

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA

**ÁREA DE ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y RECURSOS
NATURALES NO RENOVABLES**

CARRERA INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

TESIS DE GRADO

**PREVIO A OPTAR POR EL TÍTULO
DE INGENIERO ELECTROMECAÁNICO**

TÍTULO:

**“Diseño y Construcción de un Secador de Granos con Gas Licuado de
Petróleo (GLP) para la asociación de cafeteros del cantón Yanzatza
pertenecientes a APEOSAE; de un quintal de capacidad.**

AUTORES:

VICENTE ROBERTO AMBROSSI ROBLES

WILSON EFREN QUEZADA CHAVEZ

DIRECTOR:

ING. MILTON AMABLE LEON TAPIA

LOJA-ECUADOR

2012

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR DE GRANOS CON GAS
LICUADO DE PETRÓLEO (GLP) PARA LA ASOCIACIÓN DE CAFETEROS
DEL CANTÓN YANZATZA PERTENECIENTES A APEOSAE; DE UN
QUINTAL DE CAPACIDAD”.**

CERTIFICACIÓN

Ing. Milton Amable León Tapia.

CERTIFICA

Haber dirigido, asesorado, revisado y corregido el presente trabajo de tesis de grado, en su proceso de investigación, bajo el tema **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR DE GRANOS CON GAS LICUADO DE PETRÓLEO (GLP) PARA LA ASOCIACIÓN DE CAFETEROS DEL CANTÓN YANZATZA PERTENECIENTES A APEOSAE; DE UN QUINTAL DE CAPACIDAD”**, previa a la obtención del título de Ingeniero Electromecánico, realizado por los señores egresados: Vicente Ambrossi, Wilson Quezada, la misma que cumple con la reglamentación y políticas de investigación, por lo que autorizo su presentación y posterior sustentación y defensa.

Ing. Milton Amable León Tapia.

DIRECTOR DE TESIS

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

La investigación, análisis y conclusiones del presente trabajo de tesis, les corresponden exclusivamente a sus autores y el patrimonio intelectual a la Universidad Nacional de Loja. Autorizamos al Área de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales No Renovables y por ende a la carrera de Ingeniería Electromecánica, hacer uso del presente documento en lo conveniente.

Vicente Ambrossi

Wilson Quezada

DEDICATORIA

- ❖ Todo esfuerzo y meta conseguida a lo largo de mi carrera se la dedico a Dios por haberme permitido la existencia. A mis padres porque han sido la mejor guía, apoyo y por enseñarme el equilibrio en la vida; el ser perseverante, sin descuidar las cosas más importantes de la existencia; a mis hermanos que me permitieron aprender a solucionar los problemas en equipo; y a mi esposa por el apoyo incondicional durante toda mi carrera y a mis amados hijos.

Vicente

- ❖ Dedico el presente trabajo a mi familia en general, y de manera especial a mis amados padres, que gracias a su esfuerzo, paciencia, dedicación y apoyo incondicional, logre terminar mi estudio de Ingeniería.
- ❖ A la Universidad Nacional de Loja que nos permitió adquirir conocimientos para elevar nuestra cultura general, tanto académica como profesional, para lograr alcanzar grandes metas que nos formen como buenos profesionales para servir a la sociedad.
- ❖ A la mujer más importante que me envió Dios ya que sin el apoyo de ella no lograría este objetivo.

Wilson

TABLA DE CONTENIDOS

CERTIFICACION	iii
DECLARACION DE AUTORIA.....	iv
DEDICATORIA	v
TABLA DE CONTENIDOS	vi
SIMBOLOGÍA.....	viii
1.- RESUMEN	x
2.- INTRODUCCION.....	xii
3.- REVISION DE LITERATURA	1
3.1.1 Calor Definicion	1
3.1.2 Transferencia de Calor.....	2
3.1.3 Termodinámica	7
3.1.4 TeoríaCinética de los Gases.....	14
3.1.5 Poder Calorífico.....	16
3.2 CAPITULO II: VENTILACIÓN	18
3.2.1 Ventilador.....	18
3.2.2 Flujo Másico.....	23
3.2.3 Calculo Flujo Másico.....	25
3.3 CAPITULO III: MECÁNICA DE FLUIDOS	25
3.3.1 Introduccion al Estudio de los Fluidos	26
3.3.2 Propiedades físicas de los Fluidos.....	28
3.3.3 Resistencia de los Fluidos.....	30
3.4 CAPITULO IV: SECADO DE CAFÉ	31
3.4.1 Café.....	31
3.4.2 Secado de Café.....	33
3.4.3 Humeo metros.....	46
3.4.4 Capacidad de Secado.....	48
3.4.5 Tipos de Secadora.....	57
3.4.5.1 Secadoras en tandas y Silos secadores.....	63

3.4.6	Calculo de la Capacidad necesaria de Secado.....	67
3.5	CAPITULO V: CALCULO.....	70
3.5.1	Calculo del flujo másico y Caudal de aire para el ventilador.....	70
3.5.1.1	Calculo del flujo másico de aire transportado por el ventilador.....	70
4.-	MATERIALES Y METODOS;Error! Marcador no definido.	82
4.1	Materiales.....	822
4.2	Métodos.....	82
5.-	RESULTADOS.....	844
6.-	CONCLUSIONES.....	865
7.-	RECOMENDACIONES.....	886
8.-	BIBLIOGRAFIA.....	907
9.	ANEXOS.....	929

SIMBOLOGÍA

Glp= Gas Licuado de Petróleo

Q= Incremento de calor (o energía) en Joules [J]

Cp. =Calor específico del cuerpo en [J/kg° C]

m =Masa del cuerpo en kilogramos [kg]

ΔT =Diferencia de temperatura = Tfinal – Tinitial en [°C]

Q/t=Cantidad de calor transferido por unidad de tiempo en [J/s]

K = Conductividad térmica del material en [W/m K]

A = Superficie en contacto [m²]

T = Temperatura en [K]

d = Espesor del material en [m]

h= el coeficiente convectivo o coeficiente superficial de transmisión de calor.

U = es el llamado coeficiente global de transmisión o transmitancia

ΔU o ΔET = Cambio de la energía interna en Joules

Q = Calor añadido al sistema en Joules

W = Trabajo efectuado por el sistema en Joules

Trabajo (W) = *Fuerza (F) x Distancia (d)* y que *Presión (P) = Fuerza (F)/ Área (A)*

η_C = Eficiencia de Carnot

W = Trabajo

QH= Calor ingresado al sistema

QC= Calor perdido por el sistema

TH = Temperatura inicial en °K

TC = Temperatura final en °K

\dot{Q}_w = Calor de vaporización ganado por el café

η_s = Eficiencia de secado

\dot{Q}_{a1} = Calor perdido o cedido por el aire

m_w = es el flujo de masa de agua extraído del café pergamino

Cp_w = es el calor específico para el vapor de agua

ΔT_w = es el cambio de temperatura que experimenta el café en la etapa del secado

h_{fg} = es la entalpía de vaporización del agua

Cp_{a1} = es el calor específico para el aire atmosférico

ΔT_{a1} = es el cambio de temperatura que experimenta el aire en la etapa del secado.

m_{cafe} = es la masa de café pergamino a secar

w_o = humedad inicial del café

w_f = humedad final del café

t = tiempo

1 quintal = 3,94 arrobas @ = 100 libras lb = 45.36 Kilogramos Kg

La humedad inicial del café es de $w_o = 50\%$ (0.5)

La humedad final del café es de $w_f = 11\%$ (0.11)

Ta1 = temperatura del aire

Tw = temperatura del agua

$\rho = 1,2 \text{ Kg}/\text{m}^3$ = Densidad aire normal

\dot{m} = Flujo Másico

\dot{m}_{a2} = Flujo másico de aire para la combustión

\dot{m}_{comb} = flujo de masa del combustible

AC = es la relación de aire- combustible

ACT = es la relación de aire-combustible teórico

e = exceso de aire.

m_{comb1} y m_{comb2} son la masa de combustible 1 y 2 respectivamente

Δh_{comb1} y Δh_{comb2} son el poder calorífico de los combustibles 1 y 2

n_{cc1} y n_{cc2} son las eficiencias de combustión, cuyos valores son de 0,98

\dot{m}_{GLP} = Gasto másico para el GLP

1.- RESUMEN

El presente trabajo de tesis de grado se basa en el, diseño y construcción de un secador de granos con gas licuado de petróleo (gpl) para la asociación de cafeteros del cantón Yanzatza pertenecientes a APEOSAE; de un quintal de capacidad”, lo que permitirá que dicha asociación cuente con una maquina muy practica la cual resolverá los problemas con el secado del café debido especialmente al alto grado de humedad existente en el ambiente por cuestiones de clima

La máquina expuesta está conformada por Motor, Ventilador, tablero de control y algunos elementos auxiliares.

El cálculo de las piezas y elementos que conforman la máquina se desarrolló mediante el empleo de teoría extraída de la bibliografía, el asesoramiento de profesionales dedicados a la producción y comercialización de café también de equipo utilizado en el proceso de secado del mismo, así como de la colaboración de nuestro director. El proceso de selección de los elementos constitutivos se lo realiza con los criterios más adecuados de modo que garantice el óptimo diseño y funcionamiento de la máquina, la capacidad de la secadora es de 1 quintal en el secado y 1 quintal en el pre secado, el porcentaje de humedad final del café en la etapa de secado es de 12% de humedad el cual es el optimo para el almacenamiento del mismo.

SUMMARY

This thesis work is based on the design and construction of a grain dryer with liquefied petroleum gas (LPG) for the association of coffee belonging to the canton Yanzatza APEOSAE, a 100 lb of capacity, "allowing to the association get a very handy machine which will solve the problems with the drying of coffee especially the high humidity in the area of weather conditions.

The machine is an exposed motor, fan, control panel and some auxiliaries, features.

The part calculation and elements which are part of the machine were developed through theory taken from books, literature professional support, equipment used in the drying of coffee, and our manager's cooperation. The selection process of main parts was made which the best criteria in order to warranty a good performance, good design. The dryer's capacity is about 100 lb of drying, and 100 lb of pre drying, the percentage of final humidity in the coffee is 12% of humidity which is optimum to its storage

2.- INTRODUCCIÓN

La importancia en el secado de café para su almacenamiento ha llevado al perfeccionamiento continuo, en la construcción de secadores de este producto de acuerdo a las nuevas exigencias que imponen las condiciones de producción como de comercialización así también las nuevas posibilidades que se abren con el desarrollo de la ciencia, con la aparición de nuevos materiales, así como los nuevos procedimientos que dan a este una forma conveniente, para que el producto adquiera las condiciones y propiedades requeridas para su comercialización y consumo. El presente trabajo tema de nuestro proyecto está dirigido a los pequeños productores de café del cantón Yanzatza pertenecientes a APEOSAE, ya que como es de conocimiento general en este lugar tenemos un clima cálido con una humedad del 60 al 75% lo cual prolonga el secado de café el tendales o patios como comúnmente se lo realiza, asiendo un poco difícil la economía de los pequeños productores de este producto ya que su costo varía dependiendo del grado de humedad del producto.

Los requisitos principales de funcionamiento y construcción de máquinas modernas para secar café principalmente son: el mayor rendimiento posible en cuanto al consumo de combustible, la economía en su construcción; un funcionamiento duradero y sin fallos, invirtiendo el mínimo de trabajo, de material y otros recursos.

El rendimiento del secador se consigue de un modo más eficaz y eficiente optimizando el uso de todos sus componentes, Motor, ventilador, cámara de secado y pre secado, para lo cual se debe realizar un cálculo exacto para la optimización de estos componentes.

El presente proyecto tiene la finalidad de diseñar, construir y montar un secador de café acorde a las necesidades de los productores del cantón Yanzatza, tomando en cuenta la geografía, economía así como la idiosincrasia de los habitantes y productores de café.

Este proyecto se ha dividido en cinco capítulos los cuales son indispensables para la culminación exitosa del mismo.

3.- REVISIÓN DE LITERATURA

3.1.1 Calor definición

El *calores* la transferencia de energía de un cuerpo de mayor temperatura a otro de menor temperatura también se define el calor como una energía en tránsito, de forma que sólo tiene sentido mientras está transfiriéndose de un sistema a otro.

Cantidad de Calor

La cantidad de calor es una manifestación de la energía interna de un cuerpo. A escala microscópica las moléculas que constituyen la materia tienen una energía cinética proveniente del movimiento aleatorio de las moléculas y una energía potencial proveniente de la fuerza de atracción de las moléculas entre sí. De allí que la energía interna de un cuerpo es la suma de estas dos energías. Por ejemplo, en un gas la energía interna es mayormente energía cinética, mientras que en un líquido o sólido es mayormente energía potencial.

Con estos antecedentes tenemos que la cantidad de calor depende de las energías de todas las moléculas, se debe por consiguiente, a la masa del sistema.

Una unidad de calor muy usada es la Caloría. Es la cantidad de calor necesario para elevar la temperatura de un gramo de agua desde 14,5 grados centígrados hasta 15,5 grados centígrados. Se especifica este intervalo porque la cantidad de calor necesario para elevar la temperatura en 1 grado centígrado depende, precisamente, de esta. Se necesita diferente cantidad de calor para llevar un gramo de agua desde 10 grados centígrados, hasta 11 grados centígrados que desde 50 grados centígrados hasta 51 grados centígrados. Las sustancias difieren, unas de otras, en la cantidad de calor que necesitan para elevar, la unidad de masa, en un mismo intervalo de temperatura.

Temperatura Definición

La *temperatura* es una medida directa de la energía cinética de un cuerpo. Es también una magnitud referida a las nociones comunes de calor o frío. Por lo general, un objeto más "caliente" tendrá una temperatura mayor.

La temperatura es Físicamente es una magnitud escalar relacionada con la energía interna de un sistema termodinámico. Más específicamente, está relacionada directamente con la parte de la energía interna conocida como "energía sensible", que es la energía asociada a los movimientos de las partículas del sistema, sea en un sentido, rotacional, o en forma de

vibraciones. A medida que es mayor la energía sensible de un sistema se observa que está más "caliente" es decir, que su temperatura es mayor.

Al calentar un cuerpo se provoca un incremento de la energía cinética interna lo que se evidencia por un aumento de su temperatura. Si la temperatura de dos cuerpos es la misma, su energía cinética es igual, pero no significa que su energía interna sea igual.

Calor Específico

La cantidad de calor por una unidad de masa necesaria para elevar en un grado centígrado la temperatura de un cuerpo se conoce como calor específico. El *calor específico* del agua es de 4.186 J/kg °C, mientras que la del cobre es de 386 J/kg °C. La energía potencial interna del agua es mucho mayor que la del cobre. Se necesita más energía para calentar un gramo de agua que uno de cobre, mientras que la energía cinética es la misma pues el cambio de temperatura es igual.

El incremento de calor se representa por la fórmula:

$$Q = m C_p \Delta T$$

Donde:

Q = Incremento de calor (o energía) en Joules [J]

Cp. = Calor específico del cuerpo en [J/kg° C]

m = Masa del cuerpo en kilogramos [kg]

ΔT = Diferencia de temperatura = Tfinal – Tinitial en [°C]

3.1.2 Transferencia de calor

En física es el proceso por el que se intercambia energía en forma de calor entre distintos cuerpos, o entre diferentes partes de un mismo cuerpo que están a distinta temperatura. El calor se transfiere mediante convección, radiación o conducción. Aunque estos tres procesos pueden tener lugar simultáneamente, puede ocurrir que uno de los mecanismos predomine sobre los otros dos.

La transferencia de calor siempre ocurre de un área o cuerpo caliente a uno más frío. La transferencia de calor clásica ocurre solamente a través de los procesos de conducción, convección, radiación o cualquier combinación de ellos.

La transferencia de calor es de particular interés para los ingenieros, quienes intentan comprender y controlar el flujo de calor a través de los aislamientos térmicos,

intercambiadores de calor, y otros dispositivos. La transferencia de calor se enseña típicamente a los estudiantes y graduados de ingeniería mecánica y química.

Conducción

Se denomina conducción calorífica al mecanismo de transferencia de energía que tiene lugar mediante el intercambio de energía cinética entre las partículas (iones, moléculas, átomos, etc.) de dos sistemas en contacto directo, o de dos partes de un mismo sistema a distinta temperatura.

Es, por tanto, una transferencia de energía desde una partícula a otra a través de un medio material, pero sin desplazamiento de éste, puede ocurrir en sólidos y fluidos, siendo los sólidos metálicos los mejores conductores del calor.

En los sólidos, la única forma de transferencia de calor es la conducción. Si se calienta un extremo de una varilla metálica, de forma que aumente su temperatura, el calor se transmite hasta el extremo más frío por conducción. No se comprende en su totalidad el mecanismo exacto de la conducción de calor en los sólidos, pero se cree que se debe, en parte, al movimiento de los electrones libres que transportan energía cuando existe una diferencia de temperatura. Esta teoría explica por qué los buenos conductores eléctricos también tienden a ser buenos conductores del calor. En 1822, el matemático francés Joseph Fourier dio una expresión matemática precisa que hoy se conoce como ley de Fourier de la conducción del calor.

El factor de proporcionalidad se denomina conductividad térmica del material. Los materiales como el oro, la plata o el cobre tienen conductividades térmicas elevadas y conducen bien el calor, mientras que materiales como el vidrio o el amianto tienen conductividades cientos e incluso miles de veces menores; conducen muy mal el calor, y se conocen como aislantes.

Tenemos la siguiente ecuación para la transferencia de calor entre dos superficies planas con una pared en la mitad

$$\frac{Q}{t} = \frac{KA(T_H - T_C)}{d}$$

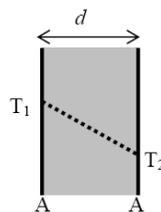


Figura 1. Transferencia de Calor entre dos superficies

Donde:

Q/t = Cantidad de calor transferido por unidad de tiempo en [J/s]

K = Conductividad térmica del material en [W/m K]

A = Superficie en contacto [m²]

T = Temperatura en [K]

d = Espesor del material en [m]

De acuerdo a la tabla 1 podemos deducir que los mejores conductores de calor son la plata y luego el cobre.

Convección

Convección es el mecanismo de transmisión de calor que tiene lugar como resultado del movimiento de la masa de un fluido como el aire o el agua al cual se le obliga a alejarse de la fuente de calor. La materia caliente tiene menor densidad que la fría, por ello se expande y se eleva. La densidad es igual a masa sobre volumen. El aire caliente sube, al igual que el agua. En un gas ideal las relaciones entre presión, volumen y temperatura se contienen en la *Ley del Gas Ideal* a presión constante $PV = nRT$. Si se incrementa el volumen, la temperatura también sube, y viceversa, n y R son constantes químicas.

Se trata, por tanto, de un transporte simultáneo de masa y energía, que requiere la existencia de un fluido.

La convección es forzada cuando el movimiento del fluido está provocado por una causa externa, como un ventilador o una bomba. La convección es natural o libre cuando es debida a la diferencia de densidad entre las zonas del fluido que se mantienen a distinta temperatura. Esta es la que da lugar, por ejemplo, a las corrientes de aire. En el caso del agua que se está congelando, el movimiento de convección, unido a la dilatación anómala del agua, hace que se congele primero sólo la superficie. En el caso del cuerpo humano, la sangre actúa como fluido convectivo, que transmite el calor desde el interior del cuerpo hasta su superficie.

Ley de enfriamiento de Newton.

El flujo de calor por convección entre una superficie sólida y un fluido en contacto con ella es:

$$Q = Q/t = h A \Delta T$$

(Ecuación 1)

Siendo ΔT la diferencia de temperatura entre la superficie y el fluido (en valor absoluto), A el área de contacto y h el coeficiente convectivo o coeficiente superficial de transmisión de calor.

Radiación

Es una transmisión (emisión y recepción) de energía por medio de ondas electromagnéticas o fotones que llevan la energía fuera del objeto emisor. Un foco es un ejemplo de transferencia de calor por radiación. No necesita de medio material, es decir, se propaga incluso en el vacío, está caracterizada por una determinada longitud de onda, por ejemplo:

Radiación ultravioleta: 0'01 a 0'38 μm

Radiación visible: 0'38 a 0'79 μm

Radiación infrarroja: 0'79 a 1000 μm

Las sustancias pueden emitir radiación en distintas longitudes de onda y, por otra parte, ser atravesadas o no por radiaciones de determinadas longitudes de onda, el ejemplo más claro es el de la radiación que proviene del Sol y calienta la Tierra.

También en los calefactores eléctricos sin ventilador, en los sistemas de radiadores por agua o aceite o en las chimeneas de leña, la mayor parte del calor que recibimos es mediante radiación.

Todos los objetos emiten energía radiante en una mezcla de longitudes de onda y, por otra parte, están expuestos a la radiación que les llega de los demás objetos.

La emisión y recepción de radiación depende de la naturaleza de la sustancia, de su temperatura, del estado de su superficie y, en los gases, de su presión y del espesor de la muestra.

La radiación presenta una diferencia fundamental respecto a la conducción y la convección: las sustancias que intercambian calor no tienen que estar en contacto, sino que pueden estar separadas por un vacío. La radiación es un término que se aplica genéricamente a toda clase de fenómenos relacionados con ondas electromagnéticas. Algunos fenómenos de la radiación pueden describirse mediante la teoría de ondas, pero la única explicación general satisfactoria de la radiación electromagnética es la teoría cuántica, la radiación se comporta como minúsculos proyectiles llamados fotones y no como ondas.

La contribución de todas las longitudes de onda a la energía radiante emitida se denomina poder emisor del cuerpo, y corresponde a la cantidad de energía emitida por unidad de superficie del cuerpo y por unidad de tiempo.

Cuanto mayor es la temperatura, mayor es la cantidad de energía emitida. Además de emitir radiación, todas las sustancias son capaces de absorberla. Por eso, aunque un cubito de hielo emite energía radiante de forma continua, se funde si se ilumina con una lámpara incandescente porque absorbe una cantidad de calor mayor de la que emite.

