

## CALCULO DEL FLUJO MÁSCICO Y CAUDAL DE AIRE PARA UN VENTILADOR UTILIZADO EN SILOS PARA SECADO PARA DEL CAFÉ

### Fan mass air flow rate for drying coffee.

#### RESUMEN

En el presente artículo se establece una metodología para calcular el flujo máscico y caudal de aire que debe de suministrar un ventilador con el objetivo de secar una masa de café en un silo. En el proceso de secado, el café no debe de entrar en contacto con los gases de combustión, por lo que se calcula el flujo máscico de aire que se utiliza para secar la masa de café y el flujo máscico de aire que se utilizará para la combustión.

**PALABRAS CLAVES:** Flujo máscico de aire, silo, secado de café.

#### ABSTRACT

*In the present article a methodology is established to calculate the air mass flow that should supply a fan with the objective to dry a mass of coffee in a silo. In the process of dried, the coffee should not enter contact with the gases of combustion, so the air mass flow that is utilized to dry the mass of coffee and the air mass flow that will be utilized for the combustion are calculated independently.*

**KEYWORDS:** Air mass flow, silo, drying coffee grain.

#### 1. INTRODUCCIÓN

Conocer cual es el flujo máscico de aire que se debe de suministrar para secar una masa de café en un tiempo determinado es muy importante para realizar una correcta selección del ventilador a emplear en un silo para el beneficio del café. Este artículo desarrolla un modelo analítico de cálculo para el flujo9 de masa y caudal de aire y lo valida con resultados obtenidos de experiencias previas de las referencias [5] y [6].

En el proceso de secado del café los gases de combustión generados para calentar el aire, no deben entrar en contacto con el café debido a que esto afecta negativamente su calidad. Aunque esto es bien conocido, en muchas fincas y secadores de café hay silos construidos que no cumplen con esta característica, dado que emplean los gases de combustión para realizar dicha tarea, lo que a la larga deteriora la calidad final del producto. En la figura 1 se muestra el esquema de una instalación típica y recomendada para el secado del café. En esta figura se observa que en el calentador de aire no se mezcla el aire que se utiliza para secar el café con los gases de combustión

Algunas características en la etapa del secado que se deben de tener en cuenta para calcular el caudal de aire suministrado por el ventilador son: el contenido inicial de humedad del café pergamino está entre 48 y 55%, el contenido final de humedad del café pergamino seco

#### CARLOS ALBERTO OROZCO HINCAPIÉ

Ingeniero Mecánico, M.Sc.

Profesor Titular

Universidad Tecnológica de Pereira

corozco@utp.edu.co

#### FERNANDO BEDOYA LOAIZA

Ingeniero Mecánico

Universidad Tecnológica de Pereira

fb1\_11@utp.edu.co

debe estar entre 10 y 12% [5], y la temperatura del aire que pasa por los granos de café debe de estar entre 45°C y 55°C [6].

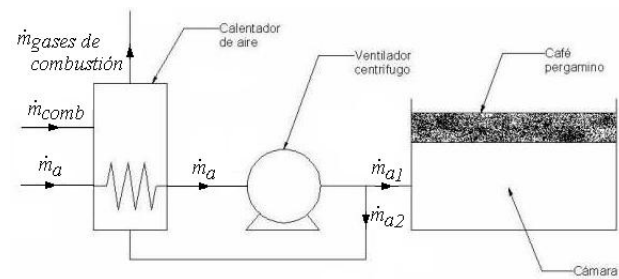


Figura 1. Esquema de una instalación típica de secado de café.

#### 2. CALCULO DEL FLUJO MÁSCICO DE AIRE TRANSPORTADO POR EL VENTILADOR

Para calcular el flujo máscico de aire que pasa a través del ventilador se deben calcular y sumar el flujo máscico de aire que pasa a través del café y el flujo máscico de aire que se dirige hacia la cámara de combustión (ver Figura 1).

##### 2.1 Calculo del flujo máscico de aire que pasa a través del café

Es importante conocer cual debe ser el flujo de masa de aire  $\dot{m}_{a1}$  que se necesita para extraer la humedad

adecuada del café ya que la etapa del secado es de gran importancia para garantizar una buena calidad del producto.

