

DES
506
385c
195
s 1

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA



CARACTERIZACION DE EQUIPOS DE SECADO DE CAFE
EXISTENTES EN BENEFICIOS DE EL SALVADOR

PRESENTADO POR:

HECTOR GUILLERMO ALVARADO RODRIGUEZ
KAREN DEL PILAR LOPEZ ALFARO

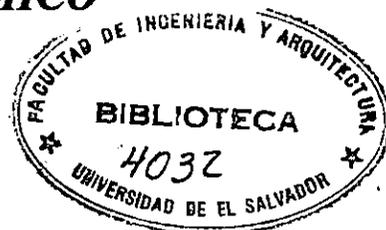
15100925

PARA OPTAR AL TITULO DE:

INGENIERO QUIMICO

15100925

MAYO DE 1995



SAN SALVADOR,

EL SALVADOR,

CENTRO AMERICA

SECRET
UNITED STATES DEPARTMENT OF STATE

COORDINATION
OF UNITED STATES FOREIGN POLICY

STATE DEPARTMENT
OFFICE OF LIAISON AND COORDINATION

WASHINGTON, D.C.

FOR INFORMATION OF THE SECRETARY OF STATE
AND THE ASSISTANT SECRETARIES

CONFIDENTIAL

SECRET
UNITED STATES DEPARTMENT OF STATE
WASHINGTON, D.C.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA



TRABAJO DE GRADUACION

**CARACTERIZACION DE EQUIPOS DE SECADO DE CAFE
EXISTENTES EN BENEFICIOS DE EL SALVADOR**

PRESENTADO POR:

**HECTOR GUILLERMO ALVARADO RODRIGUEZ
KAREN DEL PILAR LOPEZ ALFARO**


**ING. ITALO ANDRES CORDOVA FLAMENCO, M.
COORDINADOR**




**ING. FERNANDO CALDAS, Ph.D.
ASESOR**

Handwritten scribbles or marks in the top left corner.



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

DR. FABIO CASTILLO FIGUEROA
RECTOR

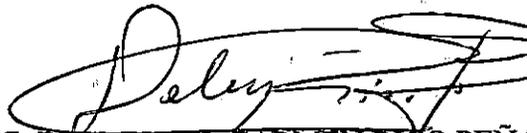
LIC. JUSTO ROBERTO CAÑAS LOPEZ
SECRETARIO GENERAL

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

ING. JOAQUIN ALBERTO VANEGAS AGUILAR
DECANO

ING. JOSE RIGOBERTO MURILLO CAMPOS
SECRETARIO

ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA


ING. DELMY DEL CARMEN RICO PEÑA
DIRECTORA



AGRADECIMIENTOS

Expresamos sinceros agradecimientos por la ayuda brindada en el desarrollo del presente trabajo de graduación a la personas e instituciones siguientes:

■ Fundación Salvadoreña para Investigaciones del Café (PROCAFE)

Dr. Sergio Gil
Dr. Fernando Caldas
Dra. Yolanda Orellana
Sra. Mirna de Marín
Ing. Yuri Renderos

■ mpm Consultores Integrados

Lic. Carlos Moreno
Ing. Howard Morales
Lic. Luis Pineda
Sr. Héctor Pérez

■ Escuela de Ingeniería Química

Ing. Delmy del Carmen Rico Peña
Ing. Italo Andrés Cordova Flamenco

DEDICATORIA

A Dios Todopoderoso, por alumbrarme el camino a seguir.

A mis padres Héctor Armando y María Delia por ser excelentes, al darme apoyo, confianza y fortaleza para seguir adelante.

A mis hermanos Roberto Enrique y Nora Beatriz quienes siempre han sido un punto de apoyo y por ser tan buenas personas.

A Francisco y Howard quienes me apoyaron e influyeron de gran manera en el desarrollo y culminación de mis estudios

A familiares y amigos que de una u otra forma me ayudaron e impulsaron a lograr mis objetivos al darme fe.

Héctor Guillermo

DEDICATORIA

La prosperidad viene de Jehová.

Si Jehová no edificare la casa, en vano trabajan los que la edifican

Si Jehová no guardare la ciudad, en vano vela la guardia.

Salmos 127: 1

Porque el que se cree ser algo, no siendo nada, a sí mismo se engaña.

Así que, cada uno someta a prueba su propia obra, y entonces tendrá

motivo de gloriarse sólo respecto de sí mismo, y no en otro; porque

cada uno llevará su propia carga.

Gálatas 6: 3 - 5

Dedico éste trabajo a la familia, así como a las personas especiales que DIOS

dispuso en mi camino para brindarme apoyo, comprensión, orientación; en

síntesis, la energía que emana del amor.

Karen del Pilar López Alfaro.

RESUMEN

El objetivo principal de esta investigación fue la caracterización de los sistemas de generación de calor y de secado en beneficios de café de El Salvador, lo que permite realizar un diagnóstico de las condiciones de operación de los equipos utilizados en la etapa de secado del café, incluyendo el uso de residuos sólidos del procesamiento del café, con lo que se pretende aprovechar eficientemente los recursos renovables disponibles como fuentes de energía; toda esta información proporciona pautas útiles para volver a la etapa de secado más eficiente y rentable en cuanto al uso de las diferentes máquinas sin perjuicio de la calidad del grano, facilitando además, la escogitación entre los sistemas de generación de calor.

La presente investigación fue realizada en dos etapas: a) Caracterización de los equipos de generación de calor y de secado y b) Medición de parámetros técnicos de operación. La caracterización de los equipos de generación de calor y de secado comprende la medición de los parámetros geométricos necesarios para especificar el dimensionamiento de los equipos, para sus respectivas diagramaciones, especificaciones técnicas de operación y materiales de construcción. La medición de parámetros técnicos de operación incluye la medición de flujos de aire, presión, temperatura de bulbo seco de los sistemas, temperatura de la superficie-aire de los sistemas. También, se evaluó el consumo de combustibles durante el período de prueba; finalmente se presenta el balance de energía neta (útil entregada por el sistema y magnitud de las pérdidas de calor) en hornos y calderas.

Las máquinas secadoras encontradas en los beneficios visitados y caracterizadas son: Secadora Cilíndrica Vertical tipo Pacas, Secadora de Cilindro Horizontal Rotativo (Guardiola) y la Secadora de Columna Vertical.

De los sistemas de generación de calor (Hornos y Calderas), son tres los tipos de

hornos caracterizados: Quemador de Cascarilla, Calderín (ambos de fuego indirecto) y el horno Geka (de fuego directo). La eficiencia energética de los hornos fue evaluada únicamente para los hornos de fuego indirecto por contar estos con superficie de transferencia de calor, resultando una eficiencia energética entre 20 y 50%.

De las calderas caracterizadas, se encontró que todas son del tipo tubos de humo, pero difieren unas de otras en cuanto a si poseen o no sistema precalentador de aire, parrilla, y también, a si el horno contacta o no directamente la coraza. De estas, se reporta una con la mayor eficiencia energética de 62.70 % y otra con el valor menor de 16.15 %.

INDICE

Contenido	página
Introducción	
1.0 Secado de Café	2
1.1 Generalidades	2
1.2 Mecanismo de Secado del Café	2
1.2.1 Contenido de Humedad del Café	4
1.2.2 Contenido de Humedad del Aire	4
2.0 Descripción de Máquinas de Secado	6
2.1 Presecadora	7
2.2 Secadora Cilindrica Vertical	9
2.3 Secadora de Cilindro Horizontal Rotativa	12
2.4 Secadora de Columna Vertical	15
3.0 Sistemas de Generación de Calor	20
3.1 Hornos	21
3.1.1 Hornos de Fuego Indirecto	23
3.1.1.1 Quemador de Cascarilla	24
3.1.1.2 Horno Tipo Calderín	26
3.1.2 Hornos de Fuego Directo	27
3.1.2.1 Horno Geka	29
3.2 Calderas	31
3.2.1 Calderas de Tubos de Humo	32
4.0 Parámetros de Comparación	37
4.1 Coeficiente Global de Transferencia de Calor	37

contenido	página
4.2 Balance Energético	41
4.2.1 Transmisión de Calor Util	41
4.2.2 Combustión y Pérdidas por Chimenea	47
4.2.3 Pérdidas en la Estructura del Horno	50
4.3 Eficiencia Energética	53
5.0 Combustión y Combustibles	56
5.1 Combustión	56
5.1.1 Aire en Exceso	57
5.1.2 Tiempo de Residencia	59
5.1.3 Temperatura	60
5.1.4 Turbulencia	64
5.1.5 Tiro	64
5.1.6 Eficiencia de Combustión	68
5.2 Combustibles	69
5.2.1 Análisis Aproximado de un Combustible	71
5.2.1.1 Análisis Químico	72
Observaciones	74
Conclusiones	76
Recomendaciones	78
Glosario	79
Referencias	83
Anexos	86
Anexo A. Resumen de Resultados de la Evaluación de Hornos y Calderas	87
Anexo B. Medidores de Flujo	102
Anexo C. Tablas de Parámetros Técnicos	114

INDICE DE TABLAS

TABLA	página
TABLA 2.1 Características Generales de la Secadora Cilíndrica Tipo Pacas	12
TABLA 2.2 Características Generales de la Secadora Tipo Guardiola	15
TABLA 2.3 Características Generales de la Secadora Tipo Duelas	16
TABLA 3.1 Características Generales del Quemador de cascarilla	26
TABLA 3.2 Características Generales del Calderín	27
TABLA 3.3 Características Generales de Calderas de Tubo de Humo	36
TABLA 4.1 Parámetros de Comparación	55
TABLA 5.1 Temperatura de Ignición en el aire	61
TABLA 5.2 Límites de Inflamabilidad en el aire	62
TABLA 5.3 Propiedades Químicas de los Combustibles Utilizados en el Beneficiado de Café	73

INDICE DE FIGURAS

FIGURA	página
FIGURA 2.1 Presecadora	8
FIGURA 2.2 Secadora Cilíndrica Vertical	10
FIGURA 2.3 Detalle de la Secadora Cilíndrica Vertical	11
FIGURA 2.4 Secadora Horizontal Tipo Guardiola	14
FIGURA 2.5 Secadora Horizontal de Duelas	18
FIGURA 2.6 Detalle de la Secadora Vertical de Duelas	19
FIGURA 3.1 Diagrama de Operación del Quemador de Cascarilla	25
FIGURA 3.2 Diagrama de Operación del Calderín	28
FIGURA 3.3 Diagrama de Operación del Horno Geka	30
FIGURA 3.4 Diagrama de Operación de Calderas de Tubos de Humo	34
FIGURA 3.5 Diagrama del Intercambiador de Calor	35
FIGURA 4.1 Perfil de Temperatura en un Sistema de Transferencia de Calor por Convección/ conducción	38
FIGURA 5.1 Esquema para la Demostración del Tiro Natural, que muestra la analogía entre una chimenea y un tubo en U con fluidos de densidades diferentes en cada rama	65

INTRODUCCION

El beneficiado de café, constituye una de las agroindustrias más importantes en el país, tanto por su importancia económica como por la gran cantidad de mano de obra directa que genera. Por ello, se realiza un diagnóstico de la efectividad con la que los beneficios operan; específicamente en la sección de secado la cual representa una problemática debido a la complejidad del proceso, pues ahí ocurren mecanismos de transferencia de calor y masa que requieren un control permanente de las condiciones de operación, dirigido a mantener la calidad del producto de un modo más eficiente. En esta etapa la demanda de energía es grande, generando una tendencia encaminada a obtener independencia energética, al sustituir combustibles derivados del petróleo por leña obtenida en la limpieza de los cafetales y cascarilla de café producida en el procesamiento del grano, acarreando una reducción en los costos de operación y por ende obteniéndose mayores utilidades.

Bajo este criterio, se presentan los diferentes equipos de generación de calor encontrados, verificando forma de operación y características de construcción que permitan efectuar una caracterización dirigida a detectar los focos donde se producen mayores pérdidas de calor y por consiguiente la efectividad en el aprovechamiento energético, mediante lo cual se pueden crear mecanismos encaminados a mejorar las instalaciones existentes. Además, la presente información contempla los conceptos básicos sobre el mecanismo de secado del café, así como una descripción de los principios generales de operación de las máquinas secadoras.

1.0 SECADO DE CAFE

1.1 GENERALIDADES

"Los granos de diversos cereales y otros productos agrícolas poseen cerca de 22 a 28 % de humedad antes de la etapa de secado y alrededor de 14 % al finalizar . Esta operación se vuelve sencilla al compararla con el secado de café, el cual es recibido de la etapa húmeda con un 55 ó 50% de humedad para ser secado hasta un 10 a 13 %; por lo cual, se hace necesario contar con instalaciones y equipo industrial para el secado de café" (Sivetz, 1963).

Dentro del beneficiado, el secado de café pergamino húmedo representa una de las operaciones a las que se le debe dar especial atención para mantener la calidad intrínseca del grano. A medida que la etapa de secado avanza, el proceso de secado se vuelve menos efectivo, empleando más energía para evaporar cantidades similares de agua al final del secado y elevando los costos de operación.

1.2 MECANISMO DE SECADO DEL CAFE

"El término secado se aplica a la transferencia de un líquido desde un sustrato húmedo hacia una fase gaseosa no saturada. En éste proceso se verifica transferencia simultánea de calor y masa (agua), por lo que han de considerarse conocimientos sobre mecánica de fluidos, naturaleza del sólido, métodos de obtención del calor, método de operación (lotes o continuo) y cantidades de energía consumida. Todo ésto, con el fin de mantener la calidad del producto y la economía del proceso" (Perry, 1984).

§

El proceso de secado de café pergamino húmedo usualmente se ejecuta en dos etapas: Presecado y Secado.

El café es un sólido orgánico poroso, por lo que el proceso de secado puede iniciarse (presecado) a través del empleo de métodos mecánicos como el escurrimiento y la centrifugación. Con estos métodos se consigue llevar el contenido de humedad del grano hasta el punto en que la aplicación de calor es indispensable, pues los métodos mencionados se tornan inoperantes. Al presecar el café se logran reducir los gastos de inversión y operación.