Ecuación de Stefan - Boltzmanque, aplicada al caso de un colector solar, es:

$$Q = \varepsilon A \sigma (T^4 - T_e^4)$$

(Ecuación 2)

Dónde:

ε = Emisividad del cuerpo. Un cuerpo negro ideal tiene una emisividad de uno, es decir
Toda la radiación se emite. La emisividad es adimensional.

A= Superficie en [m²]

σ = Constante de Stefan-Boltzmann = $5,67 \times 10^{-8} (W m^{-2} K^{-4})$

T = Temperatura del cuerpo radiante en [K]

Te = Temperatura exterior en [K]

y, finalmente, ε es una propiedad del material del que está hecho la sustancia, denominada emisividad, cuyo valor varía entre 0 y 1.

Transmisión mixta. Coeficiente global de transmisión.

Generalmente la conducción y la convección no son fenómenos separados, sino que en la mayoría de los casos se presentan en conjunto. Así, cuando tenemos una superficie sólida, suele existir una capa de fluido a ambos lados de la misma. El calor se transmite por convección en dichas capas de fluido y por conducción en el interior de la superficie.

Este es el caso de una ventana de cristal, con capas de aire en sus dos caras. También el del radiador de agua caliente o el radiador de un coche, con aire en el exterior.

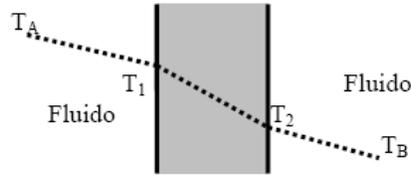


Figura 2. Diferencia de temperaturas entre fluidos

Si $\Delta T = T_A - T_B$ es la diferencia de temperaturas entre el fluido caliente y el frío (distinta de la diferencia de temperatura entre las paredes del sólido: $T_2 - T_1$), el flujo de calor será:

$$Q = \frac{Q}{t} = U A \Delta T$$

Ecuación 2

Donde U es el llamado coeficiente global de transmisión o transmitancia:

$$UA = \frac{A}{R} = \frac{1}{\frac{1}{A_A h_a} + \frac{1}{A_B h_B} + \frac{d}{A_C k} + \dots} = \frac{1}{\frac{R_A}{A_A} + \frac{R_B}{A_B} + \frac{R_C}{A_C} + \dots}$$

En unidades de $W/(m^2 K)$.

Si las áreas son iguales: $A = A_A = A_B \dots \Rightarrow R = R_A + R_B \dots$ donde cada R puede ser de convección o de conducción.

3.1.3 Termodinámica

La termodinámica se ocupa de la energía y sus transformaciones en los sistemas desde un punto de vista macroscópico. Sus leyes son restricciones generales que la naturaleza impone en todas esas transformaciones.

La termodinámica es una teoría de una gran generalidad, aplicable a sistemas de estructura muy elaborada con todas las formas de propiedades mecánicas, eléctricas y térmicas complejas. Puesto que la termodinámica se focaliza en las propiedades térmicas, es conveniente idealizar y simplificar las propiedades mecánicas y eléctricas del sistema.

Principios y Leyes de la Termodinámica

El primer principio de la termodinámica

La primera ley de la termodinámica afirma que la energía total de cualquier sistema aislado se conserva.

Se trata de la generalización de la segunda ley de Newton (conservación del movimiento), mediante el reconocimiento de que el calor Q es una forma de energía y de la energía interna U como una propiedad intrínseca de la materia.

Leyes de la Termodinámica

Primera ley de la termodinámica

Energía

Hay dos maneras de transformar la energía interna de un cuerpo; a) mediante el incremento del trabajo introducido en ese cuerpo; y, b) mediante el incremento de temperatura. Esto se resume en la primera ley de la termodinámica que es la ley de conservación de energía aplicada a un proceso de calor.

Para un sistema cerrado (de masa constante) la primera ley de la termodinámica se expresa matemáticamente por medio de:

$$\Delta E_T = Q - W$$

Ecuación 3

Algunos autores toman la simbología de la siguiente manera

$$\Delta U = Q - W$$

Ecuación 4

Donde:

ΔU o ΔE_T = Cambio de la energía interna en Joules

Q = Calor añadido al sistema en Joules

W = Trabajo efectuado por el sistema en Joules

Recordemos que

Trabajo (W) = Fuerza (F) x Distancia (d) y que Presión (P) = Fuerza (F) / Área (A)

entonces podemos escribir:

$$W = F \cdot d = (F / A) \cdot A \cdot d = P \cdot \Delta V$$

Ecuación 4

es decir que el Trabajo = Presión por cambio de Volumen. Éste es un concepto básico en un motor de combustión interna y en los ciclos termodinámicos.

La primera ley de la termodinámica sólo proporciona la expresión cuantitativa del principio de conservación de la energía. En palabras, expresa que el cambio total de energía de un sistema cerrado es igual al calor transferido al sistema, menos el trabajo efectuado por el sistema.

Formas de intercambio de energía sistema-entorno

Para sistemas cerrados, el intercambio de energía sistema-entorno sólo puede ocurrir en dos formas: calor y trabajo.

Trabajo

El trabajo en termodinámica siempre representa un intercambio de energía entre un sistema y su entorno.

Cuando un sistema sufre una transformación, este puede provocar cambios en su entorno. Si tales cambios implican el desplazamiento (variación) de las fuerzas que ejerce el entorno sobre el sistema, o más precisamente sobre la frontera entre el sistema y el entorno, entonces ha habido producción de trabajo. Dependiendo del origen físico de las fuerzas aplicadas al sistema se distinguen diferentes formas de trabajo realizado

El trabajo tiene dimensiones de energía y representa un intercambio de energía entre el sistema y su entorno. Por convención se considera que el trabajo realizado por el sistema es positivo y el trabajo efectuado sobre el sistema es negativo.

El segundo principio de la termodinámica

Entropía

No es posible convertir completamente calor en trabajo, pero sí trabajo en calor. Así pues, mientras, según la primera ley, calor y trabajo son formas equivalentes de intercambio de energía, la segunda ley varía radicalmente su equivalencia, ya que el trabajo puede pasar íntegramente a calor pero el calor no puede transformarse íntegramente en trabajo.

En realidad, un proceso energético tiene pérdidas y no toda la energía de entrada se transforma en trabajo. La segunda ley de la termodinámica establece un límite a la eficiencia de un proceso de calor y fija la dirección en que se puede dar la transferencia de calor. Si tomamos el caso de una máquina de calor que produce trabajo cuando se calienta (por ejemplo, un motor de combustión o un colector solar), la segunda ley dice que es

imposible extraer una cantidad de calor Q_H de un reservorio de calor y usarlo totalmente para producir trabajo, ya que una parte del calor Q_C va a un reservorio frío. Algo similar ocurre con la bomba de calor (por ejemplo, una refrigeradora o un aire acondicionado), donde para llevar una cantidad de calor de un cuerpo frío a uno más caliente debemos introducir un trabajo en el sistema.

Desde el punto de vista de la primera ley de la termodinámica, los dos procesos (trabajo y calor) son equivalentes. El calor puede transformarse en trabajo, o el trabajo en calor. Esta equivalencia se pierde si consideramos la segunda ley. El trabajo es una forma más 'coherente' de energía. Siempre podemos transformarlo en calor, pero la inversa no siempre es posible.

La máxima eficiencia que podemos obtener de una máquina de calor viene dada por la *eficiencia de Carnot*, que dice:

$$\eta_C = \frac{W}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_C}{Q_H}$$

Ecuación 5

Donde:

η_C = Eficiencia de Carnot

W = Trabajo

Q_H = Calor ingresado al sistema

Q_C = Calor perdido por el sistema

Si la masa de un cuerpo no varía en el proceso, la cantidad de calor Q es directamente proporcional a la temperatura, por lo que podemos expresar la ecuación anterior de eficiencia de Carnot en función de la temperatura como:

$$\eta_C = \frac{W}{T_H} = \frac{T_H - T_C}{T_H} \times 100\%$$

Ecuación 6

Donde:

T_H = Temperatura inicial en [K]

T_C = Temperatura final en [K]

En un proceso termodinámico irreversible de un gas ideal la eficiencia de Carnot es del 57%.

Motores y bombas térmicas

Se definen los *motores térmicos* como los dispositivos que producen trabajo mediante un proceso de intercambio de calor entre dos recipientes, no obstante el cual permanece sin cambios.

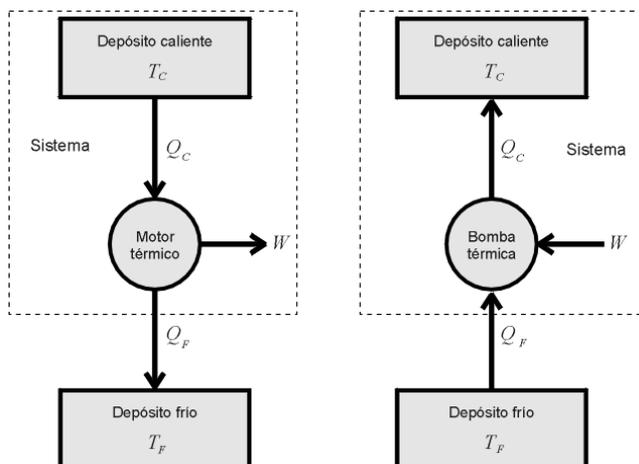


Figura 3

Considérese el motor térmico de la fig.1. La variación de entropía para el sistema total es

$$\Delta S_T = \Delta S_C + \Delta S_F + \Delta S_M$$

Ecuación 7

Dado que la entropía del motor no varía al ser éste cíclico, $\Delta S_M = 0$, entonces

$$\Delta S_T = \frac{-Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F}$$

Ecuación 8

Para el motor, la primera ley da

$$\Delta U_M = Q_C - Q_F - W$$

Ecuación 9

Y puesto que ΔU_M ,

$$W = Q_C - Q_F$$

Ecuación 10

Combinando Ecuación 8 y 10 para eliminar Q_C tenemos

$$W + Q_F = -T_C(\Delta S_T - Q_F / Q_F)$$

Ecuación 11

Y reagrupando, queda en

$$W = -T_C \Delta S_T + Q_F (T_C / T_F - 1)$$

Ecuación 12

Si suponemos el caso límite en que los procesos son reversibles, es decir, $\Delta S_T = 0$, entonces

Ecuación 12 se reduce a

$$W = Q_F (T_C / T_F - 1)$$

Ecuación 13

Entonces, para que el mecanismo realice trabajo, $W > 0$, es necesario que

$$Q_F > 0$$

$$T_C > T_F$$

Es decir, es necesario que se disipe una cierta cantidad de calor al depósito externo (entorno) y que la temperatura del depósito interno (fuente de calor) sea superior a la temperatura del depósito externo, incluso en la condición límite de reversibilidad. Es imposible convertir completamente el calor en trabajo, ya que una parte del calor utilizado debe ser disipado (perdido) al exterior, sin posibilidad de realizar trabajo con él.

Esta observación con respecto a los motores térmicos es tan básica que su enunciado formal, a menudo, se considera como una expresión alterna de la segunda ley de la termodinámica: Es imposible construir un motor que, al funcionar en ciclos, no produzca

un efecto que no sea la extracción de calor de un depósito y la realización de una cantidad equivalente de trabajo. Este es el enunciado Kelvin/Planck de la segunda ley. Todos los motores térmicos deben disipar parte del calor que absorben y los recipientes naturales de calor disponibles para absorber este calor disipado son la atmósfera, los lagos, ríos y océanos. Las temperaturas de éstos son del orden de 300 K.

Los recipientes de calor prácticos a T_C son objetos como por ejemplo: hornos y los reactores nucleares mantenidos a altas temperaturas mediante la combustión de energéticos fósiles y la fisión de elementos radiactivos, respectivamente. Los componentes básicos de todas las plantas energéticas estacionarias que generan electricidad son: una fuente de calor, a alta temperatura, un motor térmico, los cuales pueden ser altamente complejos y un sumidero para la descarga del calor residual, o sea el medio ambiente. Esta descarga de calor residual hacia el medio ambiente o contaminación térmica, es una consecuencia inevitable de la segunda ley de la termodinámica.

Eficiencia térmica

La *eficiencia térmica* de cualquier motor calórico se define arbitrariamente como:

$$\eta = \frac{|W|}{|Q_C|}$$

Ecuación 13

Es decir, la fracción de calor absorbido que se obtiene como trabajo producido la eficiencia térmica de un motor de Carnot está dada por

$$\eta = 1 - \frac{T_F}{T_C}$$

Ecuación 14

Entalpía

La más simple de tales funciones es la entalpía H , explícitamente definida para cualquier sistema mediante la expresión matemática

$$H = U + PV$$

Ecuación 15

En vista de que la energía interna U y el producto PV tienen unidades de energía, H también tiene unidades de energía. Por otra parte, como U , P y V son todas propiedades del

sistema, H también lo debe ser... Las propiedades H , U y V son *extensivas*; esto es, son directamente proporcionales a la masa del sistema considerado. La temperatura T y la presión P son *intensivas*, independientes de la extensión del sistema.

3.1.4 Teoría cinética de los gases.

La termodinámica se ocupa solo de variables microscópicas, como la presión, la temperatura y el volumen. Sus leyes básicas, expresadas en términos de dichas cantidades, no se ocupan para nada de que la materia esta formada por átomos. Sin embargo, la mecánica estadística, que estudia las mismas áreas de la ciencia que la termodinámica, presupone la existencia de los átomos. Sus leyes básicas son las leyes de la mecánica, las que se aplican en los átomos que forman el sistema.

Así, aplicamos las leyes de la mecánica estadísticamente con lo que nos damos cuenta de que podemos expresar todas las variables termodinámicas como promedios adecuados de las propiedades atómicas. Por ejemplo, la presión ejercida por un gas sobre las paredes de un recipiente es la rapidez media, por unidad de área, a la que los átomos de gas transmiten ímpetu a la pared, mientras chocan con ella. En realidad el número de átomos en un sistema microscópico, casi siempre es tan grande, que estos promedios definen perfectamente las cantidades.

Leyes de los gases:

Todas las masas gaseosas experimentan variaciones de presión, volumen y temperatura que se rigen por las siguientes leyes:

Primera ley (Boyle-Mariotte)

Los volúmenes ocupados por una misma masa gaseosa conservándose su temperatura constante, son inversamente proporcionales a la presión que soporta.

$$V \cdot P = V' \cdot P'$$

Ecuación 15

En donde:

V = volumen inicial

V' =volumen final

P = presión inicial

P' =Presión final

Segunda ley (Gay-Lussac).

Cuando se calienta un gas, el volumen aumenta $1/273$ parte de su valor primitivo, siempre que la presión no varíe. Temperatura y volumen son directamente proporcionales.

$$V \cdot T' = V' T$$

Ecuación 16

En donde

V= volumen inicial

V'=volumen final

T= temperatura inicial

T'=temperatura final

Tercera ley (Charles)

La presión ejercida por una masa gaseosa es directamente proporcional a su temperatura absoluta, siempre que el volumen sea constante.

$$P \cdot T' = P' T$$

Ecuación 17

En donde:

P= presión inicial

P'=presión final

T= temperatura inicial

T'=temperatura final

Ecuación general del estado gaseoso.

En una masa gaseosa los volúmenes y las presiones son directamente proporcionales a sus temperaturas absolutas e inversamente proporcionales entre sí.

	Formula	Interpretación

Despejando presión	$P \cdot V \cdot T' = P' \cdot V' \cdot T \text{ (a)}$ $\frac{P \cdot V}{T} = \frac{P' \cdot V'}{T'} \text{ (b)}$ $P = \frac{P' \cdot V' \cdot T}{V \cdot T'} \text{ (c)}$ $P' = \frac{P \cdot V \cdot T}{V' \cdot T'} \text{ (d)}$	P=presión inicial P'=presión final V=volumen final V'=volumen final T'=temperatura final T=temperatura final
--------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

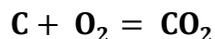
3.1.5 Poder calorífico

El poder calorífico de un combustible es la cantidad de energía desprendida en la reacción de combustión, referida a la unidad de masa de combustible.

Es la cantidad de calor que entrega un kilogramo, o un metro cúbico, de combustible al oxidarse en forma completa.

El poder calorífico expresa la energía máxima que puede liberar la unión química entre un combustible y el comburente y es igual a la energía que mantenía unidos los átomos en las moléculas de combustible, menos las energías utilizadas en la formación de nuevas moléculas en las materias (generalmente gases) formadas en la combustión.

Es decir cuando el carbono pase a anhídrido carbónico



UNIDADES

(Kcal/Kg), (Kcal/m³); (BTU/lb); (BTU/pie³)

La magnitud del poder calorífico puede variar según como se mida. Según la forma de medir se utiliza la expresión poder calorífico superior (PCS) y poder calorífico inferior (PCI).

Poder calorífico superior (PCS)

Es la cantidad total de calor desprendido en la combustión completa de 1 Kg de combustible cuando el vapor de agua originado en la combustión está condensado y se contabiliza, por consiguiente, el calor desprendido en este cambio de fase.

El poder calorífico superior se define suponiendo que todos los elementos de la combustión (combustible y aire) son tomados a 0 °C y los productos (gases de combustión) son llevados también a 0 °C después de la combustión, por lo que el vapor de agua se encontrará totalmente condensado.

Vapor de agua que proviene de:

- a) la humedad propia del combustible y
- b) el agua formada por la combustión del hidrógeno del combustible.

De esta manera al condensar el vapor de agua contenido en los gases de combustión tendremos un aporte de calor de:

597 Kcal / kg vapor de agua condensado

Poder calorífico inferior (PCI):

Es la cantidad total de calor desprendido en la combustión completa de 1 kg de combustible sin contar la parte correspondiente al calor latente del vapor de agua de la combustión, ya que no se produce cambio de fase, y se expulsa como vapor.

El poder calorífico inferior considera que el vapor de agua contenido en los gases de la combustión no condensa.

Por lo tanto no hay aporte adicional de calor por condensación del vapor de agua.

Solo se dispondrá del calor de oxidación del combustible, al cual por definición se denomina:

Poder Calorífico Inferior del Combustible

3.2 CAPÍTULO II: VENTILACIÓN

La ventilación puede definirse como la técnica de sustituir el aire ambiente interior de un recinto, el cual se considera indeseable por falta de temperatura adecuada, pureza o humedad, por otro que aporta una mejora. Esto es logrado mediante un sistema de

inyección de aire y otro de extracción, provocando a su paso un barrido o flujo de aire constante, el cual se llevará todas las partículas contaminadas o no deseadas.

Entre las funciones básicas para los seres vivos, humanos o animales, la ventilación provee de oxígeno para su respiración. También puede proporcionar condiciones de confort afectando la temperatura del aire, la velocidad, la renovación, la humedad y/o la dilución de olores indeseables. Entre las funciones básicas para las máquinas, instalaciones o procesos industriales, la ventilación permite controlar el calor, la transportación neumática de productos, la toxicidad del aire o el riesgo potencial de explosión.

3.2.1 Ventilador.

Un ventilador es una máquina rotativa que pone el aire, o un gas, en movimiento. Se puede definir también como una turbo máquina que transmite energía para generar la presión necesaria para mantener un flujo continuo de aire.

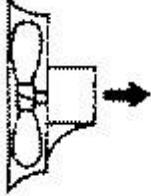
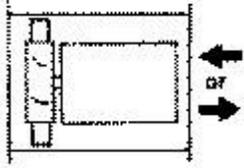
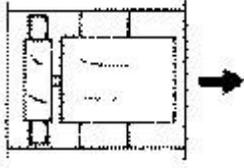
Dentro de una clasificación general de máquinas, los ventiladores son turbo máquinas hidráulicas, tipo generador, para gases.

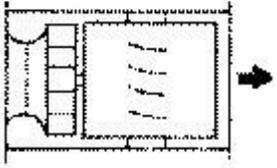
Un ventilador consta en esencia de un motor de accionamiento, generalmente eléctrico, con los dispositivos de control propios de los mismos: arranque, regulación de velocidad, conmutación de polaridad, etc. y un propulsor giratorio en contacto con el aire, al que le transmite energía. Este propulsor adopta la forma de rodete con álabes, en el caso del tipo centrífugo, o de una hélice con palas de silueta y en número diverso, en el caso de los axiales.

Tipos de ventiladores

Ventiladores axiales:

Son aquellos en los cuales el flujo de aire sigue la dirección del eje del mismo. Se suelen llamar helicoidales, pues el flujo a la salida tiene una trayectoria con esa forma. En líneas generales son aptos para mover grandes caudales a bajas presiones. Con velocidades periféricas medianamente altas son en general ruidosos. Suelen sub-clasificarse, por la forma de su envolvente, de la siguiente manera:

VENTILADOR	DESCRIPCION	APLICACIÓN
 <p data-bbox="305 632 496 659">HELICOIDAL</p>	<p data-bbox="605 281 954 695">Ventiladores aptos para mover grandes caudales de aire con bajas presiones. Son de bajo rendimiento. La transferencia de energía se produce mayoritariamente en forma de presión dinámica.</p>	<p data-bbox="989 281 1338 583">Se aplica en circulación y extracción de aire en naves industriales. Se instalan en pared sin ningún conducto. Utilizados con objetivo de renovación de aire.</p>
 <p data-bbox="354 1066 451 1094">AXIAL</p>	<p data-bbox="605 806 954 1163">Tienen rendimiento algo superior al anterior y es capaz de desarrollar una presión estática mayor. Por su construcción es apto para intercalar en conductos.</p>	<p data-bbox="989 806 1338 1331">Se utiliza en instalaciones de ventilación, calefacción y aire acondicionado que requieran altos caudales con presión media a baja. También se utiliza en algunos sistemas industriales como cabinas de pintura y extracciones localizadas de humos.</p>
 <p data-bbox="354 1738 451 1766">AXIAL</p>	<p data-bbox="605 1388 954 1745">Con diseños de palas AIRFOIL, permiten obtener presiones medias y altas con buenos rendimientos. Las palas pueden ser fijas o de ángulo ajustable</p>	<p data-bbox="989 1388 1338 1856">Tiene aplicaciones similares a los TUBEAXIAL, pero con la ventaja de tener un flujo más uniforme y la posibilidad de obtener presiones mayores. Para una determinada prestación es relativamente más</p>

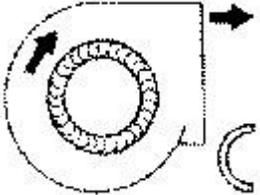
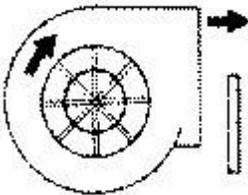
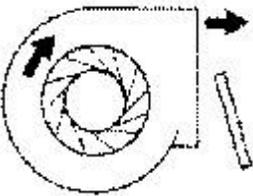
		pequeño que el ventilador centrifugo equiparable.
 <p>CENTRIFUGO</p>	Se trata de un ventilador con rotor centrifugo pero de flujo axial. Es decir reúne las ventajas del ventilador centrifugo y la facilidad de montaje de un axial con el consiguiente ahorro de espacio.	Las mismas aplicaciones que el ventilador VANEAXIAL.