Para conocer cuál debe ser el flujo de masa de aire  $\dot{m}_{a1}$  se parte de la hipótesis de que el calor de vaporización ganado por el café  $\dot{Q}_w$  es igual al producto del calor perdido o cedido por el aire  $\dot{Q}_{a1}$  y la eficiencia de secado  $\eta_s$ :

$$\begin{aligned} \dot{Q}_w &= \eta_s \cdot \dot{Q}_{a1} \\ \dot{m}_w \cdot (Cp_w \cdot \Delta T_w + h_{fg}) &= \eta_s \cdot \dot{m}_{a1} \cdot Cp_{a1} \cdot \Delta T_{a1} \quad (1) \\ \dot{m}_{a1} &= \frac{\dot{m}_w \cdot (Cp_w \cdot \Delta T_w + h_{fg})}{\eta_s \cdot Cp_{a1} \cdot \Delta T_{a1}} \end{aligned}$$

En la anterior ecuación  $\dot{m}_w$  es el flujo de masa de agua extraído del café pergamino;  $Cp_w$  es el calor específico para el vapor de agua;  $\Delta T_w$  es el cambio de temperatura que experimenta el café pergamino en la etapa del secado;  $h_{fg}$  es la entalpía de vaporización del agua;  $Cp_{a1}$  es el calor específico para el aire atmosférico;  $\Delta T_{a1}$  es el cambio de temperatura que experimenta el aire en la etapa del secado.

El  $\dot{m}_w$  es igual a la masa de agua extraída del café en un período de tiempo. Esto se puede expresar de la siguiente manera:

$$\dot{m}_w = \frac{m_{café}}{t} \cdot (w_o - w_f) \quad (2)$$

En la anterior ecuación  $m_{café}$  es la masa de café pergamino a secar,  $w_o$  y  $w_f$  son la humedad inicial y final del café respectivamente y  $t$  es el tiempo que se hace pasar el aire por el café para asegurar que la humedad final del café sea la correcta.

De manera general,  $m_{café}$  depende del tamaño del silo y las capacidades comunes pueden ser de 150@<sup>1</sup>, 200@, 300@, etc. La humedad inicial  $w_o$  con la que entra el café al silo está entre 48% y 55% [5] y la humedad final  $w_f$  con la que debe quedar el café para que se conserve durante más tiempo está entre 10% y 12% [5]. El tiempo  $t$  depende de varios factores, entre ellos están la masa de café a secar, la temperatura del aire que se utiliza para secar el café, etc.

Reemplazando la ecuación 2 en la ecuación 1 se obtiene la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_{a1} = \frac{m_{café} \cdot (w_o - w_f) \cdot (Cp_w \cdot \Delta T_w + h_{fg})}{t \cdot \eta_s \cdot Cp_{a1} \cdot \Delta T_{a1}} \quad (3)$$

Como ejemplo se desea secar 1250 kg – 3750 kg de café (100@ - 300@) en un tiempo de 86400 s (24 horas). El café tiene una humedad inicial de 50% (0,5) y se desea secar hasta que tenga una humedad final de 11% (0,11). El diagrama de cambio de temperatura para el aire y para el agua del café se muestra en la figura 2.

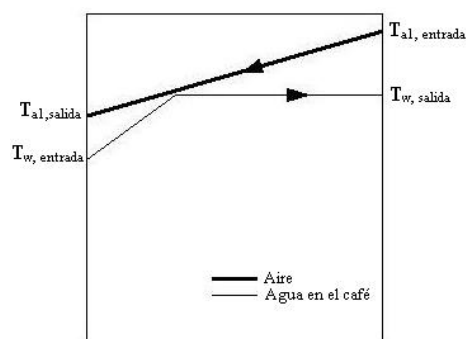


Figura 2. Diagrama de flujo de temperatura para el aire y para el agua en el café.

La temperatura del aire de secado debe estar entre 45°C y 55°C [6] ó puede ser menor. Si se utilizan temperaturas superiores a 55 °C se puede producir un sobresecado de las capas exteriores en los granos de café [5]. Para el ejemplo, las temperaturas a la entrada y a la salida para el aire y el agua en el café se tabulan en la tabla 1.

T <sub>a1, entrada</sub> (°C)	40
T <sub>a1, salida</sub> (°C)	20
T <sub>w, entrada</sub> (°C)	15
T <sub>w, salida</sub> (°C)	35

Tabla 1. Temperaturas para el aire y el agua en el café.