"Para estudiar el secado podemos distinguir dos niveles donde toma lugar: externamente, es decir, en la superficie y medio que circunda el material, e internamente, dentro del producto. La dinámica del secado de café ha sido poco estudiada, sin embargo mucho de lo que ocurre dentro del grano ha de responder a los mismos fenómenos observados por Luikov y otros autores en una serie de materiales porosos higroscópicos. Ellos sostienen que inicialmente, cuando el calor es aplicado al material, toda la energía disponible es empleada para evaporar el agua superficial, lo que provoca un flujo de humedad desde el interior hasta el exterior del producto, donde se encuentra una fina capa de aire y vapor de agua que recubre el grano.

Dentro del grano de café hay una compleja estructura de espacios vacíos interconectados llamados microcapilares, por donde el flujo de agua puede darse primeramente en forma líquida en respuesta a un gradiente hidráulico. Una vez que parte del agua ha sido evacuada, surgen bolsas de aire dentro de los capilares, lo cual dificulta el paso del líquido que aún se encuentra en el interior, forzándolo a avanzar entre las bolsas de aire y las paredes de los tubos de la pared, lo cual reduce aún más el flujo de agua hacia el exterior, que finalmente es transportado como vapor. La conductividad térmica del grano, lo cual es una medida de su capacidad de transferencia de calor, y se reduce al ir avanzando el secado y disminuir el contenido de agua en el material y aumentar la proporción de aire en los espacios vacíos. Todo esto dificulta la conducción de calor, que en síntesis, activa el mecanismo de migración del agua hacia la superficie del grano.

Para el caso del grano de café la dificultad en el transporte de agua y calor es agravada por la cámara de aire externa que existe entre la superficie del pergamino y la semilla propiamente dicha. Esta cámara de aire funciona como un excelente aislante térmico, lo que produce un efecto considerable en la prolongación de las etapas finales del secado de café.

En la delgada capa de aire y vapor de agua que recubre la superficie del grano es donde se verifica la transferencia de calor del aire hacia el material. La transferencia se da por convección, de ésta manera la película de aire y agua que recubre el producto transfiere parte del agua hacia otro menos saturado, el aire circundante. Este proceso se llama evaporación, y es controlado básicamente por la temperatura de la superficie del grano y la humedad del aire.

1.2.1 CONTENIDO DE HUMEDAD DEL CAFE

El contenido de humedad del grano de café es un parámetro de control sobre la calidad del producto y del proceso. Existen dos formas prácticas de expresarlo:

- a) **Base Seca:** Es la razón del peso de agua dividido entre el peso de café seco.
- b) **Base Húmeda:** Es la razón del peso del agua dividido entre el peso de café húmedo".
(Caldas, 1994).

1.2.2 CONTENIDO DE HUMEDAD DEL AIRE

El contenido de humedad del aire se expresa como porcentaje de humedad relativa o como humedad absoluta.

A continuación se definen ambas:

- a) **Humedad Relativa:** Es el porcentaje de vapor que el aire tiene en relación con la máxima cantidad que podría contener a la misma temperatura (Treybal, 1984).
- b) **Humedad Absoluta:** Es el porcentaje de vapor de agua que contiene cada kilogramo de aire seco (Treybal, 1984).

2.0 DESCRIPCION DE MAQUINAS SECADORAS DE CAFE

En los beneficios de café pueden encontrarse diferentes tipos de máquinas secadoras, pues aunque el secado al sol ofrece resultados satisfactorios respecto a la calidad del grano, éste se vuelve inconveniente cuando se deben procesar considerables cantidades de café pergamino húmedo.

"Por lo general, el café proveniente de la etapa húmeda se somete a dos secciones de secado: Presecado y Secado. En la sección de presecado se verifica remoción del agua superficial. Son usadas máquinas secadoras como las verticales de duelas o bafles y las oreadoras. Es común encontrarse con máquinas escurridoras que a pesar de no ser secadoras en base a calor resultan ser efectivas" (Nuñez, 1971).

"El secado mecánico se inicia al inyectar una corriente de aire que contacte a la camada de café para remover parte de la humedad del grano. El agua contenida en los granos se evapora mezclándose con el aire que atraviesa el espesor de granos de café, impulsado por la acción de un ventilador.

Comúnmente el aire de secado es calentado, provocando la disminución de su humedad relativa al ascender su punto de saturación. Al iniciarse la dinámica del proceso de secado, entran en contacto la presión de vapor de agua del grano y la presión de vapor de agua del aire, pudiendo resultar en:

- a) Secamiento, si el vapor de agua del grano ejerce mayor presión que el vapor de agua del aire.

b) Un punto de equilibrio, si las presiones son iguales.

c) Humedecimiento del grano, si el vapor de agua del aire ejerce mayor presión que el vapor de agua del grano.

De ésto puede concluirse que en condiciones de elevada humedad ambiental, puede ser conveniente no operar con los equipos de secado, puesto que aumentaría el tiempo de secado, incrementándose así los costos de operación. Desde el punto de vista de la transferencia de masa, es necesario que la humedad del aire sea lo más baja posible, pues de esta forma será capaz de arrastrar una mayor cantidad de agua contenida en el grano de café, reduciéndose de esta forma el tiempo de secado; mejorando con ello la eficiencia del proceso" (Sivetz, 1963).

2.1 PRESECADORA

Esta máquina secadora recibe café pergamino húmedo directamente de la etapa húmeda con porcentajes de humedad que oscilan entre 50 a 55 %. El café húmedo es alimentado por una tolva sobre la superficie de láminas de acero perforadas, conectadas en desnivel y accionadas por un mecanismo neumático gracias al cual la camada de granos es desplazada y agitada, mejorando el rendimiento sobre el factor de difusividad térmica, ver figura 2.1. En suma, el mecanismo predominante de transferencia de calor en el sistema es la convección forzada; aunque los efectos atribuidos al mecanismo de conducción son considerables.

El aire caliente es inyectado y forzado a pasar a través de las perforaciones circulares contactando a la camada de granos en forma perpendicular a su avance. El aire es provisto por acción de un ventilador y un radiador.

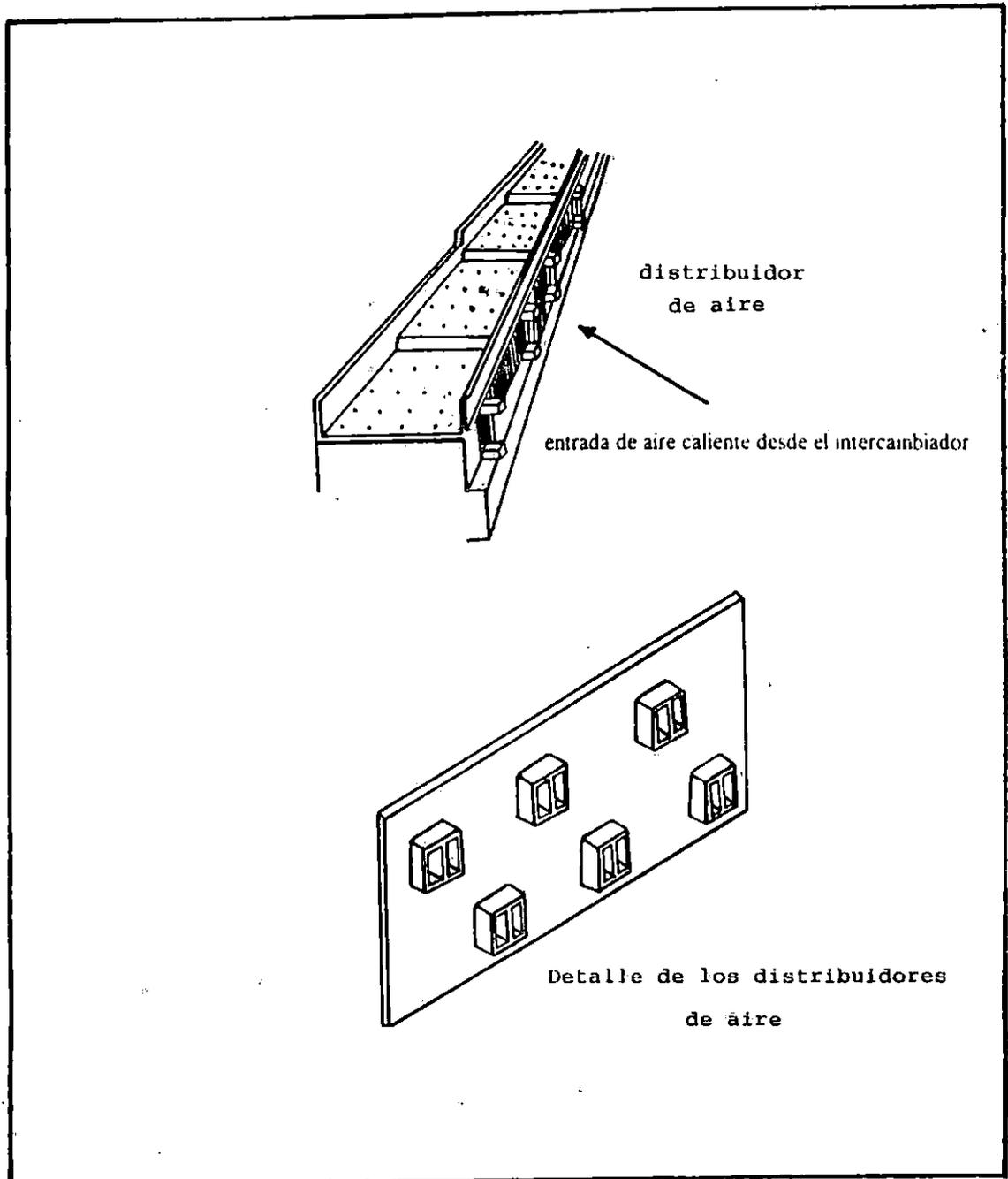


Figura 2.1 Presecadora

2.2 SECADORA CILINDRICA VERTICAL (TIPO PACAS)

Esta secadora se constituye por una columna cilíndrica vertical, formada por la unión de tres secciones cilíndricas circulares de acero, una de ellas, la inferior, se halla totalmente con arreglos de perforaciones circulares, ésto puede verse en detalle en la figura 2.3.

Concéntrica a ésta sección cilíndrica circular perforada se eleva un cono cilíndrico hueco, en cuya parte cilíndrica se encuentran arreglos de perforaciones circulares semejantes a los ya mencionados. La parte en forma de cono facilita el descenso de los granos de café hacia el área de secado propiamente. Además, este cono cilíndrico interno se eleva aproximadamente hasta el centro de la siguiente sección cilíndrica circular no perforada. Por debajo del cono cilíndrico interno se inyecta aire caliente que se distribuye a través de todos los pequeños orificios que a su paso encuentra; por supuesto, todo ésto es gracias al impulso que un ventilador centrífugo proporciona a la corriente de aire.

La sección de secado del café acontece en el paso de la camada de granos de café a través de la sección anular formada entre las dos secciones circulares cilíndricas perforadas, donde el aire contacta a la camada anular de granos en forma perpendicular al avance de éstos. Luego, los granos caen dentro de un colector en forma de tolva. Para evitar el atoramiento de granos, la secadora cuenta con unas piezas mecánicas conocidas como rascadores.

Cuando la camada de granos sale de la tolva es recogida por un transportador y llevada a otra máquina al seguir el sistema de flujo continuo o ser recirculado en el sistema mismo. Sus capacidades oscilan entre 80 y 120 qq, con un tiempo de secado entre 24 a 30 horas. Es común encontrarse en las plantas de beneficiado de café, con máquinas secadoras modificadas, alterando así sus capacidades y tiempo de secado iniciales.

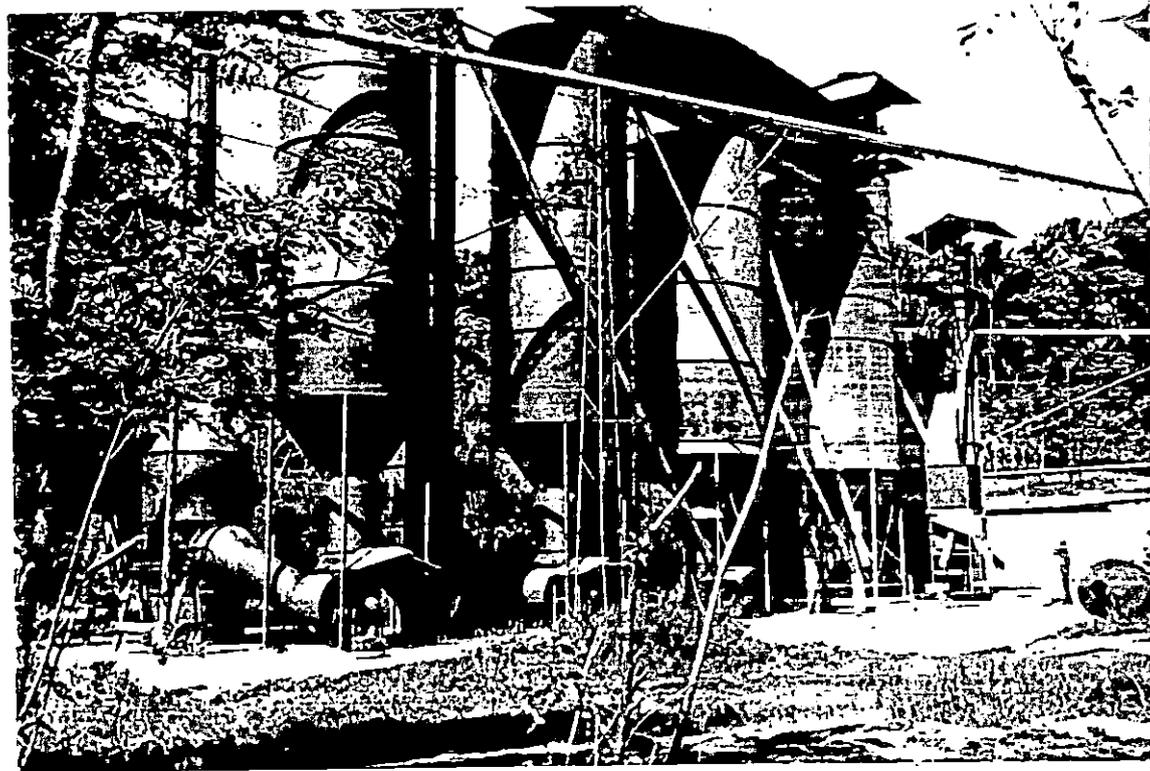


Figura 2.2 Secadora Cilíndrica Vertical (Tipo Pacas)