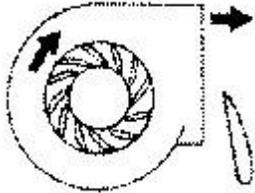
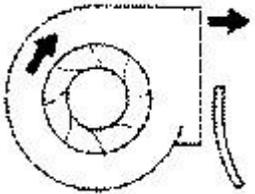
Ventiladores centrífugos.

En los ventiladores centrífugos la trayectoria del fluido sigue la dirección del eje del rodete a la entrada y perpendicular al mismo a la salida. Si el aire a la salida se recoge perimetralmente en una voluta, entonces se dice que el ventilador es de voluta.

Son aquellos en los cuales el flujo de aire cambia su dirección, en un ángulo de 90°, entre la entrada y salida. Se suelen sub-clasificar, según la forma de las palas o álabes del rotor, de la siguiente manera:

VENTILADOR	DESCRIPCION	APLICACION
------------	-------------	------------

 <p style="text-align: center;">CURVADAS HACIA ADELANTE</p>	<p>Rotor con palas curvadas hacia adelante, apto para caudales altos y bajas presiones. No es auto limitante de potencia. Para un mismo caudal y un mismo diámetro de rotor gira a menos vueltas con menor nivel sonoro.</p>	<p>Se utiliza en instalaciones de ventilación, calefacción y aire acondicionado de baja presión.</p>
 <p style="text-align: center;">PALAS RADIALES</p>	<p>Rotor de palas radiales. Es el diseño más sencillo y de menor rendimiento. Es muy resistente mecánicamente, y el rodete puede ser reparado con facilidad. El diseño le permite ser auto limpiante. La potencia aumenta de forma continua al aumentar el caudal.</p>	<p>Empleado básicamente para instalaciones industriales de manipulación de materiales. Se le puede aplicar recubrimientos especiales anti-desgaste. También se emplea en aplicaciones industriales de alta presión.</p>
 <p style="text-align: center;">INCLINADAS HACIA ATRAS</p>	<p>Rotor de palas planas o curvadas inclinadas hacia atrás. Es de alto rendimiento y auto limitador de potencia. Puede girar a velocidades altas.</p>	<p>Se emplea para ventilación, calefacción y aire acondicionado. También puede ser usado en aplicaciones industriales, con ambientes corrosivos y/o bajos contenidos de polvo.</p>

 <p style="text-align: center;">CENTRIFUGO</p>	<p>Similar al anterior pero con palas de perfil aerodinámico. Es el de mayor rendimiento dentro de los ventiladores centrífugos. Es auto limitante de potencia.</p>	<p>Es utilizado generalmente para aplicaciones en sistemas de HVAC y aplicaciones industriales con aire limpio. Con construcciones especiales puede ser utilizado en aplicaciones con aire sucio.</p>
 <p style="text-align: center;">RADIAL</p>	<p>Rotores de palas curvadas hacia delante con salida radial. Son una variación de los ventiladores radiales pero con mayor rendimiento. Aptos para trabajar con palas anti desgaste. Son auto limpiantes. La potencia aumenta de forma continua al aumento del caudal.</p>	<p>Como los radiales estos ventiladores son aptos para trabajar en aplicaciones industriales con movimiento de materiales abrasivos, pero con un mayor rendimiento.</p>

Definiciones

Caudal del aire: Es el volumen de aire movido por un ventilador en la unidad de tiempo, y es independiente de la densidad del aire.

Presión estática (Pst): Es la fuerza por unidad de superficie ejercida en todas las direcciones y sentidos, independientemente de la dirección y sentido de la velocidad del aire.

Presión dinámica (Pd): Es la presión resultante de la transformación integral de la energía cinética en presión

Viene expresada por:

$$Pd = \frac{\rho v^2}{2g} \text{ (mmca)}$$

Ecuación 18

Donde:

$$\rho = \text{densidad del aire en } \frac{Kg}{m^3}$$

$$g = \text{aceleracion de la gravedad } (9,81 \frac{m}{s^2})$$

$$v = \text{velocidad del aire en } \frac{m}{s}$$

3.2.2 Flujo másico

El flujo de masa o volumen que pasa a través de un área de sección transversal en un intervalo de tiempo definido se conoce como flujo másico o volumétrico, respectivamente.

Caudal de aire

En dinámica de fluidos, caudal es la cantidad de fluido que pasa por el río en una unidad de tiempo. Normalmente se identifica con el flujo volumétrico o volumen que pasa por un área dada en la unidad de tiempo. Menos frecuentemente, se identifica con el flujo másico o masa que pasa por un área dada en la unidad de tiempo.

El caudal de un río puede calcularse a través de la siguiente fórmula:

$$Q = A\bar{v}$$

Ecuación 19

Donde

- Q = Caudal m^3/s
- A = área m^2
- \bar{v} = velocidad linear promedio. m/s

Dada una sección de área A atravesada por un fluido con velocidad uniforme v , si esta velocidad forma con la perpendicular a la superficie A un ángulo θ , entonces el flujo se calcula como

$$\phi = A \cdot v \cdot \cos\theta$$

Ecuación 20

En el caso particular de que el flujo sea perpendicular al área A (por tanto $\theta = 0$ y $\cos\theta = 1$) entonces el flujo vale

$$\phi = A \cdot v$$

Ecuación 21

En física e ingeniería, caudal es la cantidad de fluido que circula por unidad de tiempo en determinado sistema o elemento. Se expresa en la unidad de volumen dividida por la unidad de tiempo (e.g.: m^3/s).

En el caso de cuencas de ríos o arroyos, los caudales generalmente se expresan en metros cúbicos por segundo o miles de metros cúbicos por segundo. Son variables en tiempo y en el espacio y esta evolución se puede representar con los denominados hidrogramas.

Caudal instantáneo

Como su nombre lo dice, es el caudal que se determina en un instante determinado. Su determinación se hace en forma indirecta, determinado el nivel del agua en el río (N_0), e interpolando el caudal en la curva calibrada de la sección determinada precedentemente. Se expresa en m^3/s .

$$Q_0 = F_q(N_0)$$

Ecuación 22

Caudal medio diario

Es la media de los caudales instantáneos medidos a lo largo del día. Si la sección de control es del tipo limnométrico, normalmente se hacen dos lecturas diarias de nivel, cada 12 horas.

$$Q_{md} = \frac{F_q (N_1) + F_q (N_1)}{2}$$

Ecuación 23

3.2.3 Calculo flujo másico

Es la masa que en la unidad de tiempo atraviesa una sección de control.

Ecuación: masa/ tiempo= M1 = M2 = M3 = constante.

Luego la ecuación se tiene que convertir en términos de cinemática:

$$\rho * Vol1/ t= \rho Vol2/t$$

Ecuación 24

Donde

Vol1= volumen que entra.

Vol2= volumen que sale.

Vol. del cilindro= A1* L1

$\rho = m/Vol.$

$$A1*L1/t= A2*L2/t$$

$$Vol= A*L$$

$$Vol/t= Q \text{ (caudal)}$$

3.3 CAPÍTULO III: MECÁNICA DE FLUIDOS

3.3.1 Introducción al estudio de los fluidos

Definición de Fluido

Un fluido es una sustancia que suele deformarse continuamente cuando se somete a un esfuerzo cortante; es capaz de fluir debido a la fuerza de cohesión de las moléculas de dicha sustancia.

Por ejemplo, una sustancia plástica se deformará cierta cantidad proporcional a la fuerza pero no continuamente cuando el esfuerzo aplicado se encuentra por debajo de su esfuerzo cortante de fluencia. Un sólido puede ser un fluido si es llevado a estado líquido, ya que tiene sus moléculas muy unidas.

Así los fluidos pueden dividirse en líquidos y gases; lo que los diferencia es que los líquidos son prácticamente incompresibles y los gases sí son compresibles, y además los líquidos ocupan un volumen definido y tienen superficies libres, mientras que una masa de gas se expande hasta ocupar todas las partes del recipiente que lo contenga.

Los fluidos reaccionan de una manera característica a las fuerzas. Si se compara lo que ocurre a un sólido y a un fluido cuando son sometidos a un esfuerzo de corte o tangencial se tienen reacciones características que se pueden verificar experimentalmente y que permiten diferenciarlos.

Con base al comportamiento que desarrollan los fluidos se definen de la siguiente manera: “Fluido es una sustancia que se deforma continuamente, o sea se escurre, cuando está sometido a un esfuerzo de corte o tangencial”. De esta definición se desprende que un fluido en reposo no soporta ningún esfuerzo de corte.

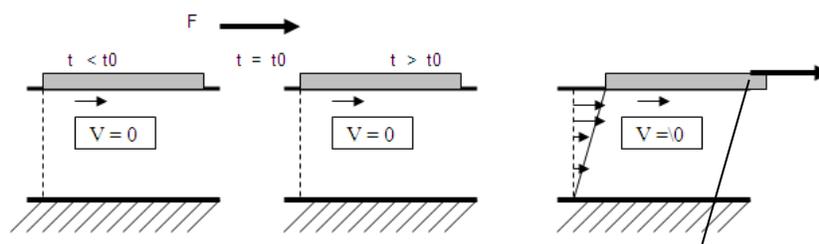


Fig. 4-Comportamiento de un fluido sometido a una fuerza de corte o tangencial.

Sustancia Pura

Una sustancia pura debe ser químicamente homogénea y además estable en el tiempo, es decir, tener única identidad química y no descomponerse. Ejemplo de sustancias puras son el agua (H_2O), aire (gases), etc.

Teoría cinética de los gases.

La termodinámica se ocupa solo de variables microscópicas, como la presión, la temperatura y el volumen. Sus leyes básicas, expresadas en términos de dichas cantidades, no se ocupan para nada de que la materia está formada por átomos. Sin embargo, la mecánica estadística, que estudia las mismas áreas de la ciencia que la termodinámica, presupone la existencia de los átomos. Sus leyes básicas son las leyes de la mecánica, las que se aplican en los átomos que forman el sistema.

Así, aplicamos las leyes de la mecánica estadísticamente con lo que nos damos cuenta de que podemos expresar todas las variables termodinámicas como promedios adecuados de las propiedades atómicas. Por ejemplo, la presión ejercida por un gas sobre las paredes de un recipiente es la rapidez media, por unidad de área, a la que los átomos de gas transmiten ímpetu a la pared, mientras chocan con ella. En realidad el número de átomos en un sistema microscópico, casi siempre es tan grande, que estos promedios definen perfectamente las cantidades.

Gas ideal

Desde el punto de vista microscópico, definimos a un gas ideal haciendo las siguientes suposiciones, con lo que nuestra tarea será la de aplicar las leyes de la mecánica clásica, estadísticamente, a los átomos del gas y demostrar que nuestra definición microscópica es consecuente con la definición macroscópica de la sección precedente:

- 1.- Un gas está formado por partículas llamadas moléculas. Dependiendo del gas, cada molécula está formada por un átomo o un grupo de átomos. Si el gas es un elemento o un compuesto en su estado estable, consideramos que todas sus moléculas son idénticas.
- 2.- Las moléculas se encuentran animadas de movimiento aleatorio y obedecen las leyes de Newton del movimiento. Las moléculas se mueven en todas direcciones y a velocidades diferentes. Al calcular las propiedades del movimiento suponemos que la mecánica newtoniana se puede aplicar en el nivel microscópico. Como para todas nuestras suposiciones, esta mantendrá o desechará, dependiendo de si los hechos experimentales indican o no que nuestras predicciones son correctas.
- 3.- El número total de moléculas es grande. La dirección y la rapidez del movimiento de cualquiera de las moléculas pueden cambiar bruscamente en los choques con las paredes o con otras moléculas. Cualquiera de las moléculas en particular, seguirá una trayectoria de zigzag, debido a dichos choques. Sin embargo, como hay muchas moléculas, suponemos

que el gran número de choques resultante mantiene una distribución total de las velocidades moleculares con un movimiento promedio aleatorio.

4.- El volumen de las moléculas es una fracción despreciablemente pequeña del volumen ocupado por el gas. Aunque hay muchas moléculas, son extremadamente pequeñas. Sabemos que el volumen ocupado por una gas se puede cambiar en un margen muy amplio, con poca dificultad y que, cuando un gas se condensa, el volumen ocupado por el líquido puede ser miles de veces menor que la del gas se condensa, el volumen ocupado por el líquido puede ser miles de veces menor que el del gas. De aquí que nuestra suposición es posible.

5.- No actúan fuerzas apreciables sobre las moléculas, excepto durante los choques. En el grado de que esto sea cierto, una molécula se moverá con velocidad uniforme entre los choques. Como hemos supuesto que las moléculas son tan pequeñas, la distancia media entre ellas es grande en comparación con el tamaño de una de las moléculas. De aquí que suponemos que el alcance de las fuerzas moleculares es comparable al tamaño molecular.

6.- Los choques son elásticos y de duración despreciable. En los choques entre las moléculas con las paredes del recipiente se conserva el ímpetu y (suponemos) la energía cinética. Debido a que el tiempo de choque es despreciable comparado con el tiempo que transcurre entre los choques de moléculas, la energía cinética que se convierte en energía potencial durante el choque, queda disponible de nuevo como energía cinética, después de un tiempo tan corto, que podemos ignorar este cambio por completo.

3.3.2 Propiedades físicas del los fluidos

Los fluidos, como todos los materiales, tienen propiedades físicas que permiten caracterizar y cuantificar su comportamiento así como distinguirlos de otros. Algunas de estas propiedades son exclusivas de los fluidos y otras son típicas de todas las sustancias. Características como la viscosidad, tensión superficial y presión de vapor solo se pueden definir en los líquidos y gases. Sin embargo la masa específica, el peso específico y la densidad son atributos de cualquier materia.

Masa específica, peso específico y densidad.

Se denomina masa específica a la cantidad de materia por unidad de volumen de una sustancia. Se designa por P

El peso específico corresponde a la fuerza con que la tierra atrae a una unidad de volumen. Se designa por β . La masa y el peso específico están relacionados por:

$$\beta = gP$$

Donde g representa la intensidad del campo gravitacional.

Se denomina densidad a la relación que exista entre la masa específica de una sustancia cualquiera y una sustancia de referencia. Para los líquidos se utiliza la masa específica del agua a 4°C como referencia, que corresponde a $1\text{g}/\text{cm}^3$ y para los gases se utiliza al aire con masa específica a 20°C y $1,013$ bar de presión es $1,204\text{Kg}/\text{m}^3$.

Viscosidad.

La viscosidad es una propiedad distintiva de los fluidos. Está ligada a la resistencia que opone un fluido a deformarse continuamente cuando se le somete a un esfuerzo de corte. Esta propiedad es utilizada para distinguir el comportamiento entre fluidos y sólidos. Además los fluidos pueden ser en general clasificados de acuerdo a la relación que exista entre el esfuerzo de corte aplicado y la velocidad de deformación.

Supóngase que se tiene un fluido entre dos placas paralelas separadas a una distancia pequeña entre ellas, una de las cuales se mueve con respecto de la otra. Esto es lo que ocurre aproximadamente en un descanso lubricado. Para que la placa superior se mantenga en movimiento con respecto a la inferior, con una diferencia de velocidades V , es necesario aplicar una fuerza F , que por unidad se traduce en un esfuerzo de corte, $\eta = F / A$, siendo A el área de la placa en contacto con el fluido. Se puede constatar además que el fluido en contacto con la placa inferior, que está en reposo, se mantiene adherido a ella y por lo tanto no se mueve.

Por otra parte, el fluido en contacto con la placa superior se mueve a la misma velocidad que ella. Si el espesor del fluido entre ambas placas es pequeño, se puede suponer que la variación de velocidades en su interior es lineal, de modo que se mantiene la proporción:

Compresibilidad.

La compresibilidad representa la relación entre los cambios de volumen y los cambios de presión a que está sometido un fluido. Las variaciones de volumen pueden relacionarse directamente con variaciones de la masa específica si la cantidad de masa permanece constante. En general se sabe que en los fluidos la masa específica depende tanto de la presión como de la temperatura de acuerdo a la ecuación de estado.

Presión de vapor.

Los fluidos en fase líquida o gaseosa dependiendo de las condiciones en que se encuentren. Las sustancias puras pueden pasar por las cuatro fases, desde sólido a plasma, según las condiciones de presión y temperatura a que estén sometidas. Se acostumbra designar líquidos a aquellos materiales que bajo las condiciones normales de presión y temperatura en que se encuentran en la naturaleza están en esa fase.

Cuando un líquido se le disminuye la presión a la que está sometido hasta llegar a un nivel en el que comienza a bullir, se dice que alcanzado la presión de vapor. Esta presión depende de la temperatura. Así por ejemplo, para el agua a 100°C, la presión es de aproximadamente de 1 bar, que equivale a una atmósfera normal. La presión de vapor y la temperatura de ebullición están relacionadas y definen una línea que separa y el líquido de una misma sustancia en un gráfico de presión y temperatura.

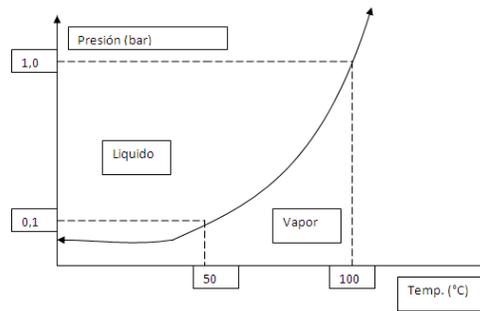


Fig. 5. Presión de vapor y temperatura de ebullición para el caso del agua.

Tensión superficial.

Se ha observado que entre la interface de dos fluidos que no se mezclan se comportan como si fuera una membrana tensa. La tensión superficial es la fuerza que se requiere para mantener en equilibrio una longitud unitaria de esta película. El valor de ella dependerá de los fluidos en contacto y de la temperatura. Los efectos de la superficial solo apreciables en fenómenos de pequeñas dimensiones, como es el caso de tubos capilares, burbujas, gotas y situaciones similares.

Según Bonifacio Fernández L. Las propiedades de los fluidos se dividen en extensivas y mecánicas; de las cuales se derivan otras tomando en cuenta diversos factores.

Valores típicos de las propiedades de fluidos más usuales Tabla 2

3.3.3 Resistencia de los fluidos

Régimen Laminar

El tránsito del régimen laminar al turbulento o del régimen turbulento al laminar, se hace a través del régimen crítico, que es un estado intermedio del movimiento de las partículas dentro de una tubería, asociado a un valor también intermedio del número de Reynolds (valores de Re comprendidos entre el 2.000 y el 4.000). El fluido se desplaza ordenadamente, Fig.1.4, en capas anulares concéntricas que deslizan unas sobre otras con velocidad decreciente desde el eje hasta la pared de la tubería.

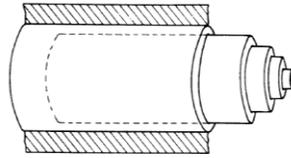


Figura 6.- Fluido en régimen laminar.

Régimen Turbulento

El fluido tiene un régimen turbulento, Fig.1.5, cuando el número de Reynolds es alto, ya que la tendencia al movimiento caótico se incrementa ostensiblemente, las fuerzas de la viscosidad pierden la capacidad para orientar el movimiento de las partículas y estas describen trayectoria erráticas que en términos generales mantienen rumbos predecibles ya que las partículas no dejan de encontrarse encerradas dentro de una tubería, donde el fluido se desplaza en un determinado sentido.

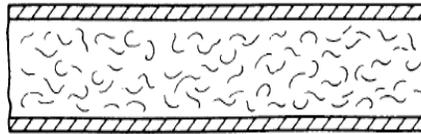


Figura 7.- Fluido en régimen turbulento

3.4 CAPÍTULO IV: SECADO DE CAFÉ

3.4.1 Café

Café, nombre común de un género de árboles de la familia de las Rubiáceas y también de sus semillas y de la bebida que con ellas se prepara. De la treintena de especies que comprende el género Coffea sólo son importantes tres: arabica, canephora y liberica. El fruto se desarrolla en el curso de los seis o siete meses siguientes a la aparición de la flor; cambia desde el verde claro al rojo y, cuando está totalmente maduro y listo para la recolección, al carmesí. El fruto maduro, que se parece a la cereza, se forma en racimos unidos a las ramas por tallos muy cortos; suele encerrar dos semillas rodeadas de una pulpa dulce.

El fruto del cafeto tiene dos semillas cubiertas de pulpa carnosas. El cafeto común, Coffea arabica, es una de las dos especies con importancia económica de la treintena de plantas productoras de café.

Tipos de café

Café arábica

Originaria de Abyssinia, actualmente Etiopía, la arábica es una de las especies la más antigua. Crece en mesetas o en montañas dentro de las regiones situadas entre los 700 y 2,000 metros, dentro de las zonas intertropicales, sobretodo en Latinoamérica, América Central y en algunos países de África. Relativamente frágil, es particularmente sensible a las enfermedades (roña del café). A este tipo de café le gusta un clima tropical (Temperatura óptima entre 17 y 23 grados C).