Con los datos de la tabla 1 se calcula los cambios de temperatura para el aire y el agua del café.  $\Delta T_{a1} = 20$  °C y  $\Delta T_w = 20$  °C.

La temperatura promedio del vapor de agua durante la etapa de secado es  $T_{w \text{ prom}} = (15^\circ\text{C} + 35^\circ\text{C}) / 2 = 25^\circ\text{C}$ . Con  $T_{w \text{ prom}}$  y de [2] se extraen los valores del calor específico para el agua y de la entalpía de vaporización:  $Cp_w = 1,8723$  kJ/kg·K y  $h_{fg} = 2442,3$  kJ/kg.

La temperatura promedio del aire durante la etapa de secado es  $T_{a1 \text{ prom}} = (40 + 20)^\circ\text{C} / 2 = 30^\circ\text{C}$ . Con  $T_{a1 \text{ prom}}$  y de [2] se obtiene que:  $Cp_{a1} = 1,005$  kJ/kg·K.

Si se reemplaza todos los valores ya conocidos en la ecuación 3, el flujo másico de aire, queda expresado en función de la masa de café  $m_{café}$  y la eficiencia del secado  $\eta_s$ .

<sup>1</sup> 1 arroba, @ = 12,5 kg

$$\dot{m}_{a1} = \frac{m_{café} (1,875(20 K) + 2442,3)}{\eta_s 86400 1,005 (20 K)}$$

Efectuando el cálculo, la ecuación queda:

$$\dot{m}_{a1} = 5,57 \times 10^{-4} \cdot \frac{m_{café}}{\eta_s} \quad (4)$$

Si en la ecuación 4, la eficiencia de secado  $\eta_s$ , se le asigna un valor, por ejemplo, 1, se puede entonces tabular diferentes valores de flujo másico de aire  $\dot{m}_{a1}$  para el respectivo valor de la masa de café  $m_{café}$  (ver tabla 2).

$t = 24$ horas; $\eta_s = 1$ ó 100%			
Masa de café (@)	Masa de café (kg)	Flujo másico de aire (kg/s)	Caudal de aire normal <sup>2</sup> (m <sup>3</sup> /s).
100	1250	0,70	0,583
125	1562,5	0,87	0,725
150	1875	1,04	0,867
175	2187,5	1,22	1,017
200	2500	1,39	1,158
225	2812,5	1,57	1,308
250	3125	1,74	1,450
275	3437,5	1,91	1,592
300	3750	2,09	1,742

Tabla 2. Flujo másico de aire para secar la respectiva masa de café en 24 horas y eficiencia de secado de 100%.

De la misma manera se pueden realizar tablas para diferentes eficiencias de secado. Luego se grafican los valores tabulados en las tablas y se obtiene una sola gráfica como la que se muestra en la figura 3, con diferentes eficiencias de secado desde 30% hasta el caso ideal de 100%.

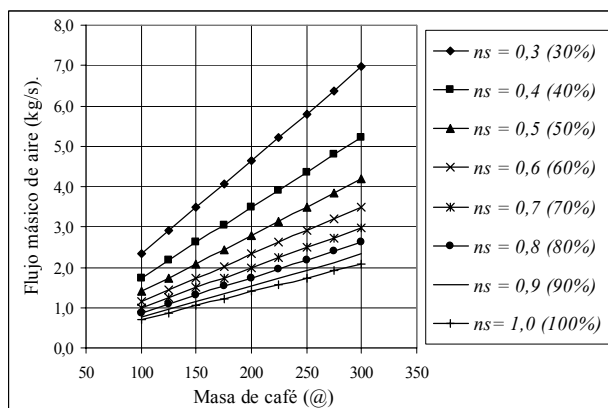


Figura 3. Gráfica de masa de café contra flujo másico de aire (tiempo de secado: 24 horas).