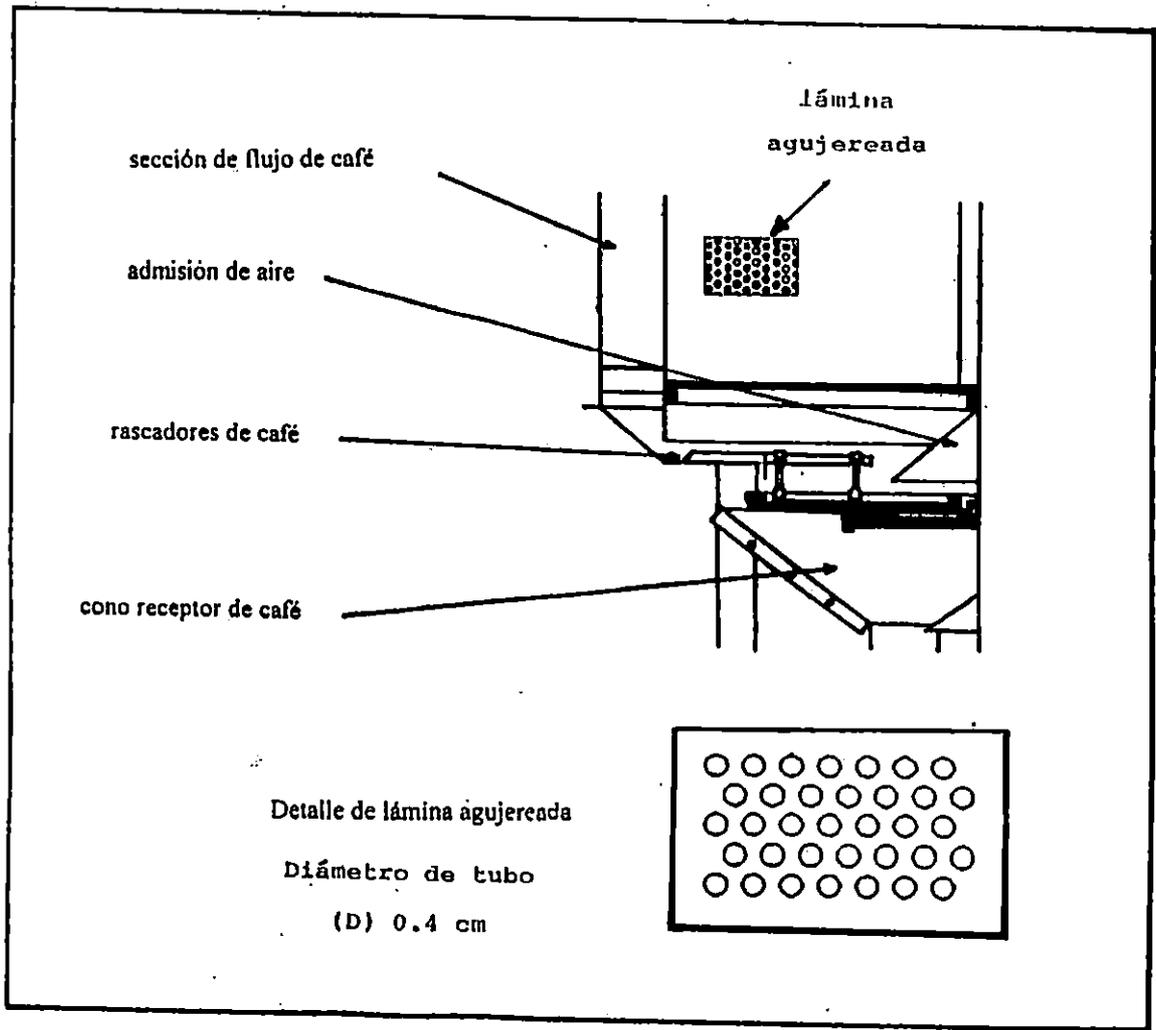


Figura 2.3 Esquema de la Secadora Cilíndrica Vertical

Tabla 2.1 Características Generales de la Secadora Cilíndrica Tipo Pacas

Temperatura promedio del aire suministrado a la secadora: 68°C (HR= 7%)
Flujo de aire a la temperatura de entrada: 1.19 kg/s (157.08 lb/min)
Capacidad de trabajo: 4840 kg de café seco
Humedad del café de entrada: 35%
Humedad del café a la salida: 11-12%
Tiempo de secado: 27-29 horas
Potencia eléctrica del equipo auxiliar: 22.5 hp (16.78 kw)
Volumen de la sección de secado: 1.226 m ³
Dimensiones generales: D 3.64 x 4.06 m

La inyección de aire caliente puede suplirse mediante el uso de vapor caliente, o en forma directa por un quemador de aceite diesel, de leña, de cascarilla de café o alguna combinación de éstos.

2.3 SECADORA DE CILINDRO HORIZONTAL ROTATIVO (GUARDIOLA)

"Esta es la secadora rotatoria más antigua conocida hasta hoy, es nombrada así por su inventor, José Guardiola, originario de Guatemala; quien la patentó en 1882. Aún es fabricada por la industria metal-mecánica" (Menchu, 1973).

Esta secadora está constituida por un tambor cilíndrico, cuyas paredes de acero perforado permiten la circulación del aire húmedo hacia el ambiente. Este cilindro se halla montado en un eje hueco por donde circula el aire caliente, que es puesto en contacto con el grano de café mediante un ducto axial con brazos radiales perforados. Además, cuenta con

ventanillas para carga y descarga del café. Al concluir el secado, las ventanillas se abren y la máquina es rotada continuamente mientras el café se descarga por gravedad. Ver fig. 2.4.

Es usual encontrarse con cuatro compartimientos dentro del cilindro secador, es decir, que está dividido longitudinalmente en tabiques y lateralmente por particiones circulares perpendiculares al eje. Esto permite secar pequeñas partidas de café con diferentes grados de humedad en forma simultánea. La secadora Guardiola es estrictamente para lotes y no para operación continua. Las dimensiones de los compartimientos, deben ser suficientemente amplias, de manera que se facilite la pronta carga y descarga.

Respecto al tamaño del tambor de la Guardiola, se tiene que para un diámetro de 6 pies, hay largos de 3, 6, 12 y 16 pies, con una capacidad efectiva cerca de 20 pies cúbicos por cada pie de longitud del tambor. En el exterior del cilindro se encuentra un orificio destinado a facilitar la extracción de muestras, mientras la secadora está funcionando. En su interior hay chapas deflectoras y volteadoras de café. El tambor se mueve de 2 a 4 vueltas por minuto.

Para obtener la corriente de aire caliente, debe contarse con equipo para su producción. Es decir, es necesario un ventilador y un calorífero o intercambiador de calor, cuando se usa leña o cascabillo o bien de un simple quemador directo de aceite diesel. Vapor caliente también puede ser usado si está disponible.

El ventilador genera una corriente de aire y la fuerza hacia adentro del calorífero para su calentamiento, luego lo hace circular a través del cilindro que contiene la carga de café.

"Respecto de los caloríferos a fuego indirecto, los hay de diferentes modelos, tales como los de tubo en U y los de tubos concéntricos, encontrados más frecuentemente. Es

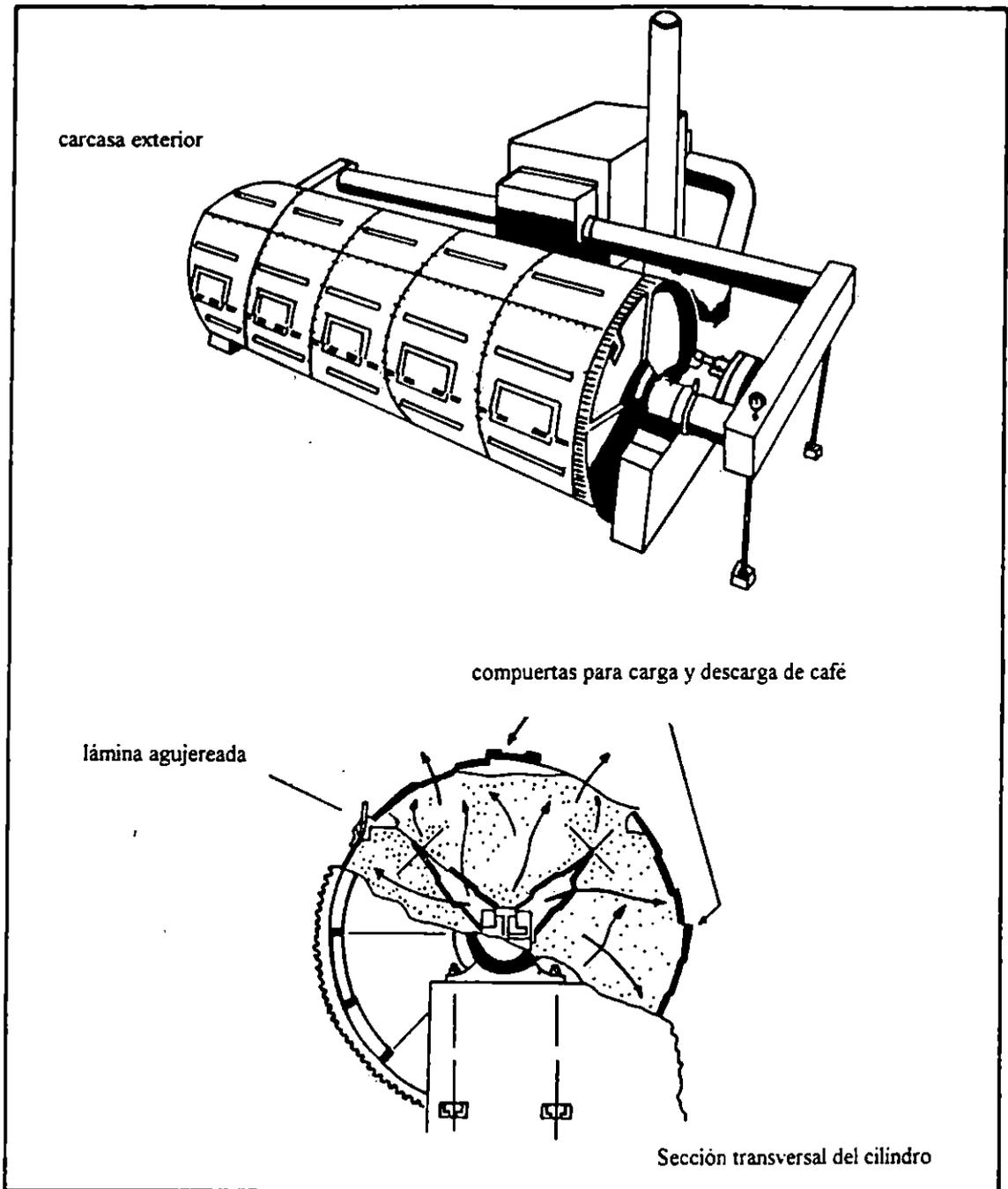


Figura 2.4 Secadora Horizontal Tipo Guardiola

evidente, que aquellas secadoras que operan directamente con gases de combustión presentarán mayores eficiencias que las que emplean intercambiador de calor". (Sivetz, 1963).

Tabla 2.2 Características Generales de la Secadora Tipo Guardiola

Temperatura del aire entrante a la secadora: 61°C (HR = 7%)
Flujo total de aire a la temperatura de entrada: 4.144 kg/s (548.25 lb/ min)
Capacidad de trabajo: 3637 ~ 3773 kg de café seco
Humedad de entrada: 30.5%
Humedad de salida: 13 ~ 11%
Tiempo de secado: 25 ~ 26 horas
Potencia eléctrica del equipo auxiliar: 12.5 hp (9.3 kw)
Volumen de la sección de secado: 10.998 m ³
Dimensiones generales: D 1.85 x 4.9 m

2.4 SECADORA DE COLUMNA VERTICAL

El uso de las secadoras de columna vertical por los beneficiadores de café, es hoy día notablemente aceptado por atributos tales como: buen funcionamiento y fácil operación. En un principio, éstas fueron diseñadas para secar granos, presentándose como principal inconveniente que alguna cantidad de café resulte despergaminado, pues el café está siendo continuamente conducido por los transportadores (tornillos helicoidales). Esto puede evitarse sustituyendo los tornillos helicoidales por otro tipo de elevador o ajustando éstos de forma que no quepa el grano o dejando lugar suficiente para que no lo maltrate.

Estas secadoras operan gracias al contacto a contracorriente de una cascada de granos de café y el flujo de aire caliente. Lo que toma lugar cuando el café desciende por gravedad

dentro de dos columnas con persianas, las que operan como cámaras de secado por gravedad, de manera que el aire caliente que a través de ellas circula arrastra consigo la humedad ya que al salir al exterior debe pasar a través de los granos que descienden por las cámaras, removiéndose a cada momento, lográndo un secado uniforme en toda la superficie, ver figura 2.6. Cada columna posee en su fondo una barra con forma de cruz, la cual gira despacio depositando el café dentro de una arteza. En el fondo de la arteza hay un transportador horizontal de gusano o un embudo que conduce los granos de café hacia el elevador de cangilones, lográndo así, un circuito cerrado de reciclaje de café, pudiéndo ser interrumpido por tiempos de reposo. Empleando éste sistema llamado de recirculación de carga es necesario un promedio de 12 horas para conseguir la humedad deseada en la partida de granos de café.