La arábica representa los $\frac{3}{4}$ de la producción mundial. Es un café apreciado por sus calidades aromáticas y por la finura de su sabor. Las principales variedades tienen nombres exóticos como Moka con un sabor frutal, el Borbón, el maragogype como habas gigantes (es el doble de tamaño de un haba normal), tiene un sabor más delicado y aroma más intenso. Entre los países productores de café arábica destacan: Brasil, Camerún, Colombia, Costa Rica, Cuba, Ecuador, Haití, Jamaica, Java, Kenia, México, Perú, Puerto Rico, República Dominicana, Salvador, Tanzania y Venezuela

Café robusta:

El café canéfora robusta fue descubierto en el Congo Belga (actualmente Zaire) a finales del siglo XIX. Crecía en un estado salvaje en los bosques de la zona tropical africana. Hoy en día se cultiva sobretodo en África pero también en India, Indonesia, Madagascar, Brasil y Filipinas. La robusta crece en planicies y le gusta el clima tropical húmedo. La robusta crece con mayor rapidez que la arábica. Más vigorosa que la arábica (de ahí su nombre de "robusta"), resiste mejor a las enfermedades y su rendimiento es más elevado. Sabor más fuerte, suele ser empleado para mezclar con otros cafés. Los países productores más importantes son Costa de Marfil, Angola y Zaire

Clases de cafés:

Se pueden encontrar dos tipos básicos de café, en función del método de tueste: natural y torrefacto.

Café tostado natural:

Se obtiene mediante el tueste de los granos de café por el sistema de “tueste directo” a una temperatura entre los 200 y 220° C y en constante movimiento. El tiempo irá en función del grado de tueste que le queramos dar al café.

Café tostado torrefacto:

Se obtiene mediante el tueste de granos de café con azúcar. Obtenemos un color más oscuro, más cuerpo y con un sabor más fuerte. Si el tiempo y temperatura de torrefacción han sido las adecuadas, el grano no pierde sus propiedades, pero si han sido excesivas, el café adquiere un sabor amargo, debido al exceso e quemado del azúcar

El café que se consume habitualmente es una mezcla de ambos tipos de café, puesto que la utilización exclusiva de café natural produciría una infusión poco densa y con un color claro, y al mezclarlo con café torrefacto obtenemos más cuerpo y color. No existen normas en cuanto a la proporción de mezcla.

Otras clases de café son:

Café soluble, su aroma y sabor difieren muchísimo del café propiamente dicho, pero está muy difundido por la facilidad de su preparación. Café descafeinado, tipo de café, soluble o no, al cual le ha sido reducido el contenido en cafeína en un 97%.

3.4.2 Secado de café

Debido a su alto contenido de humedad en la cosecha, 60 a 70%, las cerezas de café maduras no fluyen fácilmente en equipos manuales (chorros por gravedad, depósitos de alimentación, elevadores de cangilones, barredores) y tampoco en los secadores mecánicos convencionales. Secadores rotatorios tipo tambor son una alternativa, pero ellos generalmente son criticados por poseer una baja eficiencia. Como resultado de esto, el proceso típico de secado de café consiste en dos fases diferentes de secado. En la primera

fase, se extienden cerezas de café enteras en terrenos pavimentados, logrando un secado fresco permitido bajo el sol hasta lograr un contenido de humedad entre 30 a 35%., considerando que en la segunda fase, el café se seca en secadores mecánicos de alta temperatura o secadores de camada fija hasta por debajo de 13%. de contenido de humedad. Si el clima es tal que el calor de la luz del sol está disponible durante la época de la cosecha, el proceso de secado puede realizarse completamente al aire libre. En este caso, las cerezas se extienden en los secadores de patio o terrazas hasta alcanzar un contenido de humedad de aproximadamente 13% en una sola operación. Otra alternativa es el secado completo de cerezas de café enteras en secadores de camada fija. El principal inconveniente utilizando secadores mecánicos ha sido que su diseño es para secar otros productos y su relativo alto costo. A pesar de los recientes esfuerzos para cambiar esta situación, la mayoría de los secadores disponibles en el comercio son todavía ineficientes y están lejos de ser usados en operaciones a gran escala.

Algunos métodos de secado innovadores aplicados para cereales y oleaginosas están siendo introducidos, facilitando el secado de café en los últimos años, en un esfuerzo para incrementar la capacidad de secado y la eficiencia energética de las instalaciones convencionales para el secado de café y al mismo tiempo para mantener la calidad del mismo. Estos métodos incluyen secado con aireación, secado con inversión del flujo de aire (contra-corriente) y secado combinado. Varios otros sistemas de secado de alta temperatura, flujo continuo que han sido tradicionalmente utilizados en USA ó Europa para secar granos cereales a niveles seguros de humedad para largos periodos de almacenamiento, se han adaptado para el secado de café natural, lavado y café sin despulpar. Estos métodos incluyen flujo cruzado, flujo con-corriente, flujo contra-corriente y secado con flujo combinado.

Clases y Tipos de Secado de Café

Secado al sol

El café natural fresco generalmente tiene una amplia gama de contenido de humedad (25% - 70%). Al llegar a las áreas donde se efectúa el proceso de secado, este es sometido a un proceso de separación por flotación en agua, para separar cerezas de maduras (suaves), de las cerezas verdes y de cerezas parcialmente secas (duras). Estos dos grupos se extienden separadamente en terrazas o patios de secado, usando carretas movidas manualmente, perforadas para el drenaje del agua y provistas de una compuerta localizada en el fondo. La compuerta de la carreta se va abriendo dejando una capa de café de regular espesura en la superficie del patio.

El espesor de la capa de café es aproximadamente de 4 cm iniciando el proceso de secado y puede aumentarse a 10 cm cuando el café está cerca del contenido de humedad final requerido. Durante el día, debe ser usada frecuentemente una herramienta manual que revuelve el café uniformizando su humedad.

Al final de la tarde 15 ó 16 horas, cuando el contenido de humedad se ha bajado para aproximadamente a 30% el café es recogido en montones o surcos orientados a lo largo de la cuesta más alta de la terraza y se cubre con plásticos o lonas. El calor absorbido durante el día es conservado parcialmente durante la noche permitiendo una mejor distribución de la humedad dentro de los frutos. Los montones o surcos son descubiertos en la mañana siguiente y removidos de la posición inicial para permitir secar la superficie húmeda de la terraza ó patio. El café se extiende nuevamente en la terraza y las operaciones ya descritas, son repetidas hasta que el café alcance el nivel deseado de contenido de humedad. El secado al sol de café lavado permite el uso de procedimientos similares a los utilizados en el secado de café natural. La principal diferencia es que la pulpa de café lavado tiene un contenido inicial de humedad muy uniforme y necesita un tercio del tiempo requerido para secar los frutos del café natural o entero.

En el experimento de secado conducido por LACERDA FILHO (1986), las eficiencias de las terrazas o patios de secado, construidas de diferentes materiales (ladrillo, concreto, asfalto y suelo duro) fueron determinadas y evaluadas las calidades del café allí secados. La tabla 3 muestra los resultados del experimento realizado para café natural con 62% de

contenido de humedad inicial. Todos los tratamientos fueron sometidos a las mismas condiciones de secado solar. El producto sometido a secado solar en terrazas de suelos duros compactados, resultó un café de calidad pobre comparado con el secado en patios o terrazas de ladrillo, concreto y asfalto.

El secado de camada fija

Para operaciones en pequeña escala, secar café en camada fija ha sido una de las técnicas utilizadas. Se coloca el café recogido con un amplio rango de contenido de humedad inicial en el secador y el aire caliente pasa a través del café usando un ventilador.

El cargue y descargue generalmente se realiza manualmente. Tradicionalmente como en secadores de flujos cruzados o contra-corrientes, la temperatura del aire debe mantenerse a niveles moderados ($<50^{\circ}\text{C}$) para minimizar secados excesivos en las capas cercanas al lado de la entrada de aire de secado. Generalmente el secado es interrumpido cuando el contenido medio de humedad de la camada entera logra el nivel requerido para un almacenamiento seguro. En este momento el grano ubicado al lado de la salida del aire está todavía con humedad a nivel elevado para almacenamiento adecuado.

Aunque exponiendo al operador a las condiciones severas de la temperatura y humedad del aire, revolviendo el café manualmente todavía es una práctica comúnmente adoptada para separar la zona seca y obtener un producto más uniforme en contenido de humedad. Hasta el momento, existen pocas investigaciones en dispositivos revolvedores de café que involucren determinaciones de la magnitud del daño mecánico al producto.

Sin embargo, la introducción de revolvedores aumenta los costos fijos y operacionales del secador.

SILVA y LACERDA FILHO (1984), diseñaron y construyeron un secador de camada fija para secar el café natural, café lavado y café sin despulpar. El sistema de secado se ha adoptado ampliamente por pequeños y medianos productores y ha sido eventualmente utilizado para secar otros productos agrícolas como frijol y maíz. El secador es de 5.0 m de diámetro y está constituido por una cámara “plenun” de 0.6 m de altura y la sección de secado resultando en un total de 1.2 m. Las paredes consisten en una capa de ladrillo de

0.15 m de espesor cubierto con yeso por ambos lados. La producción de calor ocurre a partir de la combustión directa de madera o carbón como fuente de combustible para el horno.

El sistema es tiene un ciclón donde la ceniza es atrapada y el aire natural se mezcla con los gases producidos pela combustión para obtener la temperatura apropiada del aire de secado. El ciclón es construido de ladrillo y consiste por un cilindro que tiene una altura de 1.2 m y diámetro de 1.0 m. aproximadamente. Los gases mezclados son arrastrados por un ventilador centrífugo para forzar el aire a pasar por la camada de café.

Vías de secado han mostrado de forma consistente que el secador de camada fija es capaz de reducir el contenido de una camada de 0.4 m de espesor de café natural de 60% a 12% en 48 h, desde que la temperatura del aire de secado se mantenga en 50° C y la camada de café se revuelva en intervalos de 2 h.

La cantidad de energía (7,000 kJ kg⁻¹) consumida durante el secado de una camada de 0.4 m de espesor de café natural es aproximadamente 65% mayor que la cantidad consumida durante el secado de café lavado. Estos valores se obtuvieron originalmente para café a 52% de contenido de humedad inicial y seguidamente secado a aproximadamente 14% con un flujo de aire de secado de 12 m³ min⁻¹ m⁻², temperatura del aire de secado de 60°C, y revolviendo el café con intervalos de cada 3 h. El rendimiento del Secador aumenta de 9.8 (café natural) a 18.7 kg h⁻¹ m⁻² (café lavado) con las mismas condiciones de secado.

Secador contra-corriente

SILVA (1991), describió el comportamiento de un secador contra-corriente intermitente de una sola fase, usado para secar café natural de 30% bajando hasta 12% de contenido de humedad. La tabla 4 resume la evaluación del comportamiento del secado usando un flujo de aire de 18.5 m³ min⁻¹ m⁻² con temperaturas 60, 80 y 100°C. A pesar del uso de temperaturas del aire de secado considerablemente más altas comparadas con secadores convencionales de camada fija, ninguna deterioración de calidad se observó en el café.

Secador de flujo con-corriente

OSORIO (1982), reportó en un secador de flujo con-corriente de una fase para secar café natural con un contenido inicial de humedad inicial de 25% a 11% en 7.5, 6.0, y 5.0 horas para las temperaturas de secado de 80, 100, y 120°C, con requerimientos energéticos específicos de 5.700, 4.870, y 4.760 kJ kg⁻¹, respectivamente. El secador, con una altura eficaz de 4.0 m, es capaz de mantener aproximadamente 2,300 kg de café a 25% de contenido de humedad, y opera con un flujo de aire de 27 m³ min⁻¹ m⁻².

El grano fluye por acción de la gravedad a un depósito de almacenamiento de 1.5 m, entra en una cámara de secado de 0,7 m y una sección de pre-enfriamiento de 1.8 m altura. El barredor localizado en el fondo del secador garantiza una velocidad al café de 3.5 m h⁻¹, para que el tiempo de permanencia del mismo en la sección de secado sea de 0,2 h. El dispositivo de descarga retira el café parcialmente seco de la zona de pre-enfriamiento y lo lleva de vuelta hacia la parte superior del depósito del secador.

Aunque usando temperaturas más altas que las que ellos encontraron en los secadores de camada fija, ninguna deterioración de calidad en la bebida preparada de café se observó. Debe recordarse que debido al efecto de evaporación refrescante a la entrada del secador, el café no alcanza la temperatura del aire de secado.

En un esfuerzo por reducir el consumo específico de energía y mejorar la eficacia durante el secado de café natural. PINTO (1993), propuso un nuevo secador que combina los métodos contra-corriente con el de flujo con-corriente en fases separadas, en un solo secador. La entrada de aire seco se localiza en la mitad de la columna de café. Secando en la primera fase con el concepto de secado de flujo contra-corriente y entonces el café fluye directamente a la segunda fase donde será secado con un secador de flujo con-corriente. El secador se ajusta a un depósito de alimentación de 60° de inclinación entregando el café a un punto central debajo de la sección pré-enfriada, de donde el café es entregado al foso del elevador. Las dimensiones verticales de las secciones de secado de flujo contracorriente y flujo con-corriente son 1.1 m, y el secador está diseñado para una capacidad de 4,500 kg de café natural en 30% de contenido de humedad. La velocidad de café dentro del secador es 1.44 m h⁻¹, para que gaste aproximadamente 0.8 h en atravesar las secciones de secado en un paso.

Tabla 5 muestra los resultados de una evaluación del comportamiento de un secador combinado de flujo contra-corriente y con-corriente experimental que usa temperaturas de aire de secado de 80, 100 y 120°C, con un flujo de aire de 20 m³ min⁻¹ m⁻².

La productividad de (kg h⁻¹) está basada en una reducción de 30% a 12% de contenido de humedad. Una comparación de los resultados presentados en la Tabla 5 muestran que el tiempo total de secado y el consumo específico de energía disminuyó 44% y 6.4%, respectivamente, mientras la capacidad de secado aumentó en 80%, cuando la temperatura se aumentó de 80 a 120°C.

Seca-aireación

El proceso de seca aireación es un método de secado para granos que involucra secado a alta temperatura y aireación del producto, es uno de los métodos de secado innovadores que se han adaptado a los sistemas de secado de café. Usando el proceso de seca aireación el contenido de humedad del café existente en el secador debe estar aproximadamente dos puntos porcentuales por encima que el nivel deseado para almacenamiento seguro. El café caliente es llevado a un depósito donde este permanece sin flujo de aire por no menos de 4h. Entonces, se transfiere el café a otro depósito donde se refrescará con proporciones bajas de flujo de aire.

Durante la aireación o resfriamiento, ocurre el secado complementario o sea, el remanente de dos puntos porcentuales en contenido de humedad es removido. La seca aireación proporciona tres ventajas sobre los métodos tradicionales de secado: aumento de la capacidad del secador, reducción del consumo de energía, y mejor calidad del producto.

El efecto de la temperatura del aire de secado y el acondicionamiento o periodo de reposo sobre la diferencia del contenido de humedad en el secador de camada fija de café natural, y el requerimiento de energía durante el proceso de seca aireación ya ha sido determinado. La tabla 6 resume los valores medios del contenido de humedad final en un secador para café de 0,4m de camada de profundidad para tres niveles de temperatura (50, 60, y 70°C), con un flujo de aire igual (15 m³ min⁻¹ m⁻²), y tres niveles de periodos de acondicionamiento (0, 6, y 12 h) usando café natural con 28% de contenido inicial de humedad.

La fase de alta temperatura de secado fue interrumpida cuando el contenido de humedad de 13% y dos puntos porcentuales de disminución de humedad fueron conseguidos durante la aireación o enfriamiento con aire natural.

Tabla 6. Valores diferenciados de contenido de humedad final (%) obtenidos durante la seca aireación de café natural en un secador de camada fija de 0,4m secando desde 28% a 11% con un flujo de aire de $15 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-2}$.

De acuerdo a los valores mostrados en la tabla 6 puede concluirse que con temperaturas de secado de 50°C y 12 h de acondicionamiento representó el mejor tratamiento de seca – aireación para café natural dando una diferencia de 1.7 puntos porcentuales, lo que representa casi un 50% menos que la diferencia obtenida con el método de secado convencional.

Igualmente se aprecia que un de flujo del aire de $15 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-2}$ excede significativamente a los valores normalmente encontrados en procesos de seca-aireación de granos. Sin embargo, silos para almacenamiento de café generalmente no son equipados con piso perforado. Así, el objetivo de utilizar secadores de camada fija como un depósito total de acondicionamiento, para que los costos fijos se reduzcan utilizando el mismo tiempo de secado con alta temperatura y aireación.

Secador de flujo de aire invertido

Invirtiéndose la dirección del flujo del aire de secado utilizando capas (camadas) regulares de café en un secador de camada fija es otro método que se ha propuesto en el esfuerzo de minimizar la diferencia de humedad a lo largo de la camada, obteniendo al final un producto de mejor calidad. Usando este método la diferencia entre el contenido de humedad máximo y mínimo en el café puede reducirse mucho, comparándola con el método de secado convencional. Como una limitación, la eficiencia del secador es ligeramente baja para el secado de flujo invertido.

De acuerdo con KINCH (1967), el concepto de invertir la dirección del flujo de aire para secar café pergamino en camadas regulares se introdujo en 1952 por Fukunaga y Strohman, pero en ese entonces no se realizaron esfuerzos serios para analizar la influencia de varios

parámetros de secado al encontrar diferencia en el contenido final de humedad y la proporción global del secado. Sólo recientemente se han realizado estudios para comprender el método de secado con flujo de aire invertido para café natural. BERBERT (1991).

Las tablas 7 y 8 resumen las evaluaciones de las simulaciones de secado de flujo invertido del aire y el secado convencional de flujo en una misma dirección con temperaturas de aire de secado de 50 y 70°C, respectivamente. La temperatura del medio ambiente y la humedad relativa que fueron introducidas en el modelo de simulación al iniciar el proceso son 15.8°C y 82.0%, respectivamente. En cuanto al producto, las condiciones medias usadas como datos de entrada eran: 25% de contenido de humedad inicial; 13% el contenido de humedad final, y 15.8°C de temperatura inicial. Se realizaron simulaciones alternando tres niveles de intervalos de tiempo de 3, 4 y 6 h, y una proporción de flujo de aire de 15 m³ min⁻¹ m⁻². Este procedimiento apunta a analizar el efecto de inversión de intervalos de tiempo, a cada temperatura, sobre los requerimientos específicos de energía y tiempo total de secado e identificando las mejores condiciones que produjeran un contenido de humedad más uniforme, con 0.90 de camada de profundidad de café. Se realizaron simulaciones comparativas utilizando el método convencional de secado. El índice de uniformidad presentado en estas tablas está definido como el porcentaje de granos en la camada que están contenidos en el rango de 13% ± 0.5%. Los valores mostrados en las tablas 5 y 6 muestran que para la misma temperatura de secado, el consumo de energía específico disminuye inversamente con intervalos de tiempo crecientes. No obstante, desde el punto de vista de la ingeniería, el aumento en el consumo energético específico con el método de secado de flujo de dirección invertida se consideraba despreciable para todos los casos estudiados. De los resultados experimentales y simulados obtenidos es evidente que el método de secado de aire invertido es muy efectivo promoviendo una marcada reducción en el contenido de humedad final en secadores de camada fija para café. Reducciones con diferencia que van de 60 a 70% generalmente son observadas al invertir el flujo de aire de secado con temperatura del aire de secado de 50°C cuando se comparó con el método convencional de secado. Para este último método el aumento de la temperatura no causó efecto en el índice de uniformidad.

No obstante, las diferencias del contenido de humedad final aumentaron considerablemente con temperaturas de aire de secado de 70°C, invirtiendo la dirección del flujo de aire cada 3 h producían un índice de uniformidad mejor y un contenido de humedad más bajo cuando se comparó con el método de secado convencional. A pesar de la reducción del 67% de la diferencia del contenido de humedad final cuando se compara con el método tradicional, la no conformidad de la distribución de humedad que todavía no puede arriesgarse la calidad del producto después del tostado. Si los frutos no se mezclan completamente después de secados o si no se les permite igualar su contenido de humedad, los frutos con contenido de humedad más altos probablemente no se quemarán y aquellos con secado excesivo se chamuscarán durante el tostado. El resultado será un producto desagradable al gusto. Para una temperatura de aire de secado de 70°C, invirtiendo el flujo de aire cada 6 h no tiene efecto significativo en la reducción de la diferencia de contenido de humedad final porque la inversión ocurre casi al final del periodo de secado.

Temperaturas inferiores de aire de secado a 50°C, son consideradas las más convenientes para secar café en secadores de camada fija o invirtiendo el flujo de la dirección del aire con intervalos de 3 o 6 h. La inversión periódica del flujo de aire también previene la condensación que daña la capa superior de la camada de café.

Comparando este método de secado con otras técnicas propuestas para reducir la distribución de humedad final a lo largo de la camada fina, es considerado que invirtiendo la dirección del aire a intervalos regulares pueden llevarse a cabo fácilmente en secador de flujo cruzado y secadores de café de camada fija con cambios de planificación y reducción de costos adicionales.

Secado combinado de alta temperatura y temperatura ambiente

La combinación de secado es uno de los últimos conceptos en la tecnología de secado del café. Este es un método de secado en que los procesos de alta temperatura y temperatura ambiente o procedimiento de secado a baja temperatura son combinados en un esfuerzo por proporcionar un producto de alta calidad cuando es comparado con el uso de método de secado de alta temperatura. LOEWER et al. (1994) La etapa de secado de alta temperatura es usada para reducir el contenido de humedad del café de aproximadamente 60% a 25% o

menos, para que el secado con aire natural pueda ser usado para completar el secado, reduciendo con éxito el contenido de humedad del producto más allá de los límites seguros.

