). Zaragoza, España: Acribia.
- Incropera, Frank P. and DeWitt, David P. 1996. *Introduction to heat transfer*. (3rd. ed.). New York, USA: John Wiley & Sons.
- Kufa, Taye. 2010. Environmental sustainability and coffee diversity in Africa. In *Presentations of World Coffee Conference*. 26-28 February. Guatemala City, Guatemala. International Coffee Organization. [http://dev.ico.org/event\\_pdfs/wcc2010/presentations/wcc2010-kufa-notes-e.pdf](http://dev.ico.org/event_pdfs/wcc2010/presentations/wcc2010-kufa-notes-e.pdf)
- Medina, Bárbaro Fidel; Herrera-Moya, Idalberto; Morales-Rodríguez, Dimiter; Domínguez-Rodríguez, Liudmila y Bermúdez-Martín, Magalis. 2008. Estudio integral de gestión energética ambiental en la Empresa Torrefactora de Café de Santa Clara. En Ponencias de la V Conferencia Científica Internacional de Ingeniería Mecánica (COMEC). Comisión N° 1 – Simposio de Termoenergética Industrial, Energía Renovable y Medio Ambiente. 04-06 Noviembre. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.
- Miravet-Sánchez, Bárbara L.; Campos, Mario; Jaimez, Efrén; Guerra, Mario; Rocamora, Ernesto; Olivera, Jorge; Leal, Rosa M.; Blanco, Gabriela; Hernández, Ismael; Pacheco, Silvestre E.; Guerra, Ingrid; Sánchez, Orlando; de Huelbes, Jorge y Toujague, Regla. 2004. Evaluación ambiental del Municipio Plaza de la Revo-

lución. En Memorias de Geoinfo' 2004, VII Taller Internacional "Informática y Geociencias". 15-18 Noviembre. La Habana, Cuba.

MITC. 2006. Ministerio de Industria Turismo y Comercio. ITC-ICG 03. Instalaciones de almacenamiento de gases licuados del petróleo (GLP) en depósitos fijos. En Real Decreto 919/2006 de 28 de julio, por el que se aprueba el Reglamento técnico de distribución y utilización de combustibles gaseosos y sus instrucciones técnicas complementarias ICG 01 a 11. España. Boletín Oficial del Estado. N° 211: 31576-31632.

Núñez-Jover, Jorge; Montalvo-Arriete, Luis Félix; Pérez-Ones, Isarelis and Fernández-

González, Aurora. 2008. University, innovation and society: the Cuban University in the national innovation system. Research Policy Institute, Lund, Sweden. UniDev discussion paper series. Paper No. 10.

Silveira-Pinto, Hilton. 2009. Adaptation in the Brazilian agricultural sector. In Climate change and extreme events in Brazil. (pp. 34-51). Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável. Rio de Janeiro, Brasil. <http://www.lloyds.com/News-and-Insight/360-Risk-Insight/Climate-Change/~media/Lloyds/Reports/360%20Climate%20reports/FBDSreportonbrazilclimatechangeENGLISH.pdf>