Tabla 2.3 Características Generales de la Secadora Vertical Tipo Duelas

Temperatura promedio del aire que entra a la secadora: 86°C (HR = 3.5 %)
Flujo total de aire a la temperatura de entrada: 4.48 kg/s (591.4 lb/min)
Capacidad de trabajo: 11337.87 kg de café humedo
Humedad de entrada: 30~35 %
Humedad de salida: 11~13 %
Tiempo de secado: 36~ 39 horas
Potencia eléctrica del equipo auxiliar: 7.5 hp (5.6 kw)
Volumen de la sección de secado: 6.604 m ³
Dimensiones generales: 9 x 6 x 1.4 m

El aire calentado es suplido en forma directa por un quemador de aceite diesel, leña, petróleo, kerosene; algunos cuentan con mecheros de gas natural o preperado. El calorifero es controlado por un termómetro cuyo sensor conviene esté ubicado en la entrada al recinto de aire caliente dentro del secador.

Para evitar que el aire de secado se desperdicie por escape o corto circuito sin hacer trabajo útil, una cantidad considerable de granos deben mantenerse arriba de la secadora, de manera que la oposición al flujo de aire sea igual o más grande que la que escapa a través de las rejillas de ventilación.

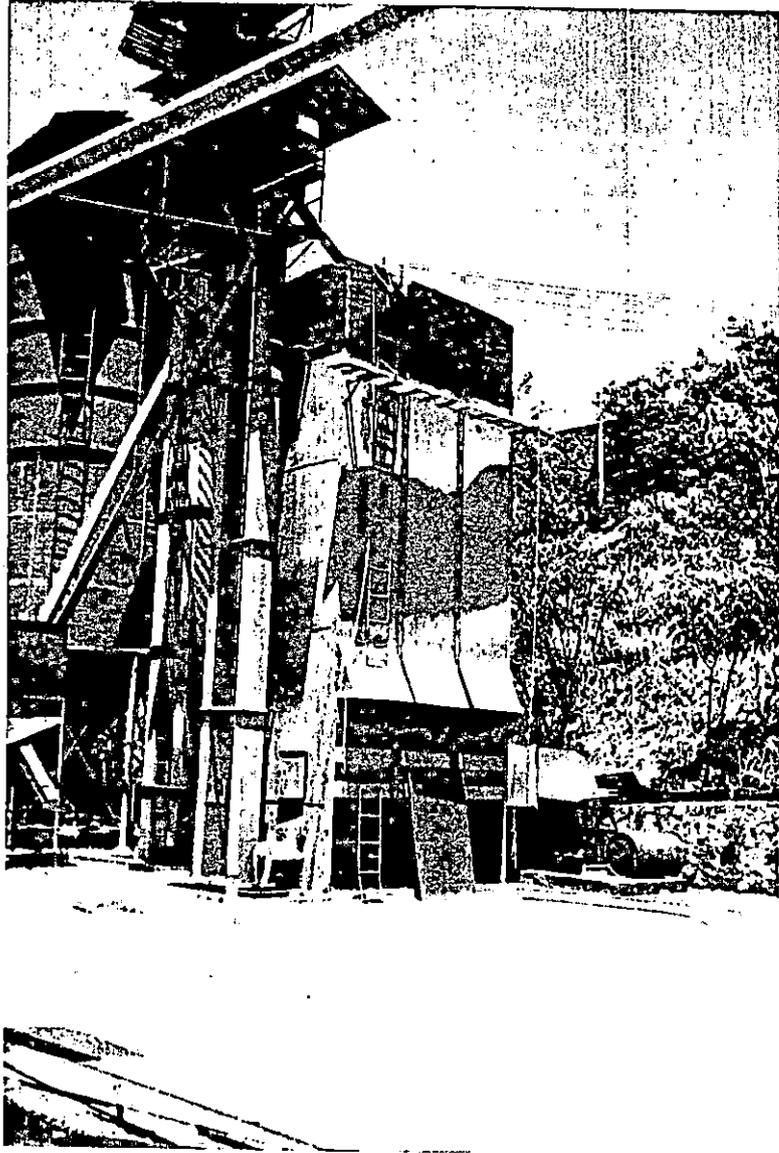


Figura 2.5 Secadora Vertical de Duelas

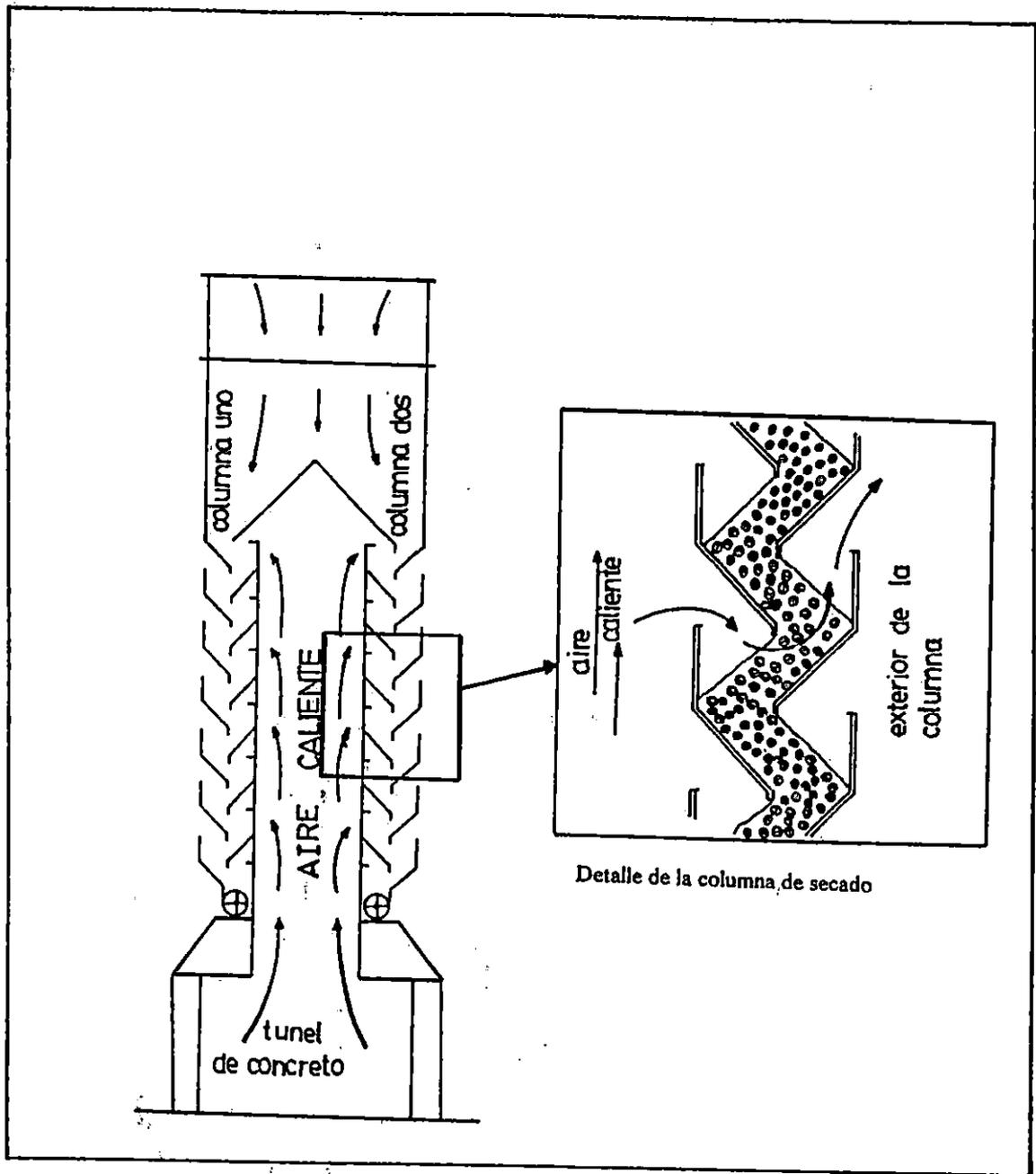


Figura 2.6 Esquema de la Secadora Vertical de Duelas

3.0 SISTEMAS DE GENERACION DE CALOR

La energía calorífica es muy utilizada en los procesos industriales, los cuales según sus necesidades pueden requerir diversos métodos de transmisión, incluyendo conducción en calentadores de resistencia eléctrica, conducción en intercambiadores de calor, generadores de vapor y condensadores, radiación en hornos y secaderos por calor radiante.

Los cambiadores de calor son tan importantes y tan ampliamente utilizados en las industrias de proceso que su diseño ha experimentado un gran desarrollo. Existen normas ideadas y aceptadas que especifican con detalle los materiales, métodos de construcción, técnica de diseño y dimensiones de lo cambiadores, indicando aspectos fundamentales de su ingeniería, diseño y operación.

En nuestro país, la industria cafetalera buscando nuevas formas de mejorar y aumentar la eficiencia de sus beneficios de café, ha implementado sistemas de generación de calor tales como hornos y calderas que son los que producen todo el calor necesario para secar el grano de café.

El calor es obtenido en estos sistemas primeramente por una reacción de combustión y por el aire si este ha sido precalentado, seguido por los gases de combustión. Tanto los hornos como las calderas, utilizan leña, cascarilla de café como combustible. Lo que se persigue en estos sistemas es hacer uso sólo de los residuos del café, aprovechando de buena manera ese recurso, que a la vez contribuye a reducir los costos de operación, por ser un energético obtenido en el procesamiento del grano.

Los hornos y calderas, debido a sus características presentan como mecanismos dominantes en la transferencia de calor la radiación y convección que son procesos que ocurren durante la combustión, radiación de las paredes del horno, en el instante en que los gases de combustión ceden calor a un fluido frío ya sea de manera directa o indirecta.

Para la mejor comprensión del funcionamiento de los equipos, se describirán uno a uno los hornos y calderas encontrados en los beneficios de café en El Salvador.

3.1 HORNOS

"Como se sabe, los hornos son sistemas utilizados para la generación de calor. Un horno puede definirse como un espacio encerrado en el que se produce calor mediante la oxidación química del combustible. Para que esto ocurra el quemador debe encenderse de manera que la reacción de combustión tome lugar.

Si se requiere que el horno opere eficientemente no basta contar con excelentes quemadores, sino que ha de evitarse la presencia de superficies frías y excesiva dilución de aire que pudieran afectar la temperatura de ignición.

A continuación se presentan factores esenciales para lograr una buena combustión:

- a) Mezcla íntima del combustible y el oxidante.
- b) Admisión de cantidades suficientes de oxidante para quemar por completo el combustible.
- c) Una temperatura suficiente para encender la mezcla de combustible/aire y complementar su combustión.
- d) El tiempo necesario de residencia para que la combustión sea completa".

(Perry,1984).

Los hornos pueden subdividirse en dos tipos generales:

- a) Hornos de Fuego Directo
- b) Hornos de Fuego Indirecto

a) Hornos de Fuego Directo, en los cuales la llama ha de producirse dentro de la cámara en que se sitúa el material o en una cámara separada, pero en todo caso los productos de combustión se ponen en contacto con el material.

Dentro de los hornos a fuego directo la transmisión de calor se verifica por:

- Radiación por la combustión a través del techo y las paredes del horno.
- Convección y conducción a través de los gases calientes producto de la combustión.
- Radiación producida por la presencia de CO_2 y H_2O en los gases calientes.

Los hornos a fuego directo son a veces preferidos por su buena eficiencia térmica, aunque estos, "algunas veces ocasionan problemas al inicio o al final de un ciclo de operación, al encenderse o apagarse el horno, permitiendo que el grano se ahume" .

(Caldas, 1992).

b) Hornos de fuego indirecto, en estos sistemas los gases de combustión y el aire de secado se mantienen separados; una superficie de intercambio es necesaria para la transferencia de calor.

"El material a secar es calentado hasta una temperatura determinada, la cual puede controlarse mediante la regulación de la temperatura de los gases de combustión. Con ello,

además de mantener la calidad del producto, se pretende quemar el combustible con la máxima eficacia de forma que se aproveche la mayor cantidad de calor generado.

El calor es transmitido al material en parte por convección y en parte por radiación de la superficie interna de las paredes del horno. Usualmente las pérdidas de calor ocurren por efecto combinado radiación- convección entre la superficie externa del sistema y el medio ambiente, además del calor disipado en los gases de chimenea que no fue utilizado por el intercambiador (Ocon, 1949).

Los sistemas de generación de calor por combustión, sean de fuego directo o indirecto son ampliamente utilizados en el beneficiado de café. Para seleccionar cualquiera de ellos deben considerarse factores no sólo de índole económico o técnico sino también aquellas consideraciones que pudieran dañar la calidad del producto.

Para conocer un poco más sobre los equipos existentes en los beneficios de café, se realizó esta investigación con el objeto de caracterizarlos. Para ello, se describen los hornos encontrados, indicándose forma de operación, características generales y su respectivo diagrama de operación.

3.1.1 HORNOS DE FUEGO INDIRECTO

"Este tipo de horno, mantiene separados los flujos de gases de combustión y aire desecante, por medio de una superficie de intercambio de calor que puede ser una bancada de tubos dispuestos en diferentes configuraciones o un sistema que simule tubos concéntricos" (Koss, 1989).

3.1.1.1 QUEMADOR DE CASCARILLA

Equipo que consiste de un diseño robusto y de fácil construcción, utiliza cascarilla de café como combustible, el cual es alimentado al horno por efecto de un ventilador centrífugo que produce fluidización del sólido y a la vez introduce el aire primario (es el que entra junto con el combustible) para la combustión. Este tipo de horno debido a su diseño produce una pérdida de calor considerable, puesto que los gases de combustión salen inmediatamente y el tiempo de contacto con el aire a calentar es relativamente corto (fig.3.1).

El aire secundario entra por el cenicero y es el encargado de terminar la combustión de las partículas sólidas que caen sin haberse quemado completamente, incrementando con ello la combustión.