Al contrario de los procesos de seca-aireación, en el secado combinado de café el calor es transferido directamente al depósito de almacenamiento donde con la temperatura ambiente o baja temperatura la humedad restante es eliminada. En el secado combinado, el café es secado en el secador de alta temperatura a un nivel de 10 a 12 puntos porcentuales por encima del valor para un almacenamiento seguro, con este resultado el mínimo flujo de aire recomendado en la fase de aireación en el secado combinado son 15 a 25 veces más que el máximo flujo de aire usado en la fase de enfriamiento del proceso de seca-aireación.

El secado combinado proporciona tres ventajas sobre el típico secado en alta temperatura: mayor capacidad de secado, reducción del consumo de energía y mejor calidad del café reduciendo la diferencia del contenido de humedad final a lo largo de la camada de café. Cuando comparado al proceso de seca-aireación, la principal ventaja del secado combinado es la eliminación del paso de manejo extra asociado con el acondicionamiento del depósito. La desventaja principal del secado combinado es el requisito de un nivel relativamente alto de inversión y manejo en casos donde se compra como una unidad porque los dos sistemas de secado están incluidos.

El procedimiento usual para secar café natural en la finca utilizando el método de secado combinado es como sigue: frutos maduros caídos son escogidos y presentan contenido de humedad que van de 50 a 65%, luego son separados y protegidos del resto a través de flotación en agua, siendo entonces secados en dos o tres fases separadas.

Donde se usan tres fases, el café es secado inicialmente realizado en patios o terrazas de concreto al sol hasta que se encuentre en 35% de contenido de humedad aproximadamente. Entonces, los frutos parcialmente secos se llevan a un secador de alta temperatura donde el contenido de humedad se reduce más allá de 25% aproximadamente. En la tercera fase el café se seca en un depósito a temperatura ambiente hasta alcanzar 13% b.h. de contenido de humedad. Usando dos fases, el procedimiento de secado al sol se elimina y el contenido de humedad en la cosecha se reduce a aproximadamente 25% utilizando el secador de alta temperatura exclusivamente. El secado combinado también se aplica para secar café lavado

y café sin despulpar en donde se entrega el producto directamente al depósito de secado a baja temperatura después del procedimiento de secado al sol o el método de secado de alta temperatura

Para la fase de secado con temperatura ambiente en el secado combinado se ha recomendado de flujo de aire en rangos de uno a uno y medio del flujo de aire usado en la fase de secado de alta temperatura. CLOUD y MOREY (1980). Variaciones de los flujos de aire en rangos de 7 a 15 m³ min⁻¹ m⁻² generalmente se usan. Éste aire es relativamente húmedo para secar café como resultado de la capacidad de secado a temperatura ambiente.

El ventilador debe prenderse cuando la primera porción de café se entregue al depósito y debe apagarse durante algunos periodos de tiempo adverso de secado o cuando el contenido medio de humedad del café en la superficie de la camada alcanza el contenido de humedad adecuado. Para sistemas de secado a temperatura ambiente, el tiempo total de secado depende del contenido de humedad inicial y de las condiciones climáticas.

Los esfuerzos por usar un contenido de humedad inicial alto en el café natural en la fase de baja temperatura de secado combinada han sido infructuosos. GUIMARAES (1995). Por ejemplo, montajes de secado experimental han mostrado que debido a los altos contenidos de humedad iniciales, 27% a 30%, calentamientos excesivos desarrollados dentro de la camada de café después de aproximadamente 10 días a las condiciones de tiempo establecidas (0.0124 kg kg⁻¹ proporción de humedad y temperatura de 18°C), y las inspecciones cuidadosas generalmente indicaron invasión por hongos. En casos donde el secado no fue interrumpido, fue observado que a temperatura ambiente en general, no fue enfriado lo suficiente para servir como un disuasivo al desarrollo de los hongos y se desarrolló un fuerte olor a moho. Los resultados obtenidos sugieren que secando café natural con alto contenido de humedad en la fase de baja temperatura de secado en combinación es un procedimiento muy arriesgado. Sin embargo, no existen suficientes datos disponibles para condenar esto como imposible. Puede razonarse que el mejor tiempo de secado o el uso de flujo de aire más altas podrían haber demostrado en forma satisfactoria que reduciendo el contenido de humedad del café hasta un nivel relativamente seguro, se previene el desarrollo de los hongos, pero los riesgos involucrados son todavía altos. Otra alternativa puede ser la reducción de profundidad de camada de café.

Por otro lado, se han realizado pruebas de secado utilizando café pergamino con alta humedad y han sido secado con éxito. GUIMARAES (1995). Tomando aproximadamente 1,050 h para secar café inicialmente a 37% hasta un contenido medio 13%, una extracción en el contenido de humedad de 24 puntos porcentuales.

Los resultados obtenidos implican un grado de extracción de humedad media aproximadamente 4 veces mayor que la obtenida con café natural, de lo que puede verse que la baja temperatura de secado de café pergamino es considerablemente más eficiente que el secado de café natural.

Un conocimiento exacto del comportamiento dentro de la camada, para secado de café relativamente húmedo a temperatura ambiente, es esencial para identificar dentro de la camada de café natural puntos calientes y evitar deterioración en partes o en el entero lote. Aumentos como 10°C por encima de la temperatura del ambiente han sido observados dentro de la camada de café como un resultado de crecimiento de hongos.

Creando esto pasa, la temperatura del ambiente generalmente está más baja dentro de la camada de café durante el periodo completo del secado, indicando altas velocidades de respiración y que los hongos ya están presentes desde las fases iniciales del proceso.

La mezcla de diferentes lotes de café con diferentes contenidos de humedad es una práctica común, y es algo que debe evitarse siempre que sea posible.

Se espera que uno o pocos días de mal tiempo puedan no afectar adversamente la eficiencia de los sistemas de secado a baja temperatura. Deteniendo el ventilador y esperando por un tiempo más favorable podría dejar de reconocerse que el primero y por encima de todos los requisitos en el secado a temperatura ambiente, es guardar el grano fresco y prevenir su calentamiento. Sin embargo, es un tema de conocimiento común que manteniendo café con contenidos de humedad mayores de 15% por largos periodos utilizando secado a baja-temperatura es un almacenamiento inseguro puesto que hongos y deterioración de la calidad en la taza pueden ocurrir. Pero el humedecimiento de café seco es un resultado del funcionamiento continuo del ventilador durante periodos de tiempo adverso es también un procedimiento arriesgado porque los granos pueden palidecer y desteñirse en cuanto a la apariencia, significando deterioración de aroma y sabor. Entonces una operación de

ventilación ilimitada durante las condiciones de un tiempo de secado inadecuado puede recomendarse con tal de que el contenido de humedad alrededor de 17%.

En conclusión, la combinación de secado de café ofrece una alternativa viable para los agricultores que desean entregar un producto de alta calidad a los procesadores de café.

Sin embargo, este éxito depende de un buen planeamiento, clasificación adecuada por tamaño, buenas operaciones de coordinación y dirección del ventilador para secado con aire natural. Bajo condiciones apropiadas de tiempo es factible secar café natural de aproximadamente 25% bajándola hasta 13% de contenido de humedad usando una velocidad de flujo de $8 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-2}$ sin proporcionar calor adicional significativo al aire de secado. Sin embargo, el secado de café natural con contenido de humedad por encima de 26% es un procedimiento muy arriesgado y no debe recomendarse bajo condiciones de mal tiempo. Por otro lado, estudios han mostrado que la fase de secado con aire natural es muy efectiva para secar café sin despulpar con alto contenido de humedad (37%) para un nivel de almacenamiento seguro GUIMARAES (1995).

3.4.3 Humeo metros

Psicometría

Es el estudio de las propiedades termodinámicas de los gases húmedos mientras que humedad se refiere simplemente a la presencia de vapor de agua en el aire u otros gases.

Mucho del estudio de la mezcla del vapor con el aire seco se aplica también a otros gases ya que las propiedades termodinámicas del vapor de agua son aproximadamente independientes del gas de transporte. Además, como la composición del aire atmosférico es relativamente constante el aire seco como una masa homogénea con peso molecular 28.96, el peso molecular del agua es 18.01

Parámetros típicos para determinar la humedad

Medición de la humedad relativa (RH)

La medición de la humedad relativa consiste en la relación entre la presión parcial del vapor de agua en el gas de que se trate y la presión de saturación del vapor, a una

temperatura dada. Por lo tanto la humedad relativa es función de la temperatura. La medición es expresada como un porcentaje. La humedad relativa es un parámetro utilizado principalmente en aplicaciones ambientales (ej. acondicionamiento de aire) o mediciones meteorológicas ya que impacta directamente en el confort humano. Cuando los niveles de humedad relativa son bajos puede producirse electricidad estática que dañe al equipamiento electrónico.

Medición del punto de rocío/escarcha (D/F PT)

El punto de rocío es la temperatura, por sobre los 0° grados, al cual el vapor de agua presente en el gas condensa. El punto de escarcha es la temperatura, por debajo de 0° grados, a la cual el vapor se cristaliza en hielo. El punto D/F PT es función de la presión del gas pero independiente de su temperatura, y por lo tanto se lo considera una magnitud fundamental.

Los puntos de rocío y escarcha son utilizados cuando la sequedad de un gas es relevante, esto es en procesos en los que debe evitarse la condensación de el vapor de agua a bajas temperaturas. El punto de rocío se usa también como un indicador del contenido de vapor de agua en procesos de alta temperatura como el secado industrial.

Partes por millón (PPM)

Expresión del contenido de vapor de agua por fracción de volumen (PPMv) o, si es multiplicado por la relación entre el peso molecular del agua y el aire como PPMw.

Este parámetro es más dificultoso de conceptualizar porque está fuera del alcance del cuerpo humano detectar los cambios de esta magnitud en la atmósfera. Este término y los asociados como pueden ser: El termino PPM u otros asociados como la relación de mezcla, el porcentaje de volumen y la humedad específica, se utilizan cuando el vapor de agua es una impureza o un componente definido en una mezcla de gases que participa de un proceso industrial. Un ejemplo práctico de su aplicación son los gases de uso medicinal, como pueden ser el óxido nitroso, dióxido de carbono y oxígeno cuando son utilizados en operaciones quirúrgicas que deben tener un contenido de humedad menor a 60ppm.

Consideración de los distintos tipos de sensor y sus aplicaciones

No existe unatecnología de medición que sea apropiada para todas las aplicaciones. Algunas de las tecnologías típicamente usadas son:

Técnicas para la medición de humedad relativa

Las mediciones de humedad relativa puede ser hecha por sensores basados en: psicometría, desplazamiento, resistivos, capacitivos y por absorción de líquido. Algunos de los cuales describimos.

Psicometría por bulbo húmedo/bulbo seco

La psicometría desde hace tiempo es uno de los métodos más populares para el monitoreo de la humedad debido a su simplicidad e inherente bajo costo. Un psicómetro industrial típico consiste de un par de termómetros eléctricos acoplados, uno de los cuales opera en estado húmedo. Cuando el dispositivo funciona la evaporación del agua enfría el termómetro humedecido, resultando una diferencia medible con la temperatura ambiente o la temperatura del bulbo seco. Cuando el bulbo húmedo alcanza sus máxima caída de temperatura la humedad puede determinarse comparando la temperatura de los dos termómetros en una tabla psicométrica.

El psicómetro provee una alta precisión en las proximidades del punto de saturación (100% RH) y es fácil de operar y reparar, por otra parte a baja humedad relativa (menos del 20%) el desempeño es pobre y el mantenimiento debe intensificarse. No puede utilizarse a temperaturas menores de 0° y, siendo el propio psicómetro una fuente de humedad, no puede utilizarse tampoco en ambientes pequeños o cerrados.

3.4.4 Capacidad de secado

La expresión "Capacidad de secado" tiene una importancia fundamental, porque es un parámetro, quizás el más utilizado en el desempeño de las secadoras. Interviene en casi todos los cálculos, en los proyectos y en los costos de secado de granos.

En general, la capacidad de secado se expresa en unidades comunes como toneladas o quintales por hora, ya sea de grano seco o de grano húmedo.

Expresar la capacidad de una secadora solamente en t/hora o q/hora puede llevar a cierta confusión, pues en realidad, una secadora no tiene una sola capacidad horaria, sino varias, que dependen de varios factores, como la humedad inicial del grano, la temperatura de secado y otros.

Es más lógico expresar la capacidad en quintales por hora y por punto de humedad, valor que se forma de multiplicar la capacidad en q/hora que indica el fabricante por los puntos de humedad que también señala el mismo. Así, una secadora de 30 t/h (300 q/h) para secar maíz de 17 a 13,5% (3,5 puntos), tendrá una capacidad de:

$$300 \text{ q/h} \times 3,5 \text{ puntos} = 1\ 050 \text{ quintales-punto/hora}$$

Que se abrevia: 1 050 qp/h

Conocido este valor es fácil calcular la capacidad horaria que tendrá la secadora con diferentes humedades iniciales. Si, por ejemplo, la máquina anterior debiera secar de 23% a 13,5% de humedad (9,5 puntos de diferencia), la capacidad ahora sería:

$$1\ 050 \text{ qp/h} / 9,5 \text{ p} = 11 \text{ q/h} = 11,1 \text{ t/h}$$

Si la humedad inicial fuera de 28% (14,5 puntos de diferencia), la capacidad sería:

$$1\ 050 \text{ qp/h} / 14,5 \text{ p} = 72 \text{ q/h} = 7,2 \text{ t/h}$$

La humedad inicial del grano es entonces, el dato que decide la capacidad horaria de la secadora. Esta información no suele estar bien aclarada en los folletos o catálogos de los fabricantes, o a veces se encuentran diferencias entre los valores de unos y otros. Sin embargo, estos datos son muy importantes para los usuarios por razones obvias.

Esta determinación de la capacidad horaria puede hacerse también por otro cálculo algo más complejo, pero que nos dará idéntico resultado. Se basa en calcular la merma de humedad real.

La merma real en peso que se origina en un café húmedo se calcula con la siguiente fórmula:

$$\text{Merma} = \frac{H_i - H_f}{100 - H_f} \times 100$$

Ecuación 25

Donde:

H_i: Humedad inicial en %

H_f: Humedad final en %

Entonces tenemos: La merma real, para una reducción de humedad de 17 a 13,5%, es de:

$$\frac{17 - 13,5}{100 - 13,5} \times 100 = 45\%$$

Para una extracción de humedad de 23 a 13,5, la merma es de:

$$\frac{23 - 13,5}{100 - 13,5} \times 100 = 10,98\%$$

Sabiendo que la capacidad de fábrica es de 30 t/h, la nueva capacidad horaria se obtiene de la siguiente forma:

$$30 \text{ t/h} \times \frac{4,05}{10,98} = 11,1 \text{ t/h}$$

Para una extracción de humedad de 28 a 13,5% la merma real, aplicando la misma fórmula, es de 16,76%. Ahora, la capacidad horaria será de:

$$30 \text{ t/h} \times \frac{4,05}{16,76} = 7,2 \text{ t/h}$$

Capacidad nominal

Se habrá observado que la extracción de humedad de 17 a 13,5% ha sido asumida como valor promedio para calcular la capacidad nominal de una secadora, que se denominaba "capacidad de fábrica". O sea que, cuando un fabricante indica que su secadora tiene una capacidad determinada, hace referencia a esa extracción de humedad, o alguna muy

parecida. Algunos fijan valores entre 18 y 14% ó 18 y 13,5%, mientras que en algunos países la capacidad nominal se establece entre 20 y 15%.

En la Tabla 9 se han calculado las diferentes capacidades para distintos tamaños de secadoras, de acuerdo a la humedad inicial del grano. Como se ha expresado ya, el intervalo 17% - 13,5% se ha tomado como base para fijar la capacidad nominal.

En la última columna se ha indicado la cantidad de agua a evaporar por cada t de grano y para distintas extracciones de humedad. Multiplicando esa cantidad por la capacidad real respectiva de la secadora, se determina la cantidad de agua a evaporar, o sea lo que se denomina "poder de evaporación".

Debe aclararse que la capacidad nominal y la real se pueden expresar en t de grano húmedo o de grano seco, y no existe unanimidad entre las indicaciones de los diferentes fabricantes. Por supuesto, la capacidad en t de grano húmedo es siempre mayor que la de grano seco. En la propaganda comercial y en los trabajos técnicos debe aclararse de que capacidad se está tratando.

Una línea inferior de la Tabla 9 presenta la capacidad en quintales-punto por hora, para un intervalo de 17 a 13,5% de humedad.

Las cifras indicadas en la Tabla 9 se refieren a una temperatura promedié de 100°C. Si la temperatura se elevara, por ejemplo, a 120°C, esas cifras tendrían que ser aumentadas un 20%. Si se redujera la temperatura, por ejemplo, a 45°C (como para secar semilla) la reducción de la capacidad es muy grande, más del 50%

Tiempo de permanencia o de residencia

Es un factor también de incidencia en el secado de granos porque tiene influencia en la eficacia del proceso y la calidad de la mercadería.

En forma general se puede afirmar que el deterioro que experimenta un grano en la secadora es consecuencia de la relación temperatura-tiempo, es decir, cuanto calor y durante cuánto tiempo, o sea el calor total aplicado.

Existen hoy secadoras, del tipo concurrente, que trabajan a altas temperaturas de secado, cercanas a 250°C, pero sometiendo el grano a breves períodos de contacto con las mismas, de forma tal que el daño no es significativo.

Algo similar sucede en una secadora de flujo continuo, cruzado o mixto.

Se menciona que los granos muy húmedos no deben estar expuestos a altas temperaturas, pero esto es válido si el tiempo de permanencia a esas temperaturas es prolongado. En caso de ser breve, por el contrario, los granos húmedos pueden admitir más altas temperaturas de aire, pues evaporan gran cantidad de agua y no llegan a calentarse en exceso. Es por ello que las secadoras con temperaturas diferenciales conducen el aire más caliente hacia la parte superior de la cámara de secado, y las menores temperaturas hacia la parte inferior, con lo cual se gana en capacidad y no se afecta la calidad del grano.

El tiempo de permanencia está subordinado, entonces, en primer lugar, al porcentaje de humedad del grano. Cuanto más húmedo ingrese, mayor será el tiempo de permanencia dentro de la secadora, y viceversa.

Un grano húmedo, en las secadoras tipo torre, tiene que descender más lentamente que un grano más seco, por aquellas razones.

El tiempo de residencia se regula modificando la cantidad de vaivenes del descargador basculante de la secadora, o variando el régimen de vueltas de los extractores que son los dos procedimientos más comunes de descarga de granos en las secadoras actuales.

Si no se modificara la velocidad de descarga para adecuarlo a la humedad inicial, puede suceder que un grano húmedo salga de la secadora con humedad todavía alta, y que un grano más seco salga sobre secado.

Pero el tiempo de residencia depende igualmente de otros factores, como del tipo de grano a secar (hay granos de fácil secado, como el girasol), de la temperatura del aire de secado, y por supuesto de la humedad final que se pretende.

En una secadora determinada el tiempo de permanencia promedio se calcula dividiendo el volumen total de la misma, traducido a toneladas, por la capacidad horaria en ese momento.

$$t_p = \frac{\text{Volumen (en t)}}{\text{Capacidad (t/h)}}$$

Ecuación 26

El tiempo de residencia también puede ser medido si se conoce la altura de las cámaras de secado y de enfriamiento, y la velocidad de calda del grano en la secadora.

Debe tenerse presente que en caso de secar partidas con poca humedad, que requerirían tiempos de permanencia muy cortos, se deben alargar esos tiempos porque si no, la máquina no tendría tiempo suficiente para el enfriamiento (tema "Enfriamiento").

Velocidad de secado

El concepto de velocidad de secado es algo diferente al de tiempo de permanencia, pero está relacionado.

Se entiende por velocidad de secado a los puntos de humedad que se extraen en una unidad de tiempo, generalmente una hora. Así se habla de una extracción de humedad, por ejemplo, de cuatro puntos/hora.

Cámara de secado

Hay dos magnitudes que son importantes en las dimensiones de esta cámara: la altura y la profundidad. En las secadoras de columnas continuas o en tandas, se agrega una tercera, el espesor de la columna.

Altura y profundidad influyen en la capacidad de secado. La profundidad, siempre que haya uniformidad en toda su longitud en cuanto a temperatura del aire de secado y al caudal de aire.

El espesor de las columnas suele tener diferentes variaciones en las distintas marcas, pues en general tiene un promedio de unos 30 cm.

También interesa conocer el volumen de esta cámara, en m³, que permite calcular el caudal específico de aire caliente, entre otros datos.

La temperatura del grano y el enfriamiento

La temperatura del grano durante el proceso del secado es factor primordial por su relación, no solamente por la calidad del grano sino también por su influencia en el enfriamiento posterior en la maquina, y por su gravitación en otros métodos, como la seca-aireación y el secado combinado.

En general, puede afirmarse que la temperatura del grano es tanto más baja cuanto más elevada sea la humedad inicial; una razón es la mayor evaporación que se produce, que absorbe calor, y la otra es que, al ser mayor el tiempo de permanencia del grano en la secadora, existe más tiempo disponible para el enfriamiento.

Por el contrario, los granos sobre secados salen de la secadora con mayor temperatura, en relación a los granos con humedad final normal. Al sobresecar los granos, éstos se calentarán siempre de más, pues de otra forma no se puede retirar una humedad fuertemente retenida por el grano.

Los granos que salen de la secadora con mayor humedad, por ejemplo, 16%, lo hacen menos calientes que los que salen más secos.

Por otra parte, cuando el grano es descargado de la maquina a altas temperaturas, mayores que las consideradas normales, significa una pérdida directa de calor, y un consumo extra de energía en la aireación posterior para enfriarlo. Esta pérdida no existe cuando se aplica seca-aireación o secado combinado.

Enfriamiento

La capacidad de enfriamiento de una secadora tiene importancia, pues hay que tener presente que durante el periodo de enfriado los granos continúan secándose, aunque en menor proporción. Se calcula que puede evaporarse entre un 0,5 a 0,8% de humedad en esta zona. Esta cantidad es mayor cuanto mayor sea la temperatura del grano y menor sea el caudal de aire de enfriado.