Según la figura 3, si por ejemplo se desea secar 200 @ de café (2500 kg) en 24 horas (86400 s), y si la eficiencia del secado es 50% (0,5), entonces se debe hacer pasar por

entre lo granos de café un flujo másico de aire de 2,8 kg/s o un caudal de 2,333 m<sup>3</sup>/s (4938,5 scfm, donde la s indica aire estándar o normal) de aire normal y así poder obtener una humedad final del café de 11%. El resultado anterior equivale a decir que se requieren **24,7 scfm/@** de café húmedo. Si la eficiencia de secado fuese 0,4, entonces se requieren **30,9 scfm/@**.

Si un silo de 200 @, cuenta con un ventilador de 7000 scfm, 2 in.c.a de cabeza estática y un motor de 5 HP, podemos sugerir entonces que se dispone de unos **35 scfm/@**. Es importante tener en cuenta que ese ventilador suministra a nivel del mar 3,307 m<sup>3</sup>/s, que multiplicados por 1,2 kg/m<sup>3</sup> dan un flujo de masa de 3,968 kg/s. Si se trae para Pereira ( $\rho = 1,0 \text{ kg} / \text{m}^3$ ), ese ventilador dará 3,307 m<sup>3</sup>/s, pero un flujo de masa de 3,307 kg/s, es decir, 17,7 % menos flujo de aire.

Esto permite establecer un criterio de secado con base en el flujo de masa de aire o con base al caudal pero de aire normal, cuya densidad sea la del aire normal,  $\rho = 1,2 \text{ kg} / \text{m}^3$ .

### 2.2 Calculo del flujo másico de aire que se utiliza en la combustión

El flujo másico de aire  $\dot{m}_{a2}$  necesario en el proceso de combustión se puede calcular utilizando la ecuación 5.

$$\dot{m}_{a2} = \dot{m}_{comb} \cdot AC = \dot{m}_{comb} \cdot ACT \cdot (1 + e) \quad (5)$$

En donde  $\dot{m}_{comb}$  es el flujo e masa del combustible,  $AC$  es la relación de aire-combustible,  $ACT$  es la relación de aire-combustible teórico y  $e$  es el exceso de aire. Para calcular  $\dot{m}_{a2}$  se debe entonces calcular primero  $\dot{m}_{comb}$ . El flujo másico de combustible  $\dot{m}_{comb}$  es la rata con la que se consume una masa de combustible  $m_{comb}$  (ecuación 6).

$$\dot{m}_{comb} = \frac{m_{comb}}{t} \quad (6)$$

Mediante ensayos de campo se determinó que en un Secador Intermitente de Flujos Concurrentes [5] se puede secar 3,22 kg de café pergamino seco con un kilogramo de cisco. Es decir que para secar 200@ de café pergamino se necesitan 776,4 kg de cisco<sup>3</sup>. En caso de utilizar otro combustible como el carbón, la masa equivalente de éste se puede calcular igualando el calor que entrega el combustible 1 con el que debe de entregar el combustible 2. Se deduce que:

<sup>2</sup> Calculada con densidad del aire normal (a nivel del mar) de 1,2 kg/m<sup>3</sup>. Para obtener el caudal en cfm se debe multiplicar por 2116,8

<sup>3</sup> Cascarilla de café pergamino seco.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{comb2} &= \dot{Q}_{comb1} \\ \eta_{cc2} \cdot m_{comb2} \cdot \Delta h_{comb2} &= \eta_{cc1} \cdot m_{comb1} \cdot \Delta h_{comb1} \quad (7) \\ m_{comb2} &= m_{comb1} \cdot \frac{\Delta h_{comb1}}{\Delta h_{comb2}} \cdot \frac{\eta_{cc1}}{\eta_{cc2}} \end{aligned}$$

En la anterior ecuación  $m_{comb1}$  y  $m_{comb2}$  son la masa de combustible 1 y 2 respectivamente;  $\Delta h_{comb1}$  y  $\Delta h_{comb2}$  son el poder calorífico de los combustibles 1 y 2 respectivamente;  $\eta_{cc1}$  y  $\eta_{cc2}$  son las eficiencias de combustión, cuyos valores son de 0,6 para el ACPM y el carbón mineral acorde con la referencia [7]. Para este ejemplo el combustible 1 es el cisco y el combustible 2 puede ser carbón, cascarilla de arroz, ACPM, etc.

En la tabla 3 se puede encontrar los valores de poder calorífico para diferentes combustibles que se pueden utilizar en el sacado de café.