Este sistema simula dos tubos concéntricos en los cuales se movilizan los gases de combustión y el aire desecante en contracorriente, pasando este último por el espacio anular, siendo introducido por la parte superior del equipo por acción de un ventilador que se encuentra a un costado de la base del horno, siendo el encargado de evacuarlo e impulsarlo a la secadora, donde se pondrá en contacto directo con el grano de café.

La transmisión de calor en este sistema se efectúa por convección y radiación, produciéndose estos fenómenos en el calentamiento del aire, calentamiento de la superficie de transferencia, evacuación de los gases de combustión y en la combustión misma.

En la tabla 3.1, se pueden observar las principales características de operación de éste tipo de horno, con lo cual se logrará una mejor comprensión sobre su funcionamiento.

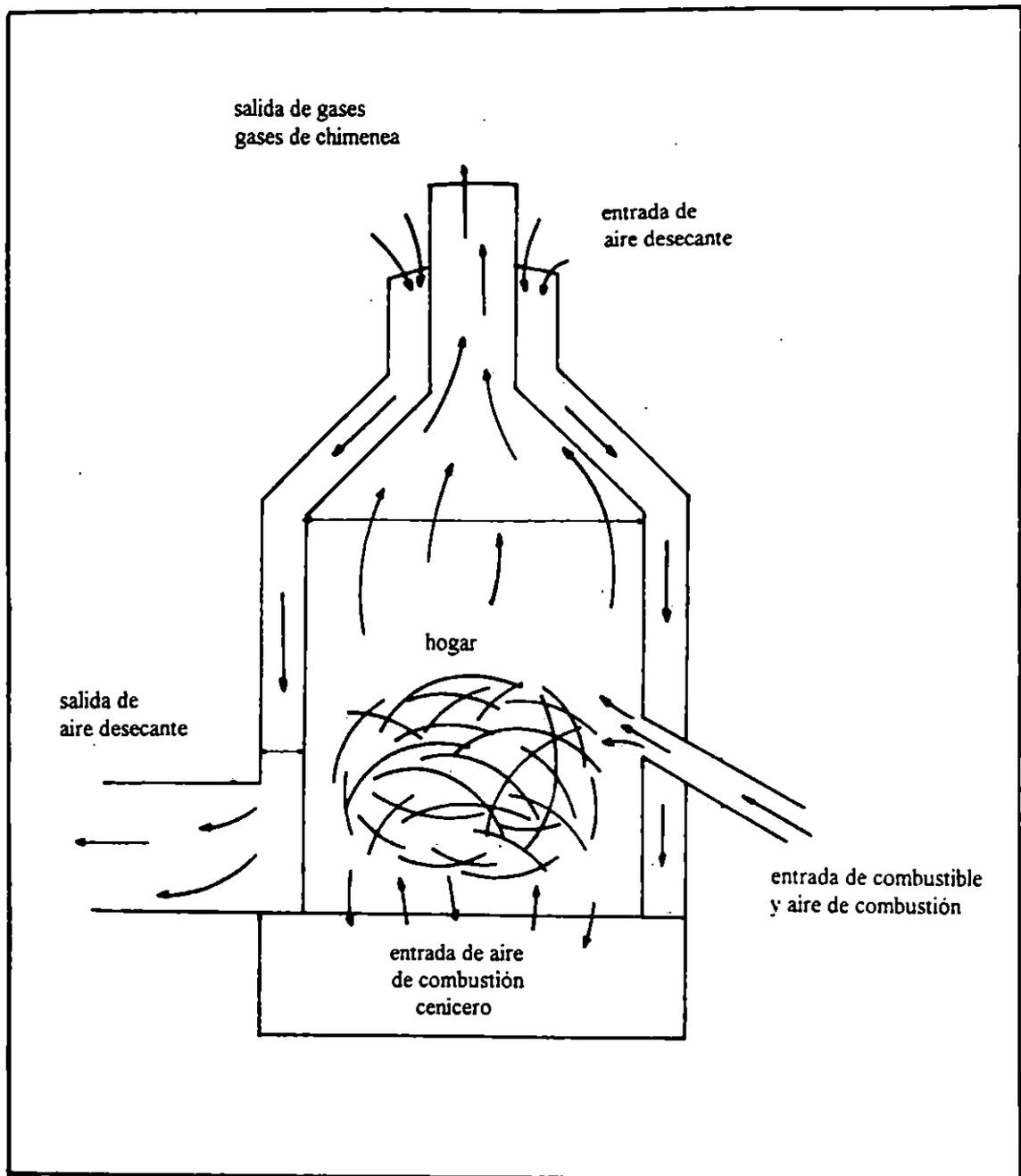


Figura 3.1 Diagrama de Operación del Quemador de Cascarilla

Tabla 3.1 Características Generales del Quemador de Cascarilla

Temperatura promedio del aire de salida: 74°C (HR= 7%)
Flujo de aire a la temperatura de salida: 1.95 kg/s (257.83 lb/min)
Potencia de entrada: 793.5 MJ/h (188,927.1 kcal/h)
Potencia neta (útil): 294.19 MJ/h (70,047.0 kcal/h)
Potencia eléctrica del equipo auxiliar: 11 hp (8.2 kw)
Combustible que utiliza: cascarilla de café
Tipo de intercambiador de calor: tubo concéntrico, flujo contracorriente
Area de intercambio de calor: 5.85 m ²
Coefficiente global de transferencia de calor: 334.5 (W/m ² °C)
Dimensiones generales: D 1.48 x 3.74 m

3.1.1.2 HORNO TIPO CALDERIN

Sistema cilíndrico construido de hierro laminar con revestimiento interno de material refractario y aislante. El combustible utilizado es leña, alimentado aproximadamente cada hora en forma manual, formándose un lecho fijo.

El calor generado en este equipo es transmitido por radiación/convección a una bancada de tubos de 3 plg. de diámetro colocados sobre el lecho de combustible con altura aproximada de 1 m.. Sobre esta bancada, existe otra con tubos de 2 plg. de diámetro los cuales se introducen en los primeros, 50 cm., con este tipo de construcción, el diseñador trató de aumentar la eficiencia en la transmisión de calor hacia el aire.

La entrada de aire de combustión al sistema se realiza por una compuerta situada en la base del horno, por efecto ejercido por la chimenea, logrando poner en contacto el aire con el combustible, a medida que éste asciende (fig.3.2), pasando a través de la leña, produciendo una combustión adecuada a las necesidades del sistema.

En la parte superior del equipo, existen dos compuertas por donde se alimenta aire fresco. En la compuerta A, el flujo de aire se introduce en los tubos de 2 plg. y sale por los de 3 plg., y por la compuerta B, entra aire fresco, el cual se mezcla con el aire caliente que sale por los tubos de mayor diámetro.

El aire que entra por ambas compuertas está expuesto a la superficie caliente de la chimenea, teniendo como inconveniente que el tiempo de contacto y el área de transferencia de calor son muy pequeños. El aire caliente se extrae del sistema por acción de un ventilador que lo impulsa a la secadora. En la tabla 3.2 se complementan las características de operación del horno, lo cual ayudará a formar una idea más clara sobre su funcionamiento.

Tabla 3.2 Características Generales del Horno Tipo Calderín

Temperatura promedio del aire de salida: 68°C (HR= 7%)
flujo de aire a la temperatura de salida: 1.19 kg/s (157.08 lb/min)
Potencia de entrada: 832.66 MJ/h (198,252.3 kcal/h)
Potencia neta (útil): 176.01 MJ/h (41,908.77 kcal/h)
Potencia eléctrica del equipo auxiliar: 15 hp (11.18 kw)
Combustible que utiliza: leña
Tipo de intercambiador de calor: tubular
Area de intercambio de calor: 19.5 m ²
Coefficiente global de transferencia de calor: 61.42 (W/ m ² °C)
Dimensiones generales: D 1.27 x 3.75 m

3.1.2 HORNOS DE FUEGO DIRECTO

"En este tipo de sistemas, los gases de combustión no son empleados como medio de calefacción, sino que se utilizan como medio desecante, mezclándolos con el aire ambiente para obtener la temperatura de proceso deseada. La razón de mezcla aire

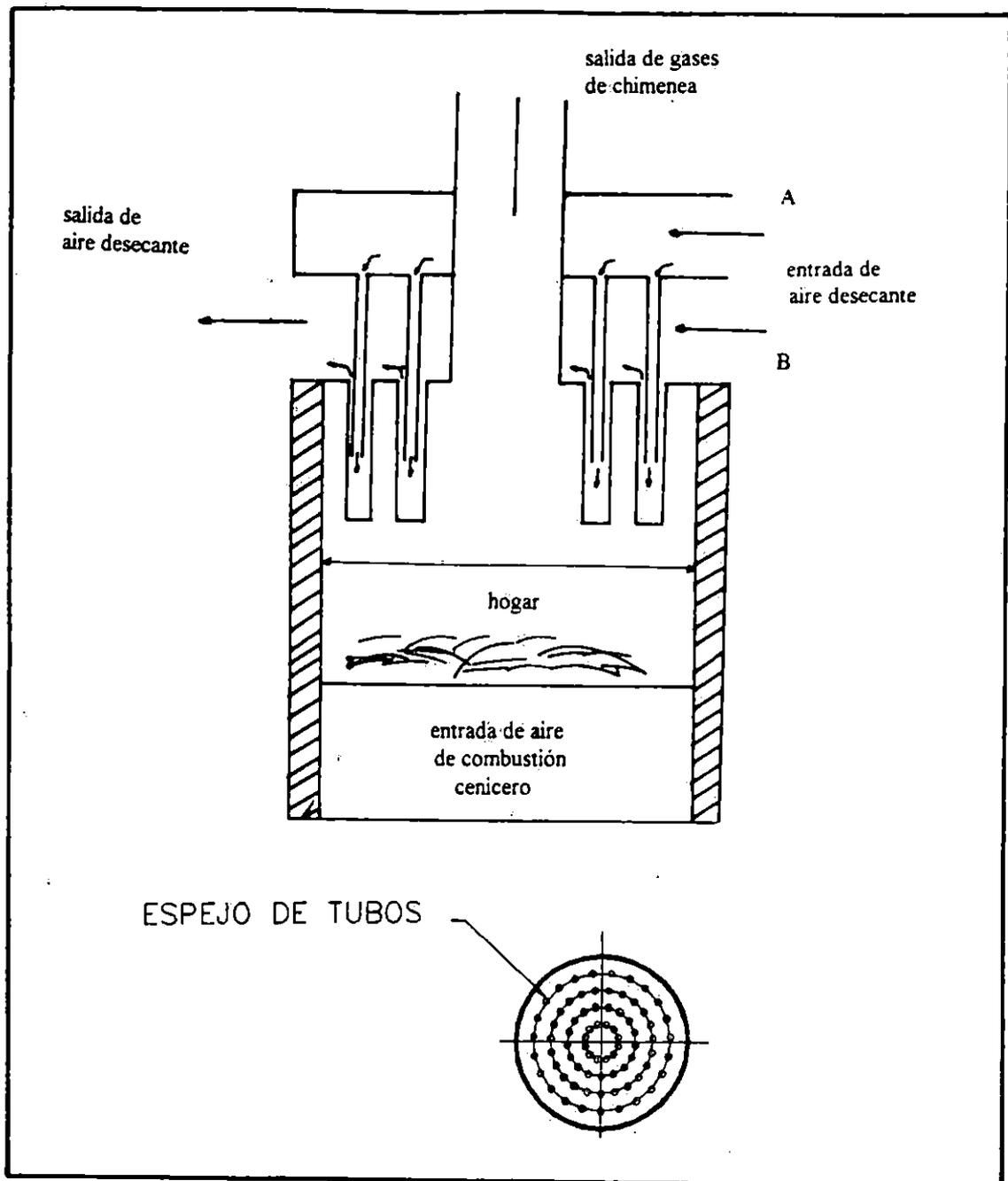


Figura 3.2 Diagrama de Operación del Calderín

ambiente/gases de combustión es tan alta que para efectos prácticos, la corriente resultante puede considerarse como aire. Según el balance energético, esto prácticamente significa anular las pérdidas de calor por la chimenea, y utilizar toda la energía disponible en la corriente de gases para secar" (Koss, 1989).

3.1.2.1 HORNO GEKA

Este tipo de horno, tiene forma cilíndrica, su exterior es de hierro laminar, con espesor de 4 mm. y en su interior, material aislante y refractario de aproximadamente 300 mm., el cual reduce en gran medida las pérdidas de calor por radiación/convección al medio circundante.

El combustible (cascarilla de café), es alimentado por medio de un transportador de tornillo, y el aire primario entra en el lado opuesto a la entrada de combustible. El aire secundario entra por la parte inferior del horno, específicamente en el lugar donde se evacuan parte de las cenizas formadas en la combustión, siendo este el encargado de ayudar a quemar completamente las partículas de cascarilla que caen crudas al cenicero, logrando de esta manera reducir las pérdidas de calor por combustible no quemado, mejorando la eficiencia de combustión.

Los gases de combustión, se evacuan por el extremo superior del horno, donde en el instante de salir, se pone en contacto con aire fresco (fig. 3.3), produciéndose la mezcla que será dirigida hacia las secadoras.

La evacuación de los gases de combustión y la entrada de aire fresco, es lograda por un ventilador de gran capacidad, pues se requiere hacer una dilución de los gases, siendo la convección el mecanismo dominante en la transferencia de calor, puesto que en este sistema el aire recibe calor directamente de los gases de combustión.