Las reglamentaciones vigentes exigen que la temperatura del grano que sale de la secadora no supere en 5°C la temperatura del aire ambiente, aunque este valor es relativo.

En casos que la humedad inicial del grano sea muy baja, el tiempo de permanencia es corto (o sea que el grano escurre con mayor velocidad) y puede suceder que no haya suficiente tiempo para el enfriamiento, de suerte tal que el grano saldrá demasiado caliente de la secadora.

Se precisan por lo menos unos 30 a 40 minutos en ciertas secadoras en la sección de enfriamiento para enfriar el grano; si el secado dura menos, entonces el enfriamiento será insuficiente.

En algunas secadoras se podrá cambiar, ante esta situación, la posición de las compuertas o divisores de distribución del aire caliente y del aire frío, dándole más volumen a este último. En otros casos se deberá reducir la velocidad del proceso disminuyendo la descarga, pero al mismo tiempo habrá que disminuir la temperatura del aire de secado regulando el quemador.

Otra solución consiste en derivar ese grano demasiado caliente a un silo con aireación para enfriarlo aprovechando las horas nocturnas, o si no volverlo a pasar por la secadora con los quemadores apagados. Al principio se producirá una cierta condensación de humedad, que deberá ser eliminada convenientemente.

Así como hay que aumentar el tamaño de la zona de enfriamiento en los casos mencionados, en ciertas oportunidades habrá que hacer la operación contraria, es decir, reducir dicha zona. Esto es aplicable en casos de secar granos con alto porcentaje de humedad, en que la velocidad de descarga se reduce apreciablemente, y entonces puede suceder que el período de enfriamiento se alargue en forma excesiva, lo cual puede ocasionar una reabsorción de humedad por parte del grano.

Entonces, para un correcto enfriamiento, la secadora debería permitir un buen período de permanencia del grano, lo cual facilitaría el enfriado y a su vez un mejor secado complementario. Para que esto sea posible, la velocidad del grano en la cámara de

enfriamiento debería ser menor, ya sea ensanchando allí las columnas en las secadoras de columnas, o aumentando el tamaño de la cámara de enfriamiento.

Otro detalle a tener presente es que la temperatura del grano que sale de la secadora es mayor durante las horas más cálidas del día que durante las horas nocturnas.

Una secadora trabajando en las horas de calor con una temperatura exterior de 30°C, por ejemplo, puede dejar el grano con 35°C a la salida, pero en las horas de la noche, el grano puede salir a 20°C - 25°C. En el primer caso, se deberá tener mucho cuidado en el almacenamiento, y deberá ser enfriado con aireación nocturna.

Sin embargo, el rendimiento de la secadora será bastante superior en las horas de calor comparado con las horas nocturnas, pues el aire tiene más temperatura y menos humedad relativa.

Del mismo modo, una secadora trabajando en zonas de clima cálido tendrá mayor rendimiento que la misma máquina en zonas de clima frío.

Si la temperatura es muy cálida, no se pueda enfriar bien el grano, por lo cual, dentro de lo posible, convendrá realizar el secado durante la noche.

Una precaución a tener en cuenta es que la alimentación de aire del ventilador de enfriamiento se efectúe directamente del exterior, evitando que ingrese aire más caliente por influencia de los quemadores, o debido a que la secadora se encuentra en el interior de edificios o estructuras donde hay aire a mayor temperatura.

Por el contrario, en regiones donde priman temperaturas exteriores muy frías, en las que exista el peligro de congelamiento de los granos, hay que permitir un leve calentamiento del aire al ingresar en la cámara de enfriamiento.

En ciertas máquinas es posible aumentar el caudal de aire frío casi hasta el doble y de esta forma reducir el tamaño de la zona de enfriamiento y aumentar consecuentemente la zona de secado.

3.4.5 Tipos de secadora

1. Tipos de secadoras de granos

Las máquinas secadoras pueden clasificarse de la siguiente forma:

Secadoras de flujo continuo:

Verticales (tipo torre)

- De flujo mixto (de caballetes)
- De flujo cruzado (de columnas)
- De persianas
- De flujo contracorriente
- De flujo concurrente

De cascadas

Horizontales

- De flujo cruzado (de columnas hexagonales)
- De flujo mixto
- De lecho plano:
- Fijo
- Fluido

Secadoras en tandas

De flujo cruzado:

- Con recirculación

- Estáticas

De flujo mixto:

- Con recirculación
- Estáticas

Silos secadores

De flujo contracorriente

De flujo cruzado

Tanto las máquinas verticales (de menor tamaño) como las de cascadas, horizontales y secadoras en tandas, pueden ser fijas o transportables.

Esta clasificación comprende solamente a las secadoras comerciales, o sea, aquellas que se emplean en las plantas de acopio de granos de una capacidad media a alta.

A nivel de pequeño productor existe una amplia gama de diversos equipos de secado, la mayoría de los cuales son de reducida capacidad y de diseños simples, que se utilizan en países donde todavía no ha llegado una tecnología avanzada. Hay otros ejemplares de secadoras, algo más evolucionados, como secadoras solares, secadoras por convección natural, patios de secado, túneles de secado, etc.,

Secadoras de flujo continuo

Son aquellas en las que el grano se introduce y descarga en forma continua o intermitente, permaneciendo constantemente llenas las secciones de secado y enfriamiento. Las operaciones de secado y enfriamiento se efectúan en forma simultánea e ininterrumpida.

Las secadoras verticales, también llamadas "tipo torre", se caracterizan por el recorrido del grano, desde arriba hacia abajo, y pueden ser clasificadas en varios grupos, de acuerdo al tipo de flujo.

Las secadoras de flujo mixto, también llamadas de "caballetes", tienen como elemento principal, en las zonas de secado y enfriamiento, un conjunto de conductos en forma de V invertida, por donde circula el aire caliente o frío.

Las de flujo cruzado, también llamadas "de columnas" poseen columnas o venas rectas por donde circula por gravedad el grano; las columnas están formadas por paredes de chapas perforadas, las que atraviesa el aire caliente (o frío) en forma cruzada o perpendicular al espesor de la columna. Se conocen también secadoras de columnas de forma circular.

Estos dos tipos, son los modelos comerciales más empleados en la actualidad

Las secadoras de persianas tienen su cuerpo principal formado por tres tabiques verticales, siendo los dos exteriores abiertos en las dos caras, y el tabique medio en zigzag con grandes perforaciones. Este sistema permite que el grano situado en el costado por donde ingresa el aire caliente descienda más rápidamente que el grano situado en el costado opuesto, con el fin de asegurar un secado más homogéneo. El espesor de la columna es de alrededor de 40 cm.

Las de flujo contracorriente y de flujos concurrentes se conocen como de flujos paralelos (de aire y de grano). Las de flujo contracorriente son aquellas en las que el aire y el grano marchan en la misma dirección, pero en sentido contrario. Las de flujo concurrente son las que el aire y el grano marchan en la misma dirección y en el mismo sentido.

Secadoras de flujo contracorriente

En esta secadora el grano fluye hacia abajo y el aire hacia arriba. En forma general este tipo de secadora corresponde al silo secador.

Este tipo de secado es muy eficiente energéticamente, porque el aire sale a través del grano más húmedo, o sea muy saturado, pues recoge una máxima carga de humedad.

El espesor de la capa de grano no suele superar los 3 - 4 m, pero si aumenta el espesor de la masa de granos también hay un incremento en la resistencia al paso del aire, que produce una disminución de la capacidad de secado.

El equipo puede funcionar todo en caliente y efectuar el enfriamiento en un silo separado (Figura 11) para hacer el proceso en forma continúa, aplicando lo que se conoce como "secado combinado".

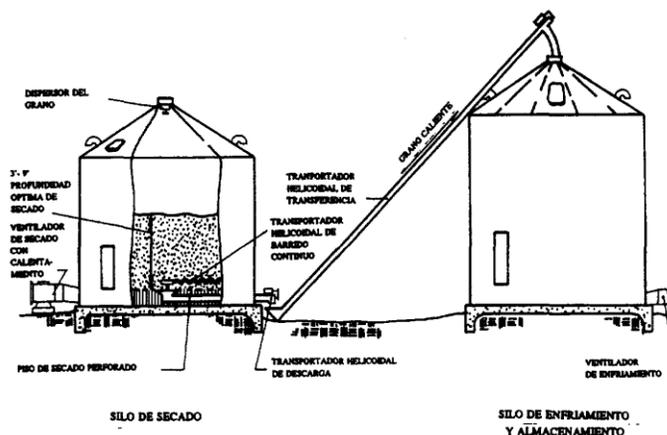


Figura 8 Secadoras flujo concurrente

En este tipo, el grano y el aire de secado fluyen en la misma dirección y sentido. De esta forma el aire caliente se encuentra con grano frío y húmedo, pero la transferencia de calor y humedad que tiene lugar asegura que la temperatura del grano no alcance la temperatura del aire de entrada y que descienda rápidamente.

Este diseño tiene la ventaja que se pueden emplear muy altas temperaturas del aire, que originan altas velocidades de secado sin sobrecalentar el grano. Este último está sometido a un tiempo de permanencia más corto, por lo cual no es muy afectado.

Se ha comprobado también que el consumo específico de energía se encuentra entre 850 y 900 Kcal por Kg de agua evaporada, que significa una buena eficiencia térmica.

En la práctica se ha comprobado que la extracción de humedad por cada tratamiento de flujo concurrente no supera los dos puntos de humedad, de manera que las secadoras comerciales existentes tienen dos o tres etapas, separadas cada una por secciones de reposo. Tales máquinas son muy altas, la potencia consumida es elevada y los tiempos de residencia más prolongados, todo lo cual está limitando, hasta ahora, la difusión de modelos de este tipo, así como su mayor costo inicial.

Secadoras cascadas

Estas máquinas están formadas por uno o dos planos inclinados, compuestos por persianas (las que atraviesa el aire) por las cuales el grano va descendiendo en forma de una cascada continua.

Este sistema tiene la ventaja de que no se tapan agujeros (porque no existen) con basura, como en otras secadoras que tienen paredes perforadas. También son aptas para secar semillas muy pequeñas, como calza, tréboles y otras similares, reduciendo el caudal de aire.

La corriente de aire que pasa por las persianas, además de su función principal de secar y enfriar, realiza una buena limpieza del grano. Las impurezas arrastradas tampoco caen en la cámara de aire caliente, con lo cual el riesgo de incendio es reducido a un mínimo.

Existen dos configuraciones especiales, una con un solo plano inclinado, en el cual la última sección es la zona de enfriado, y otra con dos planos inclinados donde el plano superior es la zona de secado, y el inferior, la zona de enfriado.

Como son equipos de poca inclinación ocupan un área superficial mayor que las secadoras tipo torre. Además la potencia absorbida por toneladas es casi el doble que las secadoras mencionadas.

Con el fin de aumentar la capacidad de secado se han fabricado secadoras con este mismo principio de cascadas, pero verticales, formadas por módulos de forma romboidal que pueden montarse uno arriba del otro, obteniéndose secadoras de hasta 100 t/hora.

En general, estas secadoras de lecho en cascadas emplean mayores caudales de aire que las secadoras de flujo mixto, pero trabajan a menores temperaturas del aire de secado. Sus fabricantes dicen que por dichas razones son preferidas estas máquinas por las malterías y los elaboradores de arroz.

La instalación de las secadoras de 1 ó 2 planos es fácil, pues ya vienen entregadas en un único cuerpo completo, y solo se necesita una grúa para ubicarlas.

Secadores horizontales

Se ubican en este grupo dos tipos: las secadoras horizontales de columnas hexagonales y las secadoras horizontales planas.

Las primeras son similares en su diseño a las secadoras en tandas, pero se diferencian porque su operación es continua, tienen ciclo de enfriamiento, son más complejas, y suelen ser más largas.

La capacidad de estas máquinas se aumenta haciéndolas de mayor longitud. Algunas marcas están formadas por módulos superpuestos, en los que cada módulo es una secadora individual. Esta última disposición tiene la ventaja de que cada módulo puede tener temperaturas de secado diferentes, mayores en los módulos superiores y menores en los inferiores; al mismo tiempo se detienen o suprimen los ventiladores de aire frío (excepto en el módulo inferior), intercalando de esta forma períodos de reposo que mejoran la calidad y eficiencia del proceso

Las secadoras horizontales planas se caracterizan por tener la sección de secado y enfriamiento en posición horizontal plana. Pueden ser clasificadas en dos modelos: de lecho fijo y de lecho fluido.

Las de lecho fijo tienen una cámara de secado plana de un ancho de unos 3 m y una longitud entre 10 y 15 m.

El grano es removido continuamente por un agitador que avanza y retrocede, y es transportado por un piso móvil hacia el extremo de salida. En la última parte de la máquina se lleva a cabo el enfriado del grano.

El grano avanza en capas de 30 a 48 cm, removidas regularmente, produciéndose así un buen contacto entre grano y aire. Según sus constructores, estas características les permiten obtener una alta calidad de grano seco.

Muchas de estas secadoras horizontales también pueden ser empleadas para secar forraje, pellets y otros productos y subproductos.

Son secadoras de baja capacidad de secado, de alrededor de 5 -7 t/hora.

Las secadoras de lecho fluido se diferencian porque emplean elevados caudales de aire caliente, con el fin de agitar y poner en suspensión a la capa de granos, y de esta forma conseguir un secado más rápido y uniforme.

Existe otro tipo de secadora horizontal de lecho fijo, más simple, también llamada "de capa estacionaria, pero que trabaja en tandas.

3.4.5.1 Secadoras en tandas y silos secadores

Secadoras en tandas

Se coloca el grano húmedo en la secadora, se mantiene en ella hasta que es secado, y luego se enfría en la misma. Posteriormente, el grano es extraído, y la secadora se vuelve a llenar con otra tanda.

Estas secadoras se adaptan muy bien para seca-aireación, pues directamente se suprime el tiempo de enfriamiento en la secadora. Para dejar el grano con 16 o 18% de humedad, sólo es necesario acortar el tiempo de calentamiento. No se necesita hacer modificaciones en la secadora. En ellas se puede doblar con facilidad su capacidad de secado.

Las secadoras en tandas son, en general, de baja capacidad y pueden ser empleadas en la propia finca del productor. Siempre tienen que tener una capacidad similar a la de las máquinas cosechadoras, para no interrumpir la cosecha.

De recirculación

Estas secadoras, ya sea de columnas o de caballetes, poseen una cámara de secado convencional, pero el grano es reciclado varias veces en la secadora, con el auxilio de un elevador de cangilones o de una rosca vertical, de manera que existen períodos de descanso, que favorecen un templado parcial del grano. Una vez que el grano está seco, se lo enfría apagando el quemador, y se lo descarga, quedando luego la máquina libre para un nuevo ciclo.

Silos secadores

Se encuentran diversos tipos de estos silos secadores en el comercio de granos. La mayoría de ellos son silos metálicos cilíndricos, con distintos accesorios, que luego pueden utilizarse para almacenamiento.

Los silos secadores pueden emplear temperaturas del aire entre moderadas y altas, o solamente aire natural.

Una innovación que es común a silos secadores de Estados Unidos son los removedores de granos, que se componen de un árbol dispuesto horizontal y radialmente, colgado del centro del silo por un extremo y apoyado sobre un riel en la circunferencia del silo por el otro extremo, el cual está animado de movimiento circular. Sobre este árbol están montadas dos o tres roscas verticales, que tienen tres movimientos:

- de rotación sobre su propio eje;
- horizontal, a lo largo del árbol horizontal;
- circular, alrededor del silo, y que puede durar varias horas por vuelta.

Uniformidad de secado

Las secadoras de caballetes, al distribuir el grano en diversas capas de menor espesor, permiten un mejor intercambio entre aire y grano; además, por la forma y distribución de los caballetes, los granos son atacados por el aire caliente ya sea por flujo cruzado, por contracorriente y por acción concurrente, de manera que se mejora notablemente el contacto grano-aire. Por esta razón estas secadoras son conocidas también como "de flujo mixto".

Esta mejor distribución entre aire y grano permite reducir las diferencias entre las humedades de granos individuales, es decir, mejorar la uniformidad de secado.

Las secadoras de columnas no alcanzan una uniformidad tan satisfactoria pues en las columnas los granos que están más cercanos en contacto con la pared que recibe el aire caliente, se secan excesivamente, mientras que los que están en contacto con la pared del otro lado, no llegan a secarse adecuadamente. Es posible que granos que ingresan a la máquina con, digamos, 18% de humedad, tengan a la salida una humedad promedio de 14%, pero si se pudiera medir la humedad de granos individuales, muchos tendrían 17% de

humedad y otros están sobre secados a 8-9%. Los primeros pueden causar problemas posteriores de conservación, y los segundos habrán perdido gran parte de sus buenas propiedades.

b) Construcción

Las secadoras de columnas son de fabricación más simple y, por consiguiente, a igualdad de tamaño, más baratas. Por el contrario, las de caballete son más complejas. Estas diferencias se refieren únicamente a la cámara de secado.

c) Potencia requerida

Como el aire debe cruzar las columnas de secado y atravesar dos chapas perforadas correspondientes a las paredes, las secadoras de columnas absorben mayor potencia que las de caballetes.

d) Capacidad de secado

A igualdad de tamaño, las de columnas pueden tener una capacidad algo mayor, pues el flujo de granos es más libre.

e) Caudal de aire

Por las razones expuestas al mencionar la potencia requerida, los caudales necesarios para las máquinas de columnas son mayores, y pueden llegar a 5000 m³/h y por m³ de grano, mientras que las similares de caballetes tienen valores iguales a la mitad de aquellos.

f) Peligro de incendio

Al tener menos obstrucciones en su recorrido, el grano está menos expuesto al peligro de incendios en las secadoras de columnas que en las de caballetes. Estas últimas, si no se diseñan bien los caballetes y su distribución, pueden acumular materiales en algunos puntos, los que se recalientan y pueden iniciar un fuego.

g) Obstrucciones

En las secadoras de columnas pueden taparse los agujeros de las paredes por la basura de los granos si éstos no están suficientemente limpios antes de entrar a la máquina. Esto reduce el rendimiento y obliga a limpiar periódicamente.

En los caballetes pueden producirse atascamientos por el mal diseño de los mismos o por trabajar con granos muy sucios.

h) Adaptación a diferentes granos

Las máquinas de caballetes se adaptan para procesar granos de diferente peso y tamaño, pero hay que tener la precaución de reducir los caudales de aire cuando se trata de semillas livianas o pequeñas, por el peligro que las arrastre el aire hacia el exterior.

Las de columnas también se adaptan para diferentes granos, siempre que las semillas no sean más pequeñas que los agujeros de las paredes.

i) Temperatura de secado

Como las secadoras de caballetes hacen una más completa mezcla de aire caliente y grano, pueden utilizar temperaturas de secado más elevadas que las de columnas. En estas últimas las temperaturas deben ser algo menores para evitar daños excesivos a los granos.

j) Eficiencia de secado

Es mayor en las máquinas de caballetes, por las razones expuestas anteriormente. Ello significa que requieren menos kilocalorías por cada kg de agua evaporada que las de columnas. También pueden tener un menor consumo energético.

k) Contaminación al exterior

Ocasionan menor contaminación las secadoras de columnas porque arrojan una menor cantidad de basura al exterior, pues queda retenida en las paredes de las columnas. Las de caballetes, como no tienen paredes, los caballetes libres impulsan más material hacia afuera.

l) Limpieza final del grano

Por los mismos motivos recién expuestos al mencionar la contaminación al exterior, las secadoras de caballetes entregan el grano con mayor limpieza que las de columnas.

m) Fisurado del grano

Es posible que las secadoras de columnas originen más fisurado de granos que las de caballetes, a causa de que emplean un mayor caudal de aire, que ocasiona al grano tensiones más severas.

n) Pérdidas de calor

En las secadoras de caballetes, las pérdidas pueden ser mayores en el plenum de calor, pues las paredes laterales están en contacto con el aire ambiente por el lado externo. En cambio en las secadoras de columnas, las pérdidas son menores, porque el sentido de circulación del aire caliente es de adentro hacia afuera.

ñ) Limpieza de la máquina

Se hace más fácil en secadoras de caballetes, pues no tienen paredes perforadas. Estas paredes perforadas necesitan más tiempo para ser limpiadas.

o) Volumen de grano

Las secadoras de caballetes tienen un mayor volumen de grano en su interior que las de columnas de similar tamaño, lo cual les permite un secado más lento por medio de una mayor exposición al aire de secado.

3.4.6 Cálculo de la capacidad necesaria de secado

Vamos a tratar dos casos para calcular la capacidad óptima que debiera tener una secadora. El primero se refiere a un productor y el segundo, a plantas de acopio.

Caso 1°: Productor

Un productor agrícola que quiera poseer su propia secadora, puede calcular la capacidad necesaria de secado, en base a sus operaciones de cosecha. Con este fin debe aplicar esta fórmula.

Capacidad = [Capacidad cosechadora (t/h) x horas diarias de cosecha x 1.20] / Horas diarias de secado

Este valor 1,20 permite un 20% de tolerancia por mayor rendimiento del cultivo o de la máquina.

Ejemplo:

Capacidad cosechadoras: 15t/hora

Horas diarias de cosecha: 8 horas

Horas diarias de secada: 16 boros

Capacidad secadora = $[15 \times 8 \times 1.20] / 16 = 9 \text{ t/h}$

Será suficiente una secadora de 9 t por hora para ir secando, por ejemplo, durante la noche la producción diaria. Debe tenerse presente que la capacidad de una secadora está dada para extraer humedad ente 18 y 13,5% o cifras aproximadas.

Cuando las humedades son mayores, la capacidad de la secadora se resiente bastante.

Caso 2°: Planta de acopio

No puede pretenderse instalar una capacidad de secado igual o mayor que las máximas recepciones diarias de grano húmedo, pues significaría una inversión excesiva.

Conviene calcular el promedio de recepción diaria de grano húmedo en toda la temporada, y fijar una capacidad de secado mayor a ese dato.