Para saber cuál es la masa de carbón que se debe utilizar para reemplazar la masa de cisco se utiliza la ecuación 7

Combustible	Poder calorífico, $\Delta h_o$ (kJ/kg)
Cascarilla de café [5]	17936
Coque [5]	30514
ACPM [4]	43475
Basura (celulosa) [4]	19724
Gas natural [4]	37188
Residuo de madera [4]	15912
Bagazo de caña [4]	8964

Tabla 3. Poder calorífico para diferentes combustibles

Asumiendo que las eficiencias de combustión son iguales, la masa de carbón se determina así:

$$m_{carbón} = m_{cisco} \cdot \frac{\Delta h_{cisco}}{\Delta h_{carbón}} \quad (8)$$

Si la masa de cisco es 776,4 kg, para 24 horas de secado, entonces la masa de carbón debe ser 456,4 kg. Se debe tener en cuenta que la cámara de combustión se diseña para el máximo poder calorífico  $\Delta h_o$ .

Con la ecuación 6 se puede calcular el gasto másico de carbón. Según la ecuación 6, la masa de carbón se divide entre el tiempo en el cuál se debe secar el café. Para este ejemplo, el tiempo en el cuál se debe secar el café es de 86400 s (24 h), por lo tanto el gasto másico para el carbón es entonces:

$$\dot{m}_{carbón} = \frac{m_{carbón}}{t} = \frac{456,4 \text{ kg}}{86400 \text{ s}} = 5,28 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$$

La relación ACT se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$ACT = 11,53 \cdot C + 34,5 \cdot \left( H - \frac{O}{8} \right) + 4,3 \cdot S \quad (9)$$

En la anterior ecuación C, O, H y S son las cantidades de Carbono, Oxígeno, Hidrógeno y Azufre en el combustible. Por ejemplo para el carbón mineral [1]: C=0,7; O=0,06; H=0,04 y S=0,03 por lo tanto la relación ACT es 9,32.

El exceso de aire  $e$  se recomienda que este entre 25% y 30% según [3]. Para este ejemplo el exceso de aire se tomará de 30% (0,3).

Para obtener el flujo másico de aire utilizado en la combustión se reemplaza los valores de  $m_{comb}$ , ACT y  $e$  en la ecuación 5, así:

$$\dot{m}_{a2} = 5,28 \times 10^{-3} \text{ kg/s} \cdot 9,32 \cdot (1 + 0,3) = 0,064 \text{ kg/s}$$

El flujo másico de aire que debe mover el ventilador  $\dot{m}_a$  es la suma del flujo másico de aire que pasa a través del café  $\dot{m}_{a1}$  y del flujo másico de aire que se utiliza en la combustión  $\dot{m}_{a2}$ .

$$\dot{m}_a = \dot{m}_{a1} + \dot{m}_{a2} \quad (10)$$

Para este caso los valores de  $\dot{m}_{a1}$  y  $\dot{m}_{a2}$  son: 2,8 kg/s y 0,064 kg/s (2,28% del flujo para secado). Estos valores fueron calculados en las secciones 2.1 y 2.2 respectivamente. De la ecuación 10 se obtiene que el flujo másico de aire que debe mover el ventilador es de 2,864 kg/s, que equivalen a un caudal de aire normal (1,204 kg/m<sup>3</sup>) de 2,387 m<sup>3</sup>/s (5052 scfm).

La referencia [6] recomienda 25 m<sup>3</sup>/min-m<sup>3</sup> de café, ó 66 m<sup>3</sup>/min-ton cps, café pergamino seco. Este criterio se debe interpretar como aire normal. Para el ejemplo, de las 200 @ (2,5 ton), este criterio permitiría obtener: 66 m<sup>3</sup>/min-ton cps \* 2,5 ton = 2,75 m<sup>3</sup>/s. Las 2,5 ton son café húmedo luego, 2,5 (1-0,39) = 1,725 ton de cps., por lo tanto el caudal es menor de 1,9 m<sup>3</sup>/s de aire normal, criterio por debajo del valor calculado previamente. Sería más conveniente usar el valor de 2,75 m<sup>3</sup>/s y emplear además usar un regulador de caudal (damper).