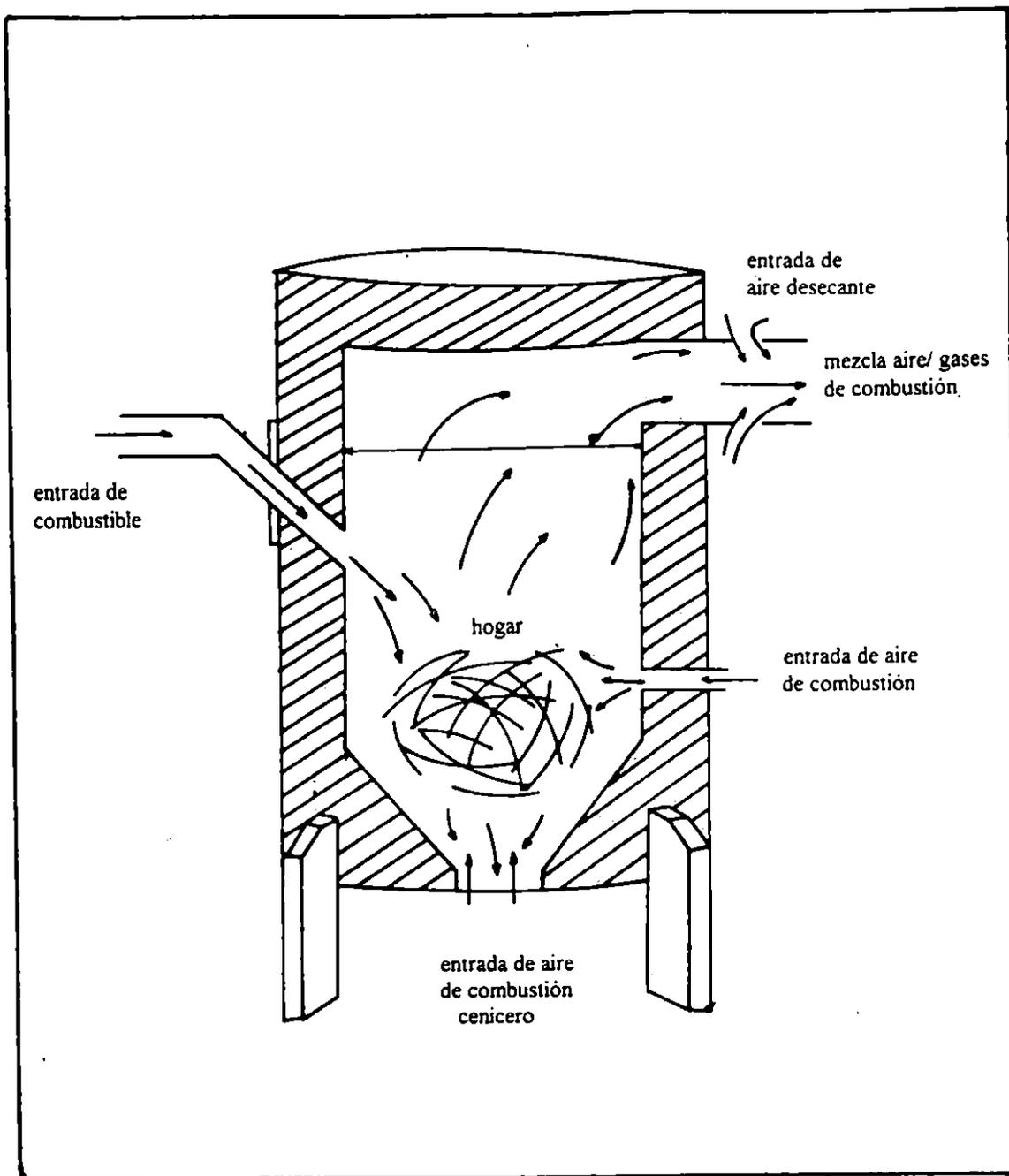


Figura 3.3 Diagrama de Operación del Horno Geka

3.2 CALDERAS

"Un generador de vapor es un conjunto de aparatos destinados a la producción de vapor para usos industriales, para calefacción o para producir energía mecánica. El líquido generalmente empleado en la producción de vapor es el agua.

Las partes esenciales de un generador de vapor son: el horno y la caldera, pero los generadores modernos constan de muchos otros aparatos.

Como hemos mencionado, la caldera es una parte del generador de vapor, en la cual tiene lugar la vaporización, o sea, el cambio del fluido del estado líquido al estado vapor. El objeto de toda caldera es, hacer que los gases de combustión que vienen del horno a una temperatura elevada, comuniquen su calor al fluido que está dentro de la caldera".

(Avalos, 1941).

"Hay dos tipos generales de calderas generadoras de vapor. La caldera de tubos de humos y la caldera de tubos de agua. El primer tipo consiste de recipientes cilíndricos que tienen tubos que pasan a lo largo de ellos y que se rolan a los cabezales del recipiente. El haz de tubos generalmente es horizontal, y la parte superior del recipiente no tiene tubos. Los gases de combustión pasan a través de los tubos y en el recipiente se mantiene cierto nivel de agua para tener los tubos completamente sumergidos en ella, pero al mismo tiempo se dispone de espacio para permitir la separación del vapor y las gotas de agua. Cuando se usan tubos verticales en calderas de este tipo, los tubos deben sumergirse en agua hasta una altura suficiente y evitar el sobrecalentamiento de la parte superior de los tubos que no está enfriada por el agua.

Algunas de las partes enfriadas por agua, tales como la coraza o los espejos, pueden

sujetarse a radiación de los gases de combustión, puesto que estas partes son una porción de la cámara de combustión. El principal mecanismo de la transferencia de calor de los gases a los tubos es la convección. Las calderas de tubos de humo, raras veces exceden a los 2.45 mt. (8 pies), y la presión de vapor generalmente se limita de 7 a 10.5 kg/cm²g (100 a 150 lb/plg²g). Las calderas de tubos de humo se usan para demandas de baja capacidad, generalmente de 6,804 a 9,072 kg/h (15,000 a 20,000 lb/h) de vapor para uso industrial, doméstico o de proceso y para generación de potencia en pequeña escala. Los combustibles a emplear pueden ser carbón, petróleo o gas, y en algunos casos, combustibles tales como la madera, lodos secos y en la industria cafetalera, se está haciendo uso de residuos del café.

Las calderas de tubos de agua, como lo indica su nombre, tienen agua dentro de los tubos. La combustión provee la radiación para los tubos, además de transferencia de calor que se efectúa mediante el arreglo del flujo de gases calientes para lograr transferencia por convección" (Kern, 1987).

3.2.1 CALDERAS DE TUBOS DE HUMO

La caldera encontrada en la mayoría de los beneficios de café, es de retorno, su posición es horizontal y el horno es exterior a la caldera, lo cual permite hacerlo de mayores dimensiones, construyéndolos de tabique refractario (fig. 3.4).

La alimentación de combustible (1), se realiza con un transportador de tornillo o por medio de un ventilador. Esto según las condiciones de operación del sistema. Esta entrada, generalmente se encuentra arriba de la puerta (2) de la caldera, la cual se utiliza para observar la llama generada en el horno (3) por la combustión.

Los gases pasan por el interior de los tubos (4), después de haber calentado la parte

inferior del tambor, y salen a la cámara de humo (5), donde se hacen pasar por un intercambiador de calor con filas alternas de tubos (6), y en su exterior pasa el aire de combustión, éste aire caliente entra al horno por espacios vacíos existentes entre los ladrillos refractarios (7) o por efecto de un ventilador.

Los gases de combustión salen por la chimenea (8), después de haber pasado por trampas de ceniza (9), que tienen como función hacer precipitar las partículas sólidas por efecto de la velocidad y cambio de sentido del flujo de gases, evitándose así, reducir la polución de sólidos al medio ambiente.

El calentamiento del aire de combustión se hace con el objeto de aumentar la eficiencia de la combustión, evitando una disminución considerable en la temperatura de la llama.

Los diferentes tipos de calderas, presentan ciertas modificaciones tales como: tipo y forma de emparrillado, forma de alimentación de combustible, precalentamiento de aire; siendo factores que inciden en el rendimiento de los equipos. En la tabla 3.3 se pueden ver las características más generales de las calderas consideradas en el estudio.