También, se puede tomar el promedio de las recepciones diarias de grano húmedo de los tres días consecutivos de mayor recepción, y fijar una capacidad de secado algo menor.

Ejemplo: Una planta recibe en los tres días de máxima recepción un promedio de 15 camiones de 30 t con humedad de café del 24%. Son 450 t diarias y si la secadora trabaja

16 horas, resulta una capacidad de 28 t/h. A esas humedades se requiere una secadora de 50 t/h (datos de fábrica, capacidad nominal), pudiéndose elegir una máquina de 40-45 t/h.

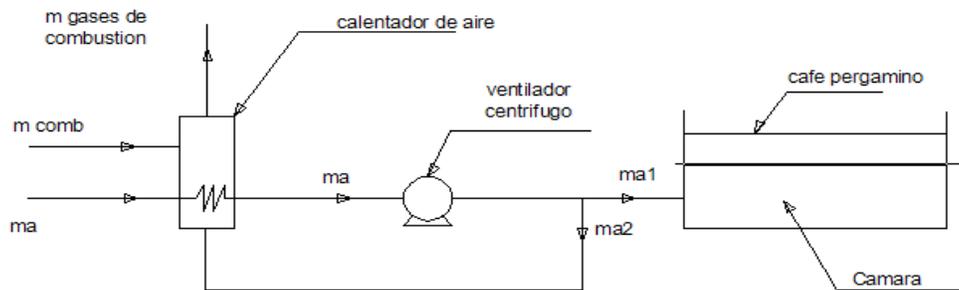
3.5 CAPITULO V

3.5.1 Cálculo del flujo másico y caudal de aire para un ventilador, utilizado en una secadora de café de capacidad de un quintal y que funciona con glp

El objetivo del presente cálculo es conocer cuál es el flujo másico de aire que se debe suministrar para secar una masa de café en un tiempo determinado para seleccionar en forma correcta el ventilador.

Se realiza el cálculo de masa y Caudal de aire para ser validado en la práctica-

La humedad inicial del café está entre los 40% a 59% y la humedad final debe estar entre 10 y 12%, y la temperatura del aire que pasa por los granos de café debe de estar entre 45°C y 55°C.



Esquema de la Instalacion de Secado de Cafe

Figura 9. Esquema secador de aire.

3.5.1.1 Cálculo del flujo másico de aire transportado por el ventilador

Para calcular el flujo másico de aire que pasa a través del ventilador se deben calcular y sumar el flujo másico de aire que pasa a través del café y el flujo másico de aire que se dirige hacia la cámara de combustión (ver Figura 9).

Cálculo del flujo másico de aire que pasa a través del café

Es importante conocer cuál debe ser el flujo de masa de aire 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 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 η_s

$$\dot{Q}_{w1} = \eta_s \cdot \dot{Q}_{a1}$$

Ecuación 10

\dot{Q}_w = Calor de vaporización ganado por el café

η_s = Eficiencia de secado

\dot{Q}_{a1} = Calor perdido o cedido por el aire

$$\dot{m}_w \cdot (Cp_w \cdot \Delta T_w + h_{fg}) = \eta_s \cdot m_{a1} \cdot Cp_{a1} \cdot \Delta T_{a1}$$

$$\dot{m}_{a1} = \frac{\dot{m}_w \cdot (Cp_w \cdot \Delta T_w + h_{fg})}{\eta_s \cdot Cp_{a1} \cdot \Delta T_{a1}}$$

Ecuación No. 27

En la ecuación No. 27

\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

ΔT_w = es el cambio de temperatura que experimenta el café en la etapa del secado

h_{fg} = es la entalpía de vaporización del agua

Cp_{a1} = es el calor específico para el aire atmosférico

ΔT_{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:

$$\dot{m}_w = \frac{m_{cafe}}{t} \cdot (w_0 - w_f)$$

Ecuación No. 28

Siendo:

m_{cafe} = es la masa de café pergamino a secar

w_0 Y w_f son la humedad inicial y final del café respectivamente

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_{cafe} depende del tamaño del secador y las capacidades más comunes de silos industriales pueden ser de 150, 200, 300 arrobas, etc.

La humedad inicial w_0 con la que entra el café luego de ser cosechado. al secador está entre 48% y 55% 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%. 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 28 en la ecuación 27 se obtiene la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_{a1} = \frac{\dot{m}_{cafe} \cdot (w_0 - w_f) (Cp_w \cdot \Delta T_w + h_{fg})}{t \cdot \eta_s \cdot Cp_{a1} \cdot \Delta T_{a1}}$$

Ecuación No.29

Para nuestro cálculo se desea secar 1 quintal de café entonces tenemos:

1 quintal = 3,94 arrobas @ = 100 libras lb = 45.36 Kilogramos Kg

Tiempo 24 Horas = 86400 segundos s

La humedad inicial del café es de $w_0 = 50\%$ (0.5)

La humedad final del café es de $w_f = 11\%(0.11)$

La temperatura del aire de secado debe estar entre $45\text{ }^\circ\text{C}$ y $55\text{ }^\circ\text{C}$ o puede ser menor; si se utilizan temperaturas mayores a $55\text{ }^\circ\text{C}$ se puede producir un sobre secado de las capas exteriores de los granos de café.

Las temperaturas de entrada y salida para el aire y el agua en el café se tabulan en la siguiente tabla.

T_{a1} = temperatura del aire

T_w = temperatura del agua

Con los datos de la temperatura se calcula los cambios de temperatura para el aire y el agua del café.

$$\begin{aligned}\Delta T_{a1} &= T_{a1} \text{ entrada} - T_{a1} \text{ salida} \\ &= 40 - 20 = 20^\circ\text{C}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta T_w &= T_w \text{ entrada} - T_w \text{ salida} \\ &= 15 - 35 = 20^\circ\text{C}\end{aligned}$$

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 las tablas [1] y [2] se extraen los valores del calor específico para el agua y de la entalpía de vaporización:

Cp_w = Calor específico

H_{fg} = Entalpía de Vaporización

$Cp_w = 1.88 \text{ kJ/Kg. }^\circ\text{C}$

$H_{fg} = 2442.2 \text{ kJ/kg}$

La temperatura promedio del aire durante la etapa de secado es

$$T_{a1\text{ prom}} = (40 + 20) \text{ }^\circ\text{C} / 2 = 30^\circ\text{C}.$$

Con $T_{a1\text{ prom}}$ y de la tabla [3] se obtiene el calor específico para el aire:

Tenemos:

$$\begin{aligned} \text{ }^\circ\text{K} &= \text{ }^\circ\text{C} + 273.14 \\ &= 30 + 273.14 \\ &= 303.14 \end{aligned}$$

En la tabla siguiente datos de temperatura de:

$^\circ\text{K}$	Calor específico kJ/Kg. $^\circ\text{k}$
300	1.006
350	1.009

Como la temperatura es de 303.14, se realiza una interpolación con la siguiente fórmula:

$$y = \frac{(x - x_1)}{(x_2 - x_1)}(y_2 - y_1) + y_1$$

Ecuación 28

$$x_1 \quad 300 \qquad 1.006 \quad y_1$$

$$x \quad 303.14 \quad \text{¿y?}$$

$$x_2 \quad 350 \qquad 1.009 \quad y_2$$

Reemplazando tenemos:

$$y = \frac{(303.14 - 300)}{(350 - 300)}(1.009 - 1.006) + 1.006$$

$$y = 1.0061884 \text{ KJ/Kg } ^\circ\text{C}$$

Si se reemplaza todos los valores ya conocidos en la ecuación 29, el flujo másico de aire, queda expresado en función de la masa de café m_{cafe} y la eficiencia del secado η_s :

$$\dot{m}_{a1} = \frac{\dot{m}_{cafe} \cdot (w_0 - w_f) (Cp_w \cdot \Delta T_w + h_{fg})}{t \cdot \eta_s \cdot Cp_{a1} \cdot \Delta T_{a1}}$$

$$\dot{m}_{a1} = \frac{m_{cafe} (0.5 - 0.11) (1.88 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} \times 20^\circ\text{C} + 2442.3 \text{ kJ/kg})}{\eta_s \cdot 86400 \text{ seg} \times 1.0061884 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} \times 20^\circ\text{C}}$$

$$\dot{m}_{a1} = \frac{m_{cafe} (0.39) \times (2479.9)}{\eta_s \cdot 1738693.555}$$

$$\dot{m}_{a1} = 5.56 \times 10^{-4} \frac{m_{cafe}}{\eta_s}$$

Ecuación 29

Si en la ecuación 29, la eficiencia de secado η_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_{cafe} (ver tabla 14).

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 11, con diferentes eficiencias de secado desde 20% hasta el caso ideal de 100%

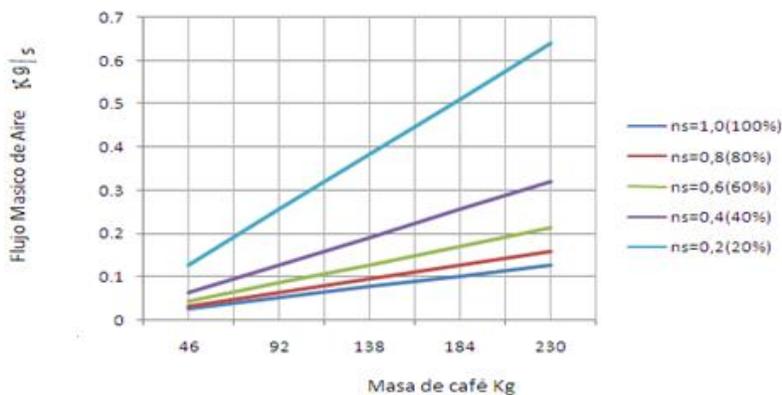


Figura 11. Gráfica de masa de café contra flujo másico de aire (tiempo de secado: 24 horas).

Para obtener el caudal en **cfm(cubicfoot per minut)** se debe multiplicar el caudal de aire normal por 2116,8 y para obtener en **scfm/@** se divide el valor para la cantidad de @ que se tenga

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, $\rho = 1,2 \text{ Kg/m}^3$

Ejemplo:

Según la figura 2, si por ejemplo se desea secar 200 arrobas de café (2302 kg) en 24 horas (86400 s), y si la eficiencia del secado es 50% (0,5), entonces se debe hacer pasar por entre los granos de café un flujo másico de aire de 2,6 kg/s o un caudal de 2,166 m³/s (4586,4 scfm, donde la significa 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 **22,9 scfm/@** de café húmedo.

$$\dot{m}_{a1} = 5.56 \times 10^{-4} \frac{2302}{0.5}$$

$$\dot{m}_{a1} = 2.559824$$

Aproximadamente $\dot{m}_{a1} = 2.6$

$$\text{caudal de aire normal} = \frac{\dot{m}_{a1}}{\text{densidad del aire normal}}$$

$$\text{caudal de aire normal} = \frac{2.6 \frac{\text{kg}}{\text{seg}}}{1.2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}$$

$$\text{caudal de aire normal} = 2.16666 \frac{\text{m}^3}{\text{seg}}$$

Para convertirlos en **scfm** tenemos:

$$scfm = \text{caudal de aire normal} \times 2116,8$$

$$scfm = 2.16666 \times 2116,8$$

$$scfm = 4586.4$$

Y en **scfm/@**

$$scfm/@ = \frac{scfm}{@}$$

$$scfm/@ = \frac{4586.4 \text{ scfm}}{200 @}$$

$$scfm/@ = 22.93 \text{ scfm/@}$$

3.5.1.2 Cálculo 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} = Flujo másico de aire para la combustión

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

Ecuación 30

En donde:

\dot{m}_{comb} = flujo de masa del combustible

AC = es la relación de aire- combustible

ACT es la relación de aire-combustible teórico

e = 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 el dato con el que se consume una masa de combustible m_{comb}

$$\dot{m}_{com} = \frac{m_{comb}}{t}$$

Ecuación 31

Mediante ensayos de campo realizados por el Centro Nacional de Investigaciones del Café (CENICAFE Colombia), determinaron que en un Secador Intermitente de Flujos Concurrentes se puede secar 3,22 kg de café pergamino seco con un kilogramo de cisco.

Es decir que para secar 200 arrobas de café pergamino se necesitan 776,4 kg de cisco

Cisco (cascarilla de café pergamino seco) se utilizaría como combustible en el secador

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:

$$\dot{Q}_{comb2} = \dot{Q}_{comb1}$$

Ecuación 32

En donde:

$$\eta_{cc2} \cdot m_{comb2} \cdot \Delta h_{comb2} = \eta_{cc1} \cdot m_{comb1} \cdot \Delta h_{comb1}$$

Entonces tenemos:

$$m_{comb2} = m_{comb1} \cdot \frac{\Delta h_{comb1}}{\Delta h_{comb2}} \cdot \frac{\eta_{cc1}}{\eta_{cc2}}$$

Ecuación 33

En la ecuación tenemos:

m_{comb1} Y m_{comb2} son la masa de combustible 1 y 2 respectivamente Δh_{comb1} y Δh_{comb2} son el poder calorífico de los combustibles 1 y 2

n_{cc1} Y n_{cc2} son las eficiencias de combustión, cuyos valores son de **0,98** tanto para n_{cc1} como n_{cc2} para el GLP. Para este ejemplo el combustible 1 es el cisco y el combustible 2 puede ser carbón, cascarilla de arroz, ACPM, etc.

En la tabla 16 se puede encontrar los valores de poder calorífico para diferentes combustibles que se pueden utilizar en el secado de café.

Para saber cuál es la masa de GLP que se debe utilizar para reemplazar la masa de cisco se utiliza la ecuación 33, asumiendo que las eficiencias de combustión son iguales tenemos:

$$m_{comb2} = \frac{m_{comb1} \times \Delta h_{comb1}}{\Delta h_{comb2}}$$

$$m_{combGLP} = m_{cisco} \times \frac{\Delta h_{cisco}}{\Delta h_{GLP}}$$

Ecuación 34

Si la masa de cisco es 776.4 kg, para 24 horas de secado, entonces la masa de GLP debe ser:

$$m_{combGLP} = 776,4 \text{ kg} \times \frac{17936 \text{ kJ/kg}}{49807 \text{ kJ/kg}}$$

$$m_{combGLP} = 279.58 \text{ kg}$$

Con la ecuación 31 se puede calcular el gasto másico de GLP. Según la ecuación 31, la masa de GLP 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 GLP es entonces:

$$\dot{m}_{GLP} = \frac{m_{GLP}}{t}$$

$$\dot{m}_{GLP} = \frac{279.51 \text{ kg}}{86400 \text{ seg}}$$

$$\dot{m}_{GLP} = 3.24 \times 10^{-3} \text{ kg/seg}$$

El valor anterior es de $\dot{m}_{GLP} = 3.24 \times 10^{-3} \text{ kg/seg}$ para 200 @ = 2302.5 Kg

Como nuestro secador es para 45.36 Kg tenemos un valor de

Durante las 24 Horas $\dot{m}_{GLP} = 6.38 \times 10^{-5} \text{ kg/seg}$

Luego calculamos el valor de la masa de combustible por hora entonces tenemos:

$$\dot{m}_{GLP} = 0.22968 \text{ kg/hora}$$

La relación ACT se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$ACT = 11,53.C + 34,5.(H - O/g) + 4,3.S$$

Ecuación 35

Como se tiene el valor (a relación aire combustible teórico ACT), para el GLP es de 5.8

Según el Manual de Instalaciones de GLP cuyo autor es José Emilio López Sopena, el exceso de aire (e) se recomienda que este entre 25% y 30% según el tipo de aire. Para el GLP el exceso de aire se toma de 30% (0,3).

Con estos datos obtenidos se procede a reemplazar en la ecuación 30

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

$$\dot{m}_{a2} = \dot{m}_{GLP} \times ACT \times (1 + e)$$

$$\dot{m}_{a2} = 6.38 \times 10^{-5} \times 5.8 \times (1 + 0.3)$$

$$\dot{m}_{a2} = 4.81052 \times 10^{-4} \text{ kg/seg}$$

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}

$$\dot{m}_a = \dot{m}_{a1} + \dot{m}_{a2}$$

Ecuación 36

Los valores calculados para

$$\dot{m}_{a1} = 0.025576 \text{ kg/seg}$$

$$\dot{m}_{a2} = 4.81052 \times 10^{-4} \text{ kg/seg}$$

$$\dot{m}_a = 0,025576 \text{ kg/seg} + 4.81052 \times 10^{-4} \text{ kg/seg}$$

$$\dot{m}_a = 0,026038652 \text{ kg/seg}$$

De la ecuación 36 se obtiene que el flujo másico de aire que debe mover el ventilador es de $0,026038652 \text{ kg/seg}$, que equivalen a un caudal de aire normal ($1,2 \text{ Kg/m}^3$) de **$0.021626787 \text{ m}^3/\text{s}$ (45.78 scfm)**.

La referencia tomada de Centro Nacional de Investigaciones del café CENICAFE recomienda $25 \text{ m}^3/\text{min} - \text{m}^3$ de café, ó $66 \text{ m}^3/\text{min} - \text{ton cps}$, café pergamino seco.

Para el ejemplo, de las 3.94 arrobas (0.0453592 ton), este criterio permitiría obtener:

$$66 \text{ m}^3/\text{min} - \text{ton cps}$$

$$\frac{66 \text{ m}^3/\text{min} - \text{ton cps} \times 0.0453592 \text{ ton}}{60 \text{ seg}}$$

$$0.04989512 \text{ m}^3/\text{seg}$$

4. Materiales y Métodos

4.1 Materiales

Los materiales utilizados fueron:

Humeo metros

Computadora

Sensor de Temperatura

4.2 Métodos

- Método experimental

-Método Inductivo

- Método Deductivo

4.2.1 Técnicas

- Técnica de observación

- Técnica Experimental

- Técnica de Medición

- Entrevistas

La metodología utilizada en el presente trabajo fue la Observación, recopilación de datos tanto de humedad del sitio, como de cantidad de café cosechado entrevista con agricultores de la zona, métodos de secado utilizados por los agricultores, una vez obtenidos estos datos se procedió a realizar el cálculo de la secadora para finalmente realizar su diseño y construcción, se llego a la conclusión que la secadora debía cumplir con parámetros en cuanto a su costo permita ser adquirida por los señores agricultores y a su funcionamiento lo mas practica, eficiente posible, en primer instancia esta secadora se automatizo pero, para que pueda prestar sus servicios en el sitio se sugiere sea lo más practica posible, con el

mínimo de instrumentos electrónicos y eléctricos ya que realizando la observación en el sitio se concluye que no existen tiendas especializadas en caso de una avería, y las personas carecen de conocimiento acerca de las instalaciones eléctricas y electrónicas.

5.- RESULTADOS

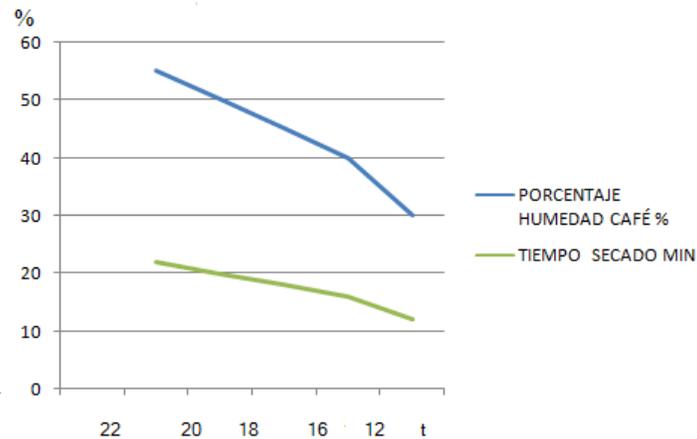
a).- Realizadas las pruebas del secador, con granos de café que contenían una humedad de 55% a 60% se obtuvieron los siguientes resultados:

Consumo de GLP = 1KG en 1 hora o 60 min.

Humedad de Café 55% a 60%

Temperatura del aire = 60 °C

PORCENTAJE HUMEDAD CAFÉ %	TIEMPO SECADO MIN	CONSUMO GLP KG
55	22	0.3667
50	20	0.3333
45	18	0.3000
40	16	0.2667



Como análisis de los resultados obtenidos tenemos que el tiempo de secado del café es directamente proporcional al porcentaje de humedad del mismo, ósea a mayor humedad mayor tiempo de secado esto dependiendo del grado de humedad del café.

El proceso metodológico seguido para la construcción del secador es el siguiente:

Visitas en lugar a los pequeños productores de café

Medición de temperatura de la zona y grado de humedad inicial del café

Observación de la forma de secado de café

Porcentaje optimo de humedad final de café

Con la obtención de estos datos se procedió a realizar el cálculo y posteriormente la construcción del secador.

Para realizar la comparación con otras tecnologías, pudimos comprobar que dentro de nuestro medio tenemos únicamente, secadores de maíz y de arroz ; de café tenemos algunos prototipos experimentales los cuales están instalados en la Universidad Nacional de Loja los mismos que son secadores solares constan de una cama de malla, de 1 metro y ½ de alto y cubiertos por un techo plástico, estos disminuyen el tiempo en el secado en un 40% pero se necesitan mucho espacio ya que el grano debe estar distribuido uniformemente y en una capa muy fina.

El secado al tendal es el más utilizado por los productores, con el inconveniente que el café debe ser movido constantemente para lograr un secado homogéneo y, no se dañe el producto aunque en lo referente a calidad y sabor con este proceso de secado se logra los mejores resultados.