### 3. ESPECIFICACIONES DEL VENTILADOR

Una vez conocido el caudal, la presión estática o cabeza estática del ventilador se debe estimar acorde con [6] y [7] para la especificación, selección y operación del ventilador se sugiere utilizar los conceptos establecidos por la referencia [8]. La presión estática que se requiere

para forzar el aire a través de ductos, compuertas y piso perforado se determina como la suma de cada una de las caídas de presión. La caída de presión en las capas de café (**cm.c.a**), acorde con [7], se determina como una función del espesor de las capas, L (m); el área transversal al flujo del aire, A (m<sup>2</sup>) y el caudal en  $\dot{V}$  (m<sup>3</sup>/s):

$$\frac{\Delta P}{L} = 0.0527 \left( \frac{\dot{V}}{A} \right)^{1,4845} \quad (11)$$

Sin embargo como el proceso es función del contenido de humedad del café, M (%), la referencia [6] sugiere el cálculo el cálculo mediante la siguiente expresión:

$$\frac{\Delta P}{L} = \left| \left[ \left( \frac{\dot{V}}{A} \right) / (9.523 - 0,0476 * M) \right] \right|^{1,4793} \quad (12)$$

Definidos el caudal y la cabeza ó la presión estática, estas ultimas relacionadas por la ecuación de la hidrostática.

$$\Delta P = \gamma SP \quad (13)$$

Se debe proceder a especificar dichos valores a condiciones normales, para efectuar su especificación y luego con esos datos seleccionar el ventilador. Dado que dicha maquina no operara a condiciones de aire normal, se debe tener en cuenta como opera en condiciones del sitio: Pereira (1420 m.s.n.m), Chinchiná, Manizales, Sevilla, donde la presión barométrica, es función de la altitud respecto al mar.

### 3.1 Números adimensionales de Bombas y Ventiladores

El fenómeno que ocurre en los ventiladores, cuando la variación de la densidad no supera el 5% entre la succión y la descarga es muy similar al de las maquinas hidráulicas, por esa razón los números pi a aplicar son muy similares.

Máquinas Hidráulica F(D, V, ρ, $\dot{W}$ , $\dot{V}$ , μ, gH)	D N ρ Variables de repetición	$\tau = \frac{\dot{W}}{\rho N^3 D^5}$
$\Phi = \frac{\dot{V}}{ND^3}$	$\Psi = \frac{\Delta P}{N^2 D^2}$	$Re = \frac{\mu}{\rho ND^2}$
<p><math>\Phi</math>: Coeficiente de caudal  <math>\Psi</math>: Coeficiente de energia  <math>\tau</math> = Coeficiente de potencia = <math>\Phi \Psi</math></p>		

Tabla 4 Números π de la maquinas hidráulicas.

### EJEMPLO No 2 (Tomado y adaptado de la referencia [8])

Un ventilador tiene las siguientes características a condiciones normales: 7238 scfm y, 2 pul c.a., una velocidad de giro de 833 rpm y un bhp de 2,9, (La eficiencia de esta maquina es: 7238\*2/(6356\*2,08) = 0,7854). Determinar las características de la máquina si se traslada a Pereira con los siguientes criterios:

- (a) No se cambian las RPM. (b) Si se debe mantener constante la transferencia de calor, o el flujo de masa.

**SOLUCIÓN/** Para resolver el problema se aplicarán las ecuaciones de la Tabla 4, donde el estado 1 esta a condiciones normales y el estado 2 a condiciones de Pereira. Las densidades se pueden estimar con la ecuación de estado.

#### (a) El primer caso, el caudal no cambia y el flujo de masa se reduce.

- $cfm_2 = cfm_1$
- $N_2 = N_1$
- $SP_2/SP_1 = \rho_2/\rho_1$
- $bhp_2/bhp_1 = \rho_2/\rho_1$

Teniendo en cuenta la relación de densidades  $\rho_2/\rho_1 = 0.075/0.0625$  y aplicando las ecuaciones se obtiene:

- $SP_2 = 2 * (0.0625/0.075) = 1.667 pul.c.a.$
- $bhp_2 = 2,9 (0.0625/0.075) = 2,42 hp$
- $\dot{m} = 0,075 \frac{lb}{ft^3} 7238 \frac{ft^3}{min} = 542,85 \frac{lb}{min}$
- $\dot{m} = 0,0625 \frac{lb}{ft^3} 7238 \frac{ft^3}{min} = 452,38 \frac{lb}{min}$
- Se puede observar una reducción del flujo de masa, no conveniente para el proceso de secado. Por esta razón el concepto a aplicar es el siguiente.