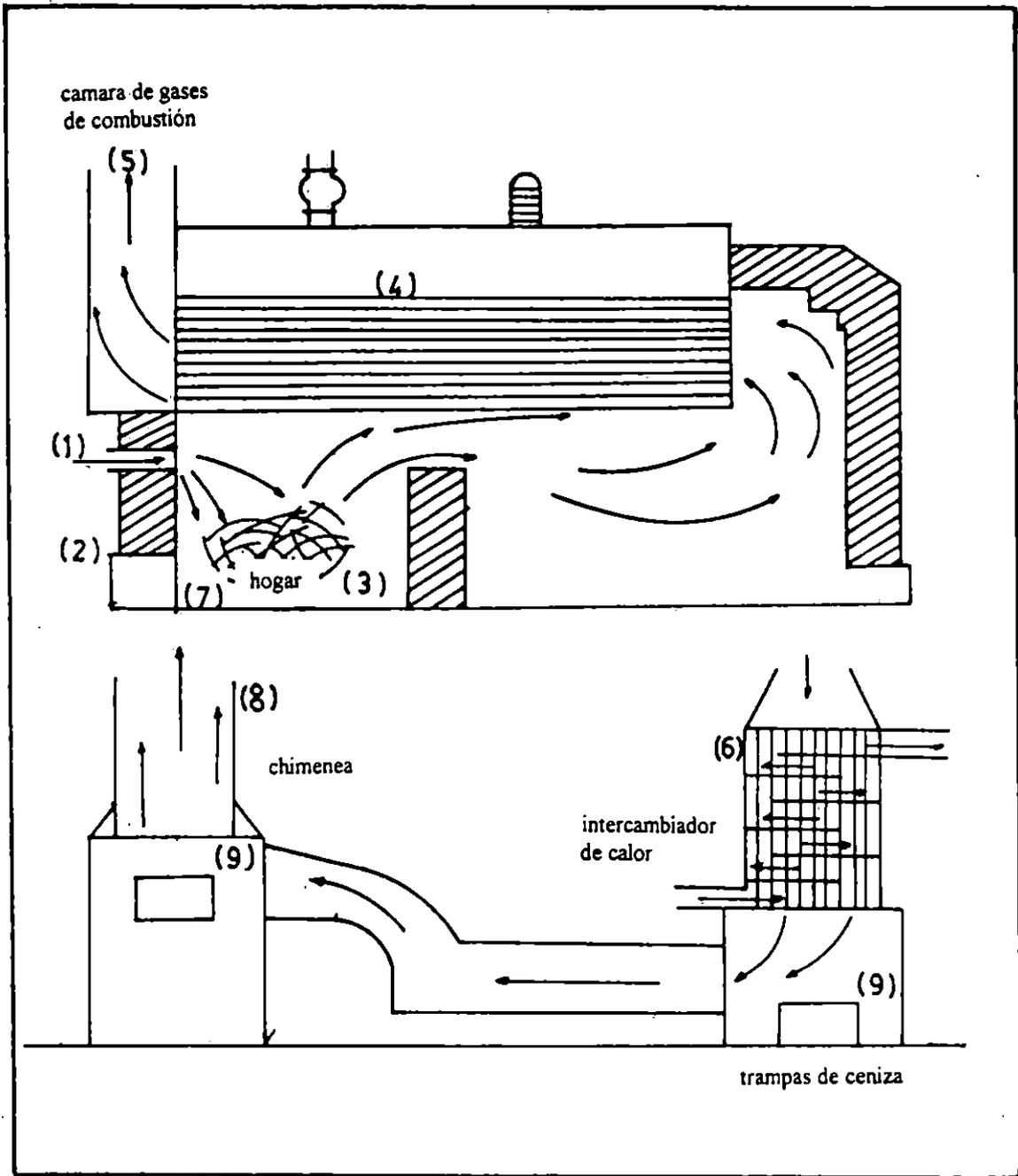


Figura 3.4 Diagrama de Operación de Caldera de Tubos de Humo

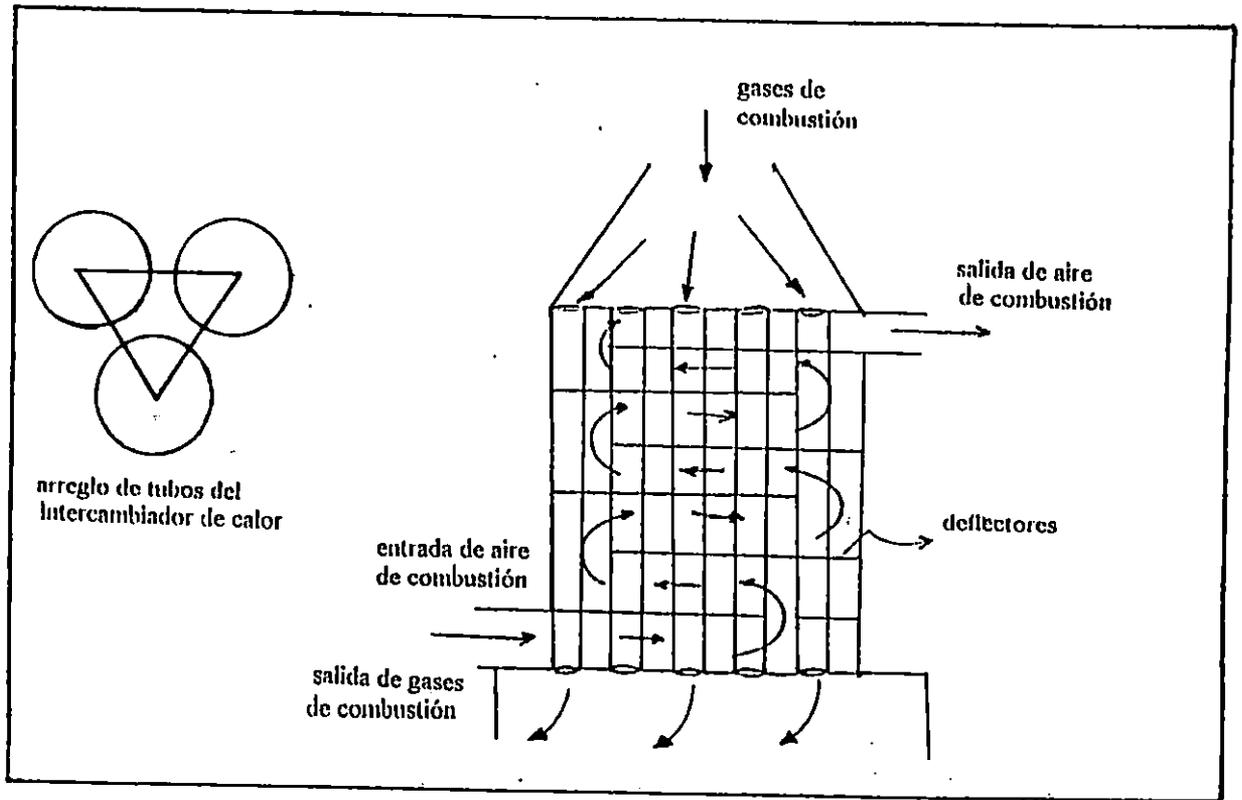


Figura 3.5 Diagrama del Intercambiador de Calor

Tabla 3.3 Características Generales de Calderas de Tubos de Humo

	Caldera (1)	Caldera (2)	Caldera (3)	Caldera (4)	Caldera (5)
Potencia Nominal (Hp)	180.00	200 ~ 250	500 ~ 600	125.00	---
Potencia Suministrada por el combustible (MJ/h)	20793.80	14639.80	25751.00	3382.43	98367.26
Potencia Útil (neta) MJ/h	9004.50	4312.10	4205.26	2120.80	2077.60
Potencia del Equipo Auxiliar (Kw)	21.99	14.54	7.45	7.45	18.63
Presión Máxima de Operación (kgf/cm ²)	7.03	8.44	14.06	10.55	---
Presión de operación (kgf/cm ²)	5.27	6.33	5.96	3.52	8.80
Temperatura del vapor (°C)	153.10	160.15	157.80	138.30	173.50
Diametro Externo de Tubos (plg)	2.75	4.00	4.00	2.75	---
Combustible Empleado	cascarilla de café	leña y cascarilla de café	leña y cascarilla de café	cascarilla de café	leña y cascarilla de café
Dimensiones Generales (m)	5.85 x 3.07 x 2.25	7.12 x 4.1 x 3.28	8.4 x 4.17 x 4.0	5.88 x 3.25 x 2.5	6.5 x 3.3 x 2.5

- (1) Con sistema precalentador de aire y horno sin parrilla
 (2) Con sistema precalentador de aire y horno con parrilla
 (3) Sin precalentador de aire, horno con parrilla y hogar sin contacto con la coraza
 (4) Sin precalentador de aire y con parrilla en el horno
 (5) Sin precalentador de aire y con parrilla en el horno (b)

4.0 PARAMETROS DE COMPARACION

Con el fin de comparar los hornos y calderas sobre una base común, se definen a continuación una serie de parámetros técnicos que permitirán evaluar los distintos sistemas según su desempeño relativo.

4.1 COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR

"Este coeficiente, es un indicador de la tasa a la cual la energía es transmitida de la corriente de gases calientes a la de gases fríos y por lo tanto da una idea global de la efectividad con la que el área de intercambio (y por ello los materiales) es utilizada".
(Koss, 1989)

Para ejemplificar, se considera una pared por la cual en sus superficies se conducen dos fluidos diferentes.

"Como se puede ver en la figura 4.1, el flujo de calor va de izquierda a derecha. Los gases de combustión del lado izquierdo están a la temperatura T_1 y existe una película de fluido, cuyo coeficiente de conductancia es h_1 .

Del lado derecho de la pared el fluido está a una temperatura T_3 y el coeficiente de conductancia es h_2 . Suponemos que la pared es plana y que ya se ha estabilizado el flujo de calor a través de ella, siendo k_1 el coeficiente de conductancia de la pared; permaneciendo constantes T_1 y T_3 con respecto al tiempo. Esta pared es lo que se llama superficie de calefacción" (Avalos, 1941).

La cantidad de calor que pase por unidad de tiempo a través de una superficie A , será

la misma en cualquier instante y se designa por Q. Según lo planteado por Avalos (1941), se tiene:

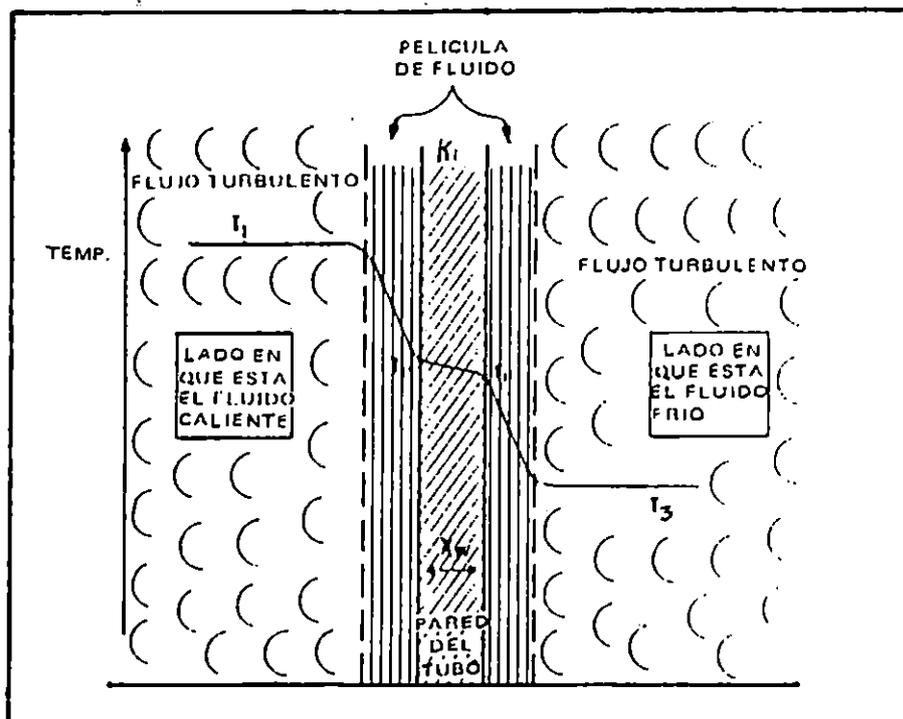


Figura 4.1 Perfil de temperatura en un sistema de transferencia de calor por convección/ conducción (Clausen III, 1982).

$$Q = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{1}{k_1} + \frac{1}{h_2}} (T_1 - T_3) A \quad \text{ec. 4.1}$$

Siendo : $1/U = 1/h_1 + 1/k_1 + 1/h_2$

Sustituyendo en ec.4.1 resulta:

$$Q = U A (T_1 - T_3) \quad \text{ec. 4.2}$$

De la ecuación 4.2 tenemos :

Q = Cantidad de calor ganado por el aire (calor útil), o sea el flujo de calor transferido por los gases de combustión al aire (kcal/h).

A = Area de intercambio o de calefacción (m²).

U = Coeficiente global de transferencia (kcal/m²-h-°C).

ΔT = Fuerza motriz. Considera sólo las temperaturas de proceso y representa una diferencia media logarítmica de temperatura a través del intercambiador de calor (°C).

Encontrándose en la ecuación 4.2 el coeficiente global de transferencia, representando la sumatoria de todas las resistencias presentes en el sistema.

(Avalos, 1941).

"Para evaluar este coeficiente, se requiere tomar valores de temperatura promedio con una termocupla, pues en realidad éstas varían a lo largo de la superficie de calefacción y no lo hacen en forma lineal. Ordinariamente, no es posible en el equipo industrial medir éstos promedios de temperaturas en las superficies de calefacción, únicamente las temperaturas de entrada y salida de los fluidos fríos y calientes se conocen o pueden ser medidos y se hace referencia como las temperaturas de proceso.

Por conveniencia, el método más adecuado para evaluar el coeficiente global de transferencia es considerando que:

- a) Las libras por hora de aire que fluye son constantes.
- b) El valor del coeficiente de transferencia es constante en cualquier momento.
- c) Condiciones estables" (Kern, 1987).

A partir de la ecuación 4.2, podemos dar una aproximación de éste parámetro, pues las condiciones de operación de los equipos son variables y su geometría de calefacción es diferente a las que se refiere la ecuación. Conociendo además, que dentro de los hornos el calor se transmite por medio de mecanismos variados y complejos (convección, radiación y conducción), ésto nos lleva a dar un margen de error considerable, pero para efectos de una caracterización es útil, puesto que servirá de guía al diseñador para futuras modificaciones en los sistemas.

Q se calcula haciendo uso de la ecuación plantada por Kern (1987), y se hará de la siguiente manera:

$$Q = \omega_a C_p (T_s - T_a) \quad \text{ec. 4.3}$$

Donde:

ω_a = Flujo de aire (kg/h).

C_p = Capacidad calorífica del aire (kcal/kg-°C).

T_s = Temperatura del aire a la salida (°C).

T_a = Temperatura del aire a la entrada (°C)

El coeficiente de transferencia, se evaluó sólo en aquellos hornos que tienen superficie de calefacción. Para el caso, se midieron en el quemador de cascarilla y en el calderín, ya que fue posible medir las condiciones de proceso.

Para calcular el coeficiente de transferencia de calor se hace uso de la ecuación 4.2 y se efectúa de la siguiente manera:

Datos:

$$Q = 329.54 \text{ MJ/h}$$

$$A = 5.9 \text{ m}^2$$

$$T_s = 74 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_a = 32 \text{ }^\circ\text{C}$$

Al despejar y sustituir en la ec. 4.2, resulta:

$$U = 329.54 \div [5.9 \times (74 - 32)]$$

$$U = 1.33 \text{ MJ/ h m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$$

4.2 BALANCE ENERGETICO

En hornos y calderas, para tratar de mantener un control de la eficiencia, es esencial el conocimiento primario de la distribución de las pérdidas de calor. Del balance térmico resultante se pueden imaginar los métodos rutinarios de control que aseguran la regulación de los elementos controlables.

Los elementos principales del balance son:

4.2.1 TRANSMISION DE CALOR UTIL

Este se obtiene por conocimiento de la temperatura, peso y carácter de la carga, y representa el flujo de calor transferido por los gases de combustión al aire. Para hornos se hará uso de la ecuación 4.3.

Para el cálculo de la potencia útil de un sistema de generación de calor, se procede de la siguiente manera:

- a) Evaluar las condiciones de flujo del aire que es calentado en el horno, como lo son ; la presión de velocidad (P_v) y presión estática (P_s) según la técnica mostrada en el anexo B1.
- b) Medir la temperatura del fluido tanto a la entrada como a la salida por un período de 8 horas consecutivas.
- c) Con los datos obtenidos se procede de la siguiente manera:
 - c.1) Cálculo de la velocidad del aire según lo especificado para el tubo de pitot en anexo B1.

Datos:

$$P_v = 2.61 \text{ mm H}_2\text{O} (0.103 \text{ plg de H}_2\text{O})$$

$$P_s = 12.83 \text{ mm H}_2\text{O} (0.038 \text{ plg de Hg})$$

$$T_s = 74 \text{ }^\circ\text{C} (625.2 \text{ }^\circ\text{R})$$

$$P_a = 29.92 \text{ plg de Hg}$$

Haciendo uso de la ecuación 4.4 para determinar la densidad (ρ) en lb/pie³ y la ec. 4.5 para la velocidad (V) en pie/min se tiene:

$$\rho = 1.325 (P_s + P_a) \div T_s \quad \text{ec. 4.4}$$

$$\rho = 1.325 \times (0.038 + 29.92) \div 625.2$$

$$\rho = 0.064 \text{ lb/pie}^3$$

$$V = 1096.2 (P_v \div \rho)^{0.5} \quad \text{ec. 4.5}$$

$$V = 1,096.2 \times (0.1 \div 0.064)^{0.5}$$

$$V = 1,395.09 \text{ pie/ min}$$

c.2) Cálculo del flujo másico. Habiéndose determinado las velocidades del aire a través del ducto se hace uso de la siguiente expresión que determina el flujo en kg/h.

$$\omega_a = V \rho A F \quad \text{ec. 4.6}$$

datos:

$$A = 0.27 \text{ m}^2$$

$$F = 293.561 \text{ (factor de conversión del sistema ingles al SI)}$$

Sustituyendo en la ec. 4.6 resulta:

$$\omega_a = 1,395.09 \times 0.064 \times 0.27 \times 293.61$$

$$\omega_a = 7,031.95 \text{ kg/h}$$

d) Con el valor del flujo másico se hace uso de la ec. 4.3, para determinar la potencia útil generada en el horno.

Donde:

$$\int C_p dt = 0.2385 (T_s - T_a) + 1.708 \times 10^{-5} (T_s^2 - T_a^2) + 8.76 \times 10^{-9} (T_s^3 - T_a^3)$$

$$T_a = 32 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$Q = [0.2385 \times (74 - 32) + 1.0708 \times 10^{-5} \times (74^2 - 32^2) + 8.76 \times 10^{-9} \times (74^3 - 32^3)] \times 7031.95$$

$$Q = 70,047.032 \text{ kcal/h (294.19 MJ/h)}$$

Para la evaluación de la potencia útil generada por una caldera, se utiliza la ecuación que presenta Avalos (1941), la cual se presenta a continuación:

$$Q = \omega_v (H_v - H_a) \quad \text{ec. 4.7}$$

Donde:

Q = Flujo de calor útil (kcal/h).

ω_v = Flujo de vapor (kg/h).

H_v = Entalpía del vapor (kcal/kg).

H_a = Entalpía del agua alimentada (kcal/kg)

Para su evaluación se procede de la siguiente manera:

- a) Medir las condiciones del agua alimentada a la caldera, es decir, registrar la temperatura de ésta y considerando condiciones de saturación se definen la presión de vapor y entalpía del agua líquida, las cuales se leen en tablas de vapor para el agua.
- b) Realizar la lectura de la presión de operación de la caldera y considerando condiciones de saturación registrar la temperatura y entalpía correspondientes al vapor producido, a partir de las tablas de vapor para agua.
- c) Medir el flujo de vapor generado, empleando las razones de alimentación de agua en la unidad de tiempo bajo el supuesto de que toda ésta se convierte por completo en vapor. Para el cálculo se sigue el siguiente procedimiento.
 - c.1) Verificar la forma del tanque receptor de agua y sus dimensiones, luego determinar el área del tanque.

c.2) Tomar el tiempo en que la bomba de alimentación de agua es accionada, medir el nivel inicial de agua y el final al momento de apagarse la bomba.