CUADRO COMPARATIVO DE TIPOS DE SECADO

TIPO DE SECADO	CALIDAD DE CAFE	SABOR DE CAFE	TIEMPO DE SECADO	ESFUERZO
SECADOR SOLAR	BUENA	BUEN	36	Moviendo continuo
SECADO AL TENDAL	EXCELENTE	EXCELENTE	48 Dependiendo del clima	Moviendo continuo
SECADOR GLP	BUENA	BUEN	20 Minutos	Ningún Movimiento

6.-CONCLUSIONES

1. Luego de proceder a realizar la investigación así como pruebas obtenidas en el secado de café se determina que la temperatura óptima para el secado de café es de 55 a 60 °C, ya que pasado este rango se produce un sobre secado.
2. Obtenido los datos en cuanto a temperatura así como humedad existentes en el Cantón Yanzatza se ha procedido con el desarrollo de un tipo de secador el cual tiene el principio de circulación de aire, siendo una maquina muy útil para dicha región.
3. Se realizo la metodología para el cálculo, consiguientemente el diseño y la construcción del secador.
4. El estudio realizado ha permitido formular las condiciones de cálculo, diseño y construcción de un secador que cumple con los parámetros establecidos respecto de temperatura y tiempo para el secado de café in situ lo cual beneficiaria a los pequeños productores de café.
5. En el trabajo se logra el diseño y construcción de una máquina secadora de café, tomando como base la experiencia de diferentes diseñadores y constructores de maquinaria.
6. Se comparo el secado en la maquina, con el secado al tendal o al aire libre, llegando a la conclusión que con la secadora se disminuye en un 80% el tiempo así como el esfuerzo al secar, ya que se realiza el secado en unos 20 minutos mientras que dependiendo del clima en tendal va de tres días a una semana, y la eficacia es que se logra un tipo de secado más parejo sin necesidad de estar dando movimiento al producto, por otra parte si se busca calidad en el sabor y el aroma se recomienda realizar el secado al tendal.
7. Se realizo la socialización de la tesis, con los alumnos del Decimo Modulo, de la carrera de Ingeniería Electromecánica así también con algunos de los miembros de APEOSAE, dándoles a conocer sobre el funcionamiento y construcción del secador.

8. La tesis constituye un aporte a la enseñanza de la ingeniería electromecánica en la UNL dejando el diseño de una Máquina Secadora de Café para su explotación, además un gran impulso a los programas de capacitación artesanal en técnicas de la construcción en ingeniería electromecánica.

7.- RECOMENDACIONES

1. Dar continuidad a la investigación de nuevos diseños y métodos para la automatización de la producción.
2. Introducir el producto universitario en el mercado local, con calidad y competitividad.
3. Hacer extensiva la experiencia recogida en el presente trabajo, a los distintos sectores de la producción así como a las diferentes asociaciones dedicadas a la comercialización de café.

8.- PRESUPUESTO Y FINANCIAMIENTO

Presupuesto

Recopilación de la información	500,00
Materiales de oficina	200,00
Consultas Bibliográficas	120,00
Materiales eléctricos y mecánicos	3800,00
Movilización	500,00
Capacitación	1500,00
Gastos de impresión	200,00
Imprevistos	300,00

TOTAL:..... **7.120,00**

Financiamiento

El financiamiento será asumido en su totalidad por los aspirantes

9.- BIBLIOGRAFÍA

LIBROS

1. - BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. Drying Cereal Grains. Westport, Connecticut: The AVI Publ. Co. Inc., 1974, p.65; CASTRO, L. H.
- 2.- BERBERT, P. A.; QUEIROZ, D. M. Método para determinação de una equação para a entalpia de vaporização da água contida em grãos de café. Engenharia Rural 2(1):1-17, 1991;
- 3.- Castro M. Javier, Operación y Mantenimiento de Calderas, Centro de Publicaciones Universidad Nacional, Seccional Bogotá, Octubre de 2002.
- 4.- Cengel Yunus A., Termodinámica, Tomo II Segunda Edición, Mc GRAW-HILL, Méjico D.F., 1996.
- 5.- Centro Nacional de Investigaciones del Café. Unificación de Criterios en Beneficio Ecológico de Café. Chinchiná, Colombia: Cenicafé, Noviembre 23a 26 de 2004, p.p. 160-178
- 6.- Centro Nacional de Investigaciones del Café, “Pedro Uribe Mejía”. Curso básico de beneficio del café. Chinchiná, Colombia: Cenicafé, Octubre de 1989, p.p. 57-60.
7. - CLOUD, H. A.; MOREY, R. V. Dryeration and in-storage cooling for corn drying. St. Paul, MN. Agricultural Extension Service Report M-162, University of Minnesota, 1980, p.8;
- 8.- Fernández J Félix, Cátedra “Maquinas Térmicas” Capitulo No.1 Poder Calorífico
- 9.- Huenul, Julio. 2000. Generación y Distribución del Aire Comprimido, Apuntes de Oleo hidráulica, Neumática y Autómatas Programables P.L.C. Liceo Industrial de Concepción A-31, Concepción, Chile, pp. 119 a 127.
10. - John R. Howell, Richard O. Buckius (México, DF, 1990). Principios de termodinámica para ingenieros. Ed. Mc Graw Hill

- 11.- Kern Donal (México, 2006). Procesos de transferencia de calor. Ed CECSA
- 12.- Orosco HINCAPIE,. Carlos A., Aplicaciones de la Ingeniería Solar, Centro de Publicaciones Universidad Nacional, Seccional Manizales, Agosto1988.
- 13.- OROZCO HINCAPIE, Carlos A. Determinación de las curvas de comportamiento de un ventilador centrífugo a partir de datos de catálogo y de laboratorio, revista Scientia et Technica N° 16, Pereira, Colombia: UTP, Abril de 1996, pp 113-117.
- 14.- ROA M. Gonzalo, Beneficio Ecológico del Café, Primera edición, Cenicafé, Chinchiná, 1999, pp 160-179.
- 15.- Smith-Van Ness (México, 1992). Introducción a la termodinámica. Ed. Mc Graw Hill

10. ANEXOS

Procedimiento secado café

Se selecciona en el higrómetro el tipo de café que se procederá a secar



Se coloca el café en el recipiente con la medida para el higrómetro



Se procede a tomar datos respecto del porcentaje de humedad del café



Con los datos se coloca el café en el secador



Se procede a encender el secador



Se colocan datos de temperatura en el secador



Se toman datos de porcentaje de humedad de salida del café



Se mide el porcentaje de humedad final luego del secado



Se tabulan los datos



Finalmente se realiza el análisis de resultados



TABLAS

Tabla 1.- Conductividad térmica de algunos Materiales

MATERIAL	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (cal/s)(cm²°C/cm)	Conductividad Térmica (W/Mk)
PLATA	1.01	406.0
COBRE	0.99	385.0
BRONCE		109.0
ALUMINIO	0.50	205.0
HIERRO	0.163	
ACERO		50.2
VIDRIO	0.0025	0.8
CONCRETO	0.002	0.8
AGUA A 20 °C	0.0014	
FIBRA DE VIDRIO	0.00015	0.04
LADRILLO ROJO		0.6
MADERA	0.0001	0.12 a 0.04
AIRE A 0 °C	0.000057	0.02

Tabla 2.- Valores típicos de las propiedades de fluidos más usuales

Propiedad	Designación	Unidades	Valores	
			Agua	Aire
Masa específica	P	kg/m ³	1.000	1,2
Viscosidad	β	g/ms	1,0	0,02
Calor específico	Cp	J/kg°K	4.200	1.008
Presión de vapor (20°)	Pv	bar	0,023	-
Tensión Superficial	δ	mN/m	72,8	-

Tabla 3.-Terrazas o patios para secado de café natural

Tipos de terrazas o patios de secado al sol	Contenido de humedad después de 16 días de secado solar 1	Consumo de energía específica (Kj kg ⁻¹)
Suelo Duro	18.0	17.870
Ladrillo	14.2	16.600
Concreto	13.3	16.970
Asfalto	11.3	15.900

Tabla 4. Secado contra-corriente de café natural: efecto de la temperatura del aire de secado sobre el tiempo total de secado, requerimientos específicos de energía y velocidad de secado.

Temperatura del aire de secado (°C)	Tiempo de secado total (h)	Consumo de energía específica ($Kj\ kg^{-1}$)	Velocidad seco ($Kj\ h^{-1}$)
60	21.5	8.300	50.2
80	14.2	7.550	76.1
100	10.2	6.440	105.9

Tabla 5. Secador de café experimental de dos fases intermitentes de flujo Contracorriente y Con-corriente.

Temperatura del aire de secado (°C)	Tiempo de secado total (h)	Consumo de energía específica ($Kj\ kg^{-1}$)	Productividad ($seco\ Kj\ h^{-1}$)
80	22.5	6.070	200
100	15.7	5.660	290
120	12.6	5.680	360

Tabla 6. Valores diferenciados de contenido de humedad final (%) obtenidos durante la seca aireación de café natural en un secador de camada fija de 0,4m secando desde 28% a 11% con un flujo de aire de $15\ m^3\ min^{-1}\ m^{-2}$.

Temperatura (°C)	Periodos de acondicionamiento (h)		
	0	6	12
50	3.2	2.3	1.7
60	3.6	3.0	2.8
70	3.8	3.0	2.9

Tabla 7.- resumen del promedio de parámetros usados para la evaluación de la actuación del método de secado de flujo de aire invertido y el método tradicional de secado en la misma dirección del aire, con temperatura de aire de secado de 50°C.

Intervalos de Tiempo de inversión, h	*	3	4	6
Consumo específico de energía, Kj kg-1	9150	9438	9360	9286
Tiempo total de secado, h	12.7	13.1	13.0	12.9
Diferencia en el contenido de humedad % b.h	3.1	0.9	1.2	1.0
Índice de uniformidad %	33	100	83	100

*el método tradicional de flujo de aire en la misma dirección. Fuente BERBERT (1991)

Tabla 8.- Resumen del promedio de los parámetros de secado usados para la evaluación y los métodos de secado con flujo invertido del aire contra el método de secado tradicional en la misma dirección del aire, con temperatura de aire de secado de 70°C.

Intervalos de Tiempo de inversión, h	*	3	4	6
Consumo específico de energía, Kj kg-1	7147	7408	7282	7166
Tiempo total de secado, h	6.2	6.5	6.4	6.3
Diferencia en el contenido de humedad % b.h	5.4	1.8	2.5	5.2
Índice de uniformidad %	33	84	50	33

*el método tradicional de flujo de aire en la misma dirección. Fuente BERBERT (1991)

Tabla 9.- Capacidad nominal y real de secadoras

EXTRACCION	HUMEDAD	HERMA	CAPACIDAD NOMINAL t/h (para maiz)										AGUA A EVAPORAR
			REAL	90	80	70	60	50	40	30	20	10	
g	Puntos	g	Capacidad Real t/h										
35 a 13,5	21,5	24,85	14,7	13,0	11,4	9,8	8,1	6,5	4,9	3,3	1,6	0,8	248,5
32 "	18,5	21,39	17,0	13,1	13,3	11,4	9,5	7,6	5,7	3,8	1,9	0,9	213,9
30 "	16,5	19,07	19,1	17,0	14,9	12,7	10,8	8,5	6,4	4,2	2,1	1,1	190,7
28 "	14,5	16,76	21,7	19,3	16,9	14,5	12,1	9,7	7,2	4,8	2,4	1,2	167,6
26 "	12,5	14,45	25,2	22,4	19,9	16,8	14,0	11,2	8,4	5,8	2,8	1,4	144,5
25 "	11,5	13,29	27,4	24,4	21,3	18,3	15,2	12,2	9,1	6,1	3,0	1,5	132,9
24 "	10,5	12,14	30,0	26,7	23,4	20,0	16,7	13,3	10,0	6,7	3,3	1,7	121,4
23 "	9,5	10,99	33,2	29,5	25,8	22,1	18,4	14,8	11,1	7,4	3,7	1,8	109,9
22 "	8,5	9,83	37,1	33,0	28,8	24,7	20,6	16,5	12,4	8,2	4,1	2,1	98,3
21 "	7,5	8,67	42,0	37,4	32,7	28,0	23,4	18,7	14,0	9,3	4,7	2,3	86,7
20 "	6,5	7,51	48,5	43,1	37,7	32,4	27,0	21,8	16,2	10,8	5,4	2,7	75,1
18 "	5,5	6,36	57,3	50,9	44,8	38,2	31,8	25,5	19,1	12,7	6,4	3,2	63,6
18 "	4,5	5,20	70,1	62,3	54,5	46,7	38,9	31,2	23,4	15,6	7,8	3,9	52,0
17 "	3,5	4,05	90,0	80,0	70,0	60,0	50,0	40,0	30,0	20,0	10,0	5,0	40,5
16 "	2,5	2,89	128,1	112,1	98,1	84,1	70,1	56,1	42,0	28,0	14,0	7,0	28,9
15 "	1,5	1,73	210,7	187,3	163,9	140,5	117,1	93,8	70,2	46,3	23,4	11,7	17,3
			Capacidad en quintales - punto/h										
			3150	2800	2450	2100	1750	1400	1050	700	350	175	
Poder de evaporación													
Kg agua/			3545	3240	2835	2430	2025	1620	1215	810	405	202,5	

Tabla 10.- Temperaturas de entrada y salida de aire y agua

Ta1	entrada °C	40
Ta1	salida °C	20
Tw	entrada °C	15
Tw	salida °C	35

Tabla 11.- Calor Especifico

Temperatura °C	VAPOR DE AGUA HUMEDO									
	Densidad Kg/m ³		Calor especifico kJ/Kg °C		Conductividad térmica W/m °C		Viscosidad dinámica η. 10 ³ (Kg/m seg.)		Número de Prandtl Pr	
	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor
0	1000	0,0049	4,21	1,86	0,569	0,0163	1,75	0,0085	13,00	0,97
5	1000	0,0068	4,20	1,86	0,578	0,0167	1,50	0,0087	10,90	0,96
10	1000	0,0094	4,19	1,86	0,587	0,0171	1,30	0,0088	9,29	0,96
15	999	0,0128	4,19	1,87	0,595	0,0175	1,14	0,0090	7,99	0,96
20	998	0,0173	4,18	1,87	0,603	0,0179	1,00	0,0092	6,95	0,96
25	997	0,0230	4,18	1,88	0,611	0,0183	0,89	0,0094	6,09	0,96
30	996	0,0304	4,18	1,88	0,618	0,0187	0,80	0,0095	5,39	0,96
40	992	0,0512	4,18	1,89	0,632	0,0195	0,59	0,0100	3,89	0,95
60	983	0,130	4,19	1,91	0,653	0,0212	0,46	0,0106	2,97	0,95
80	972	0,293	4,20	1,95	0,670	0,0229	0,351	0,0113	2,20	0,96
100	958	0,598	4,22	2,01	0,681	0,0248	0,279	0,1120	1,73	0,97
125	939	1,30	4,26	2,12	0,687	0,0273	0,220	0,0130	1,36	1,01
150	917	2,55	4,32	2,29	0,687	0,0300	0,181	0,0139	1,14	1,07
200	865	7,86	4,51	2,91	0,665	0,0375	0,134	0,0157	0,91	1,22
250	799	19,98	4,87	3,94	0,616	0,0495	0,107	0,0175	0,85	1,39
300	712	46,19	5,65	6,18	0,541	0,0720	0,085	0,0198	0,89	1,70

Tabla 12.- Propiedades del Agua

Propiedades del agua saturada (líquido-vapor): Tabla de temperaturas

Temp.	Presión bar	Volumen específico m ³ /kg		Energía interna kJ/kg		Entalpia kJ/kg			Entropía kJ/kg, K	
		Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Vapor sat.	Vapor vaporiz.	Líquido sat.	Vapor sat.
		v _f x 10 ³	v _g	u _f	u _g	h _f	h _{fg}	h _g	s _f	s _g
.01	0,00611	1,0002	206,136	0,00	2375,3	0,01	2501,3	2501,4	0,0000	9,1562
4	0,00813	1,0001	157,232	16,77	2380,9	16,78	2491,9	2508,7	0,0610	9,0514
5	0,00872	1,0001	147,120	20,97	2382,3	20,98	2489,6	2510,6	0,0761	9,0257
6	0,00935	1,0001	137,734	25,19	2383,6	25,20	2487,2	2512,4	0,0912	9,0003
8	0,01072	1,0002	120,917	33,59	2386,4	33,60	2482,5	2516,1	0,1212	8,9501
10	0,01228	1,0004	106,379	42,00	2389,2	42,01	2477,7	2519,8	0,1510	8,9008
11	0,01312	1,0004	99,857	46,20	2390,5	46,20	2475,4	2521,6	0,1658	8,8765
12	0,01402	1,0005	93,784	50,41	2391,9	50,41	2473,0	2523,4	0,1806	8,8524
13	0,01497	1,0007	88,124	54,60	2393,3	54,60	2470,7	2525,3	0,1953	8,8285
14	0,01598	1,0008	82,848	58,79	2394,7	58,80	2468,3	2527,1	0,2099	8,8048
15	0,01705	1,0009	77,926	62,99	2396,1	62,99	2465,9	2528,9	0,2245	8,7814
16	0,01818	1,0011	73,333	67,18	2397,4	67,19	2463,6	2530,8	0,2390	8,7582
17	0,01938	1,0012	69,044	71,38	2398,8	71,38	2461,2	2532,6	0,2535	8,7351
18	0,02064	1,0014	65,038	75,57	2400,2	75,58	2458,8	2534,4	0,2679	8,7123
19	0,02198	1,0016	61,293	79,76	2401,6	79,77	2456,5	2536,2	0,2823	8,6897
20	0,02339	1,0018	57,791	83,95	2402,9	83,96	2454,1	2538,1	0,2966	8,6672
21	0,02487	1,0020	54,514	88,14	2404,3	88,14	2451,8	2539,9	0,3109	8,6450
22	0,02645	1,0022	51,447	92,32	2405,7	92,33	2449,4	2541,7	0,3251	8,6229
23	0,02810	1,0024	48,574	96,51	2407,0	96,52	2447,0	2543,5	0,3393	8,6011
24	0,02985	1,0027	45,883	100,70	2408,4	100,70	2444,7	2545,4	0,3534	8,5794
25	0,03169	1,0029	43,360	104,88	2409,8	104,89	2442,3	2547,2	0,3674	8,5580
26	0,03363	1,0032	40,994	109,06	2411,1	109,07	2439,9	2549,0	0,3814	8,5367
27	0,03567	1,0035	38,774	113,25	2412,5	113,25	2437,6	2550,8	0,3954	8,5156

Tabla 13.- Valores Densidad y Calor Especifico Aire

AIRE

Temperatur °K	Densidad ρ (Kg/m ³)	Calor especifico c _p kJ/Kg°C	Visc. dinám. η · 10 ³ (Kg/m·seg)	Visc. cinem. ν · 10 ⁶ (m ² /seg)	Conductiv. térmica "k" W/m°C	Dif. térmica α · 10 ⁴ (m ² /seg)	Nº de Prandi Pr
100	3,6010	1,027	0,692	1,92	0,0092	0,0250	0,770
150	2,3675	1,010	1,028	4,34	0,0137	0,0575	0,753
200	1,7684	1,006	1,329	7,49	0,0181	0,1017	0,739
250	1,4128	1,005	1,488	10,53	0,0223	0,1316	0,722
300	1,1774	1,006	1,983	16,84	0,0262	0,2216	0,708
350	0,9980	1,009	2,075	20,76	0,0300	0,2983	0,697
400	0,8826	1,014	2,286	25,90	0,0336	0,3760	0,689
450	0,7833	1,021	2,484	31,71	0,0371	0,4222	0,683
500	0,7048	1,030	2,671	37,90	0,0404	0,5564	0,680
550	0,6423	1,039	2,848	44,34	0,0436	0,6532	0,680
600	0,5879	1,055	3,018	51,34	0,0466	0,7512	0,680
650	0,5430	1,063	3,177	58,51	0,0495	0,8578	0,682
700	0,5030	1,075	3,332	66,25	0,0523	0,9672	0,684
750	0,4709	1,086	3,481	73,91	0,0551	1,0774	0,686
800	0,4405	1,098	3,625	82,29	0,0578	1,1981	0,689
850	0,4149	1,109	3,765	90,75	0,0603	1,3097	0,692
900	0,3925	1,121	3,899	99,30	0,0628	1,4271	0,696
950	0,3716	1,132	4,023	108,20	0,0653	1,5510	0,699
1000	0,3524	1,142	4,152	117,80	0,0675	1,6779	0,702
1100	0,3204	1,160	4,440	138,60	0,0732	1,9690	0,704
1200	0,2947	1,179	4,690	159,10	0,0782	2,2510	0,707

Tabla 4. -Flujo másico de aire para secar la respectiva masa de café en 24 horas y eficiencia de secado de 100%.(caudal de aire calculado con la densidad del aire normal (a nivel del mar) de $1,2 \text{ Kg}/\text{m}^3$

t=24 horas y rendimiento $n_s = 1$ o 100%

MASA DE CAFÉ				Flujo masico de Aire	Caudal de Aire Normal
Quintales	Arrobas	Kilogramos	Libras	Kg/s	m^3/s
1	3.94	46	100	0.025576	0.02131
2	7.88	92	200	0.051152	0.04263
3	11.82	138	300	0.076728	0.06394
4	15.76	184	400	0.102304	0.08525
5	19.70	230	500	0.127880	0.10657

Tabla 15. -Gráfica de diferentes eficiencias en el secado o rendimientos

$$\text{Flujo de masa de aire } \dot{m}_{a1} = 5.56 \times 10^{-4} \frac{m \text{ cafe}}{n_s}$$

Datos para la Grafica de masa de café respecto del Flujo Masico de aire para un tiempo de secado de 24 Horas					
Masa de café Kg	FLUJOS MASICOS DE AIRE Kg/s				
	RENDIMIENTOS				
	100% = 1	80% = 0,8	60% = 0,6	40% = 0,4	20% = 0,2
46	0.025576	0.03197	0.0426	0.0639	0.1279
92	0.051152	0.06394	0.0853	0.1279	0.2558
138	0.076728	0.09591	0.1279	0.1918	0.3836
184	0.102304	0.12788	0.1705	0.2558	0.5115
230	0.127880	0.15985	0.2131	0.3197	0.6394

Tabla 16.- Poder calorífico para diferentes combustibles

Combustible	Poder calorífico, Δh_o (kJ/kg)
Cascarilla de café	17936
Coque	30514
ACPM	43475
Basura (celulosa)	19724
GLP	49807
Gas natural	37188
Residuo de madera	15912
Bagazo de caña	8964