#### (b) En este caso es constante el flujo de masa para garantizar la capacidad del proceso de secado:

$\dot{m} = \rho_1 * cfm_1 = \rho_2 * cfm_2 = 375 lb/min$ . Los coeficientes de la Tabla 4 quedan:

- $cfm_2/cfm_1 = N_2/N_1 = \rho_1/\rho_2$
- $SP_2/SP_1 = (N_2/N_1)^2 = \rho_1/\rho_2$
- $bhp_2/bhp_1 = (N_2/N_1)^3 = (\rho_1/\rho_2)^2$

Aplicando la relación de densidades:

- $rpm_2 = 833 (0.075/0.0625) = 999,6 rpm$
- $cfm_2 = 7238 (0.075/0.0625) = 8685,6 cfm$
- $SP_2 = 2 (0.075/0.0625) = 2.4 pul.c.a.$
- $bhp_2 = 2,9 (0.075/0.0625)^2 = 4,176 hp$

**El motor a usar será de 5 HP y no de 3 HP como seria a nivel del mar.**

#### 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se desarrolló un modelo termodinámico para estimar el flujo másico de aire y el caudal que debe mover un ventilador para un caso típico en la etapa del secado del café. **El modelo permite estimar el flujo másico de aire necesario para secar cualquier masa de café**, para diversos tiempos de secado o diversas eficiencias de secado. También se puede efectuar el estimativo cambiando el tipo de combustible utilizado acorde con la tabla 3 y según estos cambios hechos se calcula el flujo másico y el caudal de aire. El flujo masico requerido para la combustión no supera el 5% del requerido para el secado.

Se pueden construir gráficas como la que se muestra en la figura 3 para diferentes tiempos de secado (20 h, 24 h, 30 h, 36 h, 48 h, etc.), usando el mismo modelo el cual fue programado en Excel para obtener gráficas como la figura 3.

Respecto al ventilador, se tienen dos opciones con la maquina seleccionada a nivel del mar. **Cambiar las RPM de la maquina y su motor** como se acaba de analizar en la sección 3.1 parte b) ó **seleccionar una maquina cuyo caudal a nivel del mar sea mayor en la relación de densidades** ( $\rho_{normal} / \rho_{sitio}$ ), para obtener en el sitio el mismo flujo de masa requerido a nivel del mar para el proceso de secado

#### 5. BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CASTRO M. Javier, *Operación y Mantenimiento de Calderas*, Centro de Publicaciones Universidad Nacional, Seccional Bogotá, Octubre de 2002.
- [2] CENGEL Yunus A., *Termodinámica*, Tomo II Segunda Edición, Mc GRAW-HILL, Méjico D.F., 1996.
- [3] OROZCO HINCAPIE., Carlos A., *Aplicaciones de la Ingeniería Solar*, Centro de Publicaciones Universidad Nacional, Seccional Manizales, Agosto 1988.
- [4] OROZCO HINACPIE, Carlos A., *Optimización del Diseño de Aislantes Térmicos para Superficies Calientes: Tuberías*, revista Scientia et Technica N° 3, Pereira, Colombia: UTP, Abril de 1996, pp 107-113.
- [5] ROA M. Gonzalo, *Beneficio Ecológico del Café*, Primera edición, Cenicafé, Chinchiná, 1999, pp 160-179.
- [6] Centro Nacional de Investigaciones del Café. Unificación de Criterios en Beneficio Ecológico de

Café. Chinchiná, Colombia: Cenicafé, Noviembre 23 a 26 de 2004, p.p. 160-178

- [7] Centro Nacional de Investigaciones del Café, “Pedro Uribe Mejia”. Curso básico de beneficio del café. Chinchiná, Colombia: Cenicafé, Octubre de 1989, p.p, 57-60.
- [8] OROZCO HINCAPIE, Carlos A. *Determinación de las curvas de comportamiento de un ventilador centrifugo a partir de datos de catálogo y de laboratorio*, revista Scientia et Technica N° 16, Pereira, Colombia: UTP, Abril de 1996, pp 113-117.