Ejemplo:

	Inicio	Final
Hora	10: 26 am	10: 45 am
Nivel	56 cm	23.5 cm
Cuerda	97 cm	111.5 cm

c.3) A partir de la información obtenida, calcular la razón cuerda/ radio (el radio del tanque de alimentación es 56 cm). En la tabla C.1 (método para el cálculo de áreas) del anexo C, ubique la razón encontrada y lea la razón area/ radio².

cuerda/ radio	1.732143	1.991071
area/ radio ²	0.614326	1.382457

c.4) La razón area/ radio², se multiplica por el radio al cuadrado y se encuentran las áreas del tanque que han sido vaciadas.

Area (cm ²)	1926.53	4335.39
--------------------------	---------	---------

c.5) Al area total del tanque (9852.03 cm²), se le restan las áreas vaciadas y residual y queda el área del flujo de agua alimentada a la caldera.

$$9852.03 - 1926.53 - 4335.39 = 3590.11 \text{ cm}^2$$

c.6) El área encontrada, se multiplica por lo largo del tanque (200 cm) y se determina el

volumen del agua y luego se multiplica por la densidad del agua a la temperatura de alimentación. Dando como resultado la masa de agua alimentada.

$$3590.11 \times 200 \times 0.985655 \text{ g/cm}^3 \times 0.001 = 707.7 \text{ kg}$$

c.7) Con la masa de agua y la diferencia de tiempos se determina el flujo másico de agua.

$$707.7 \div (10.75 - 10.43) = 2211.563 \text{ kg/h}$$

Este mecanismo se desarrolla para cada medición realizada en el sistema, para mejor comprensión ver el anexo A, en la sección de calderas.

Continuando con la determinación de la potencia generada por la caldera, se presenta un ejemplo de su cálculo, considerando un promedio del flujo de agua alimentado.

Al sustituir en la ec. 4.7 se determina la potencia útil generada por la caldera:

Datos:

$$\omega_v = 1700.8 \text{ Kg/h}$$

$$H_v = 658.65 \text{ Kcal/Kg}$$

$$H_a = 55 \text{ Kcal/Kg}$$

$$Q = [1700.8 \times (658.65 - 55)]$$

$$Q = 1026687.92 \text{ Kcal/Kg (4312.09 MJ/h)}$$

4.2.2 COMBUSTION Y PERDIDAS EN LA CHIMENEA

a) **"Combustible sin quemar.** Las pérdidas se deben al combustible que sale con la ceniza sin quemarse. Son de importancia cuando se trata de combustibles sólidos. Esta fracción varía considerablemente dependiendo del tipo de combustible, contenido de ceniza, su tamaño y el diseño del quemador y la parrilla" (Koss, 1989). Las pérdidas se calculan según la ecuación presentada por Avalos (1941), de la siguiente manera.

$$Q_a = \dot{Z} \dot{C}_c \omega_c P_1 \quad \text{ec. 4.8}$$

Q_a = Pérdidas de calor por combustible no quemado (Kcal/h).

\dot{Z} = Contenido de ceniza en el combustible (Kg ceniza/Kg combustible).

\dot{C}_c = Contenido de carbono en la ceniza (Kg carbono/Kg ceniza).

P_1 = Poder calorífico del carbono (Kcal/Kg).

ω_c = flujo de combustible (kg/h).

En la ecuación 4.8 se considera que el combustible residual en la ceniza es sólo carbono.

Para la evaluación de las pérdidas generadas por el arrastre de combustible por la ceniza, se procede de la siguiente manera:

- a.1) Tomar varias muestras de ceniza de los hornos.
- a.2) Con las muestras recolectadas se obtiene una sola y a partir de ella se pesan pequeñas cantidades de ceniza y se procede a reincinerar en un horno de mufla por un período de 6 horas a 600 °C.
- a.3) Conociendo el porcentaje de ceniza del combustible en uso, se procede de la siguiente

manera para determinar el combustible arrastrado; que está representado por los tres primeros términos de la ecuación 4.8.

Combustible utilizado: Cascarilla de café

$$\omega_c = 45.09$$

$$\dot{Z} = 0.0101 \text{ (ver tabla 5.3)}$$

$$P_1 = 8100 \text{ (ver sección 5.3)}$$

$$\dot{C} = 0.0699 \text{ (ver anexo C.3)}$$

$$\begin{aligned} \text{Combustible arrastrado} &= 0.0699 \times 0.0101 \times 45.09 \\ &= 0.03 \text{ kg/h} \end{aligned}$$

a.4) Haciendo uso de la ecuación 4.8 se determinan las pérdidas por combustible sin quemar:

$$Q_a = 0.0699 \times 0.0101 \times 45.09 \times 8100$$

$$Q_a = 257.85 \text{ kcal/h (1.08 MJ/h)}$$

b) "**combustión incompleta.** Estas pérdidas se deben a la presencia de CO en los gases de combustión. Si la combustión es buena, son insignificantes y a veces no se tienen en cuenta. El combustible no quemado da lugar a una pérdida seria en la eficiencia del horno. Así, en la combustión del gas de convertidor, la presencia de 5% de CO y 1% de H₂ en los gases residuales es equivalente a una pérdida del 25% del calor potencial de los gases, y un 1% de CO equivale a un aumento de 90°C en la temperatura de los gases residuales" (Ocon, 1949).

El control de la combustión puede ayudarse por el empleo de aire secundario y terciario introducidos en el paso de la corriente de gas, siempre que no exista el riesgo de una cantidad excesiva de aire o una llama excesivamente reductora. El mismo efecto puede obtenerse por medio de quemadores auxiliares que lleven el exceso de aire necesario. Otra medida efectiva es el empleo de controles gas/aire (Ocon, 1949). Las pérdidas por combustión incompleta se evalúan de la siguiente forma:

$$Q_c = \omega_c P_2 (1 - \eta_c) \quad \text{ec. 4.9}$$

Donde:

Q_c = Pérdidas por combustión incompleta (Kcal/h).

ω_c = Flujo de combustible alimentado (Kg/h).

P_2 = Poder calorífico del combustible (Kcal/Kg).

η_c = Eficiencia de combustión.

c) "**gases de chimenea.** Estas pérdidas se deben a que los gases salen de la chimenea a una temperatura superior a la ambiente; es decir que incluyen el calor sensible de los gases procedentes de la combustión, calor sensible del aire en exceso, calor latente y sensible del vapor formado procedente de la humedad del combustible, y el generado en la reacción de combustión del hidrógeno. Todas estas pérdidas, pueden disminuirse si descendemos la temperatura a la que los gases dejan la instalación, por adición de aparatos que nos permitan un mayor rendimiento, como son los economizadores en una instalación de calderas, los regeneradores o calderas calentadas por gases de combustión en un horno y también reduciendo la humedad del combustible" (Ocon, 1949).

La forma de evaluar estas pérdidas, se hace a partir de la información obtenida en los resultados de calor útil (Q), pérdidas por combustible sin quemar (Q_a), pérdidas por estructura (Q_e), y se obtiene por diferencia según la siguiente ecuación:

$$Q_{ch} = \omega_c P_2 - Q - Q_a - Q_c - Q_e \quad \text{ec. 4.10}$$

Q_{ch} = Pérdidas por gases de chimenea (Kcal/h).

En estas, se incluyen las pérdidas por combustión incompleta, partículas de combustible que salen sin quemar por la chimenea y el calor sensible que lleva la ceniza que se saca del horno. Estos últimos dos son difíciles de calcular o de pequeña magnitud. Con la ecuación 4.10, y los resultados obtenidos en los cálculos anteriores se tiene:

$$Q_{ch} = 45.09 \times 4190 - 7846.057 - 255.35 - 1793.84$$

$$Q_{ch} = 108458 \text{ kcal/h (455.52 MJ/h)}$$

4.2.3 PERDIDAS EN LA ESTRUCTURA DEL HORNO

"El calor almacenado en el ladrillo y la pérdida a los alrededores se obtienen frecuentemente por diferencia. Estas pérdidas se hacen más importantes cuanto mayor es la temperatura del horno, haciendo más necesaria la protección térmica. La cuestión de si puede sustituirse el revestimiento interno por un aislante de alta temperatura o un refractario de alta calidad protegido por un aislamiento externo normal, es sólo cuestión de la temperatura y del desgaste impuesto por el calentamiento del refractario.

Al interpretar las características del refractario ha de tenerse en cuenta que el límite seguro de refractariedad bajo carga es en general 100°C más bajo que el valor hallado en los ensayos de laboratorio, puesto que a temperaturas elevadas los refractarios tienden a comportarse como cuerpos semiviscosos y con el tiempo pueden volverse fluidos, dejando sin protección la estructura del horno. En todo caso, puede darse mayor espesor al refractario,

con lo que disminuyen las pérdidas de calor y aumenta la estabilidad del horno. Esta técnica se aplica tanto a las bóvedas como a los techos colgantes.

La determinación exacta de las pérdidas por estructura es difícil, pero puede obtenerse una información considerable por medio de la temperatura de las superficies externas de los sistemas, relacionándolas luego con las propiedades del material".

(Ocon, 1949).

La pérdida por estructura se pueden evaluar de la siguiente manera; según lo planteado por Ocon (1949):

$$Q_e = A [C (t_1 - t_2)^{1.25} + 4.92 E^{-8} (T_1^4 - T_2^4) \epsilon] \quad \text{ec.4.11}$$

Donde:

Q_e = Pérdidas por estructura (kcal/h).

C = constante que depende de la forma y posición de la superficie.

T_1, t_1 = Temperatura de la superficie aire (°K, °C).

T_2, t_2 = Temperatura del aire (°K, °C).

ϵ = Emisividad del material de la superficie.

A = Area de la superficie del equipo expuesta al medio ambiente (m²)

"El valor experimental de C para tomar las temperaturas centígradas y que Q_e resulte en kcal/m²-h es el siguiente:

C = 2.2 para superficies planas horizontales orientadas hacia arriba y más calientes que el gas, o hacia abajo y más frías.

C = 1.7 para superficies verticales y cuerpos grandes de forma irregular, pero sin entrantes.

C = 1.15 para superficies horizontales más calientes que el gas y orientadas hacia abajo.

C = 2.0 para cilindros horizontales de diámetro superior a 15 cm. (a medida que decrece el diámetro el valor de C se eleva rápidamente, valiendo 20 para un cilindro de 0.25 mm. de diámetro)" (Ocon, 1949).

Para calcular las pérdidas por estructura se sigue el siguiente procedimiento:

- a) Medir la temperatura de la superficie de la pared del sistema en diferentes puntos de ésta, por un período de 4 ~ 5 horas.
- b) Tomar las dimensiones, forma y tipo de material de la superficie del equipo para efectos de calcular las areas expuestas al medio ambiente.
- c) Con la ec. 4.11 se procede de la siguiente manera:

Datos:

$$T_1 = 47.96 \text{ }^\circ\text{C} (320.96 \text{ K})$$

$$T_2 = 32 \text{ }^\circ\text{C} (305 \text{ K})$$

$$C = 1.7$$

$$\epsilon = 0.6 \text{ (anexo C.2)}$$

$$Q_e = 16.01 \times [1.7 \times (47.96 - 32)^{1.25} + 4.92\text{E}^{-8} \times (320.96^4 - 305^4) \times 0.6]$$

$$Q_e = 1793.84 \text{ kcal/ h (7.53 MJ/h)}$$

4.3 EFICIENCIA ENERGETICA

En cualquier sistema, la eficiencia fija una parte importante de los costos de operación, al determinar la energía requerida para producir una cantidad de energía útil.

En una caldera la eficiencia energética se calcula por medio de la ecuación presentada por Avalos (1941), y se define de la siguiente manera:

$$\eta_e = \omega_v (H_v - H_a) \div \omega_c P_2 \quad \text{ec. 4.12}$$

Para un horno:

$$\eta_e = \omega_a C_p (T_s - T_a) \div \omega_c P_2 \quad \text{ec. 4.13}$$

Donde:

η_e = Eficiencia energética.

Para el cálculo de la eficiencia energética de los equipos de generación de calor, es necesario conocer la potencia suministrada al sistema y la potencia útil generada. Para ejemplificar consideremos la caldera (2) según la nomenclatura de la tabla 3.3, y haciendo uso de la ec. 4.12.

Datos:

$$Q = 1,098,837.471 \text{ Kcal/h}$$

$$\omega_c = 863.186 \text{ Kg/h}$$

$$P_2 = 4,039 \text{ Kcal/Kg}$$

$$\eta_e = [1,098,8837.471 \div (863.186 \times 4,039)] \times 100$$

$$\eta_e = \mathbf{31.51 \%}$$

Los cálculos de Q_a , Q_e , Q_{ch} y Q se hicieron con los datos del Quemador de cascarilla. En el anexo A se encuentra un resumen de todos los resultados obtenidos en los diferentes sistemas caracterizados.

Tabla 4.1 Parámetros de Comparación

Equipo	Coefficiente Global de T. de Q (W/m ² C)	Eficiencia Energética (%)	Potencia Util (MJ/h)	Pérdidas por Chimenea (MJ/h)	Pérdidas por Estructura (MJ/h)	Pérdidas por Combustible sin Quemar (MJ/h)
Quemador de Cascarilla	334.51	37.1	294.19	491.0	7.53	1.07
Calderin	61.42	20.9	176.01	650.0	12.86	2.38
Caldera (1)		41.2	8560.18	12213.83	3.71	16.1
Caldera (2)		31.5	4615.11	9990.92	1.64	35.23
Caldera (3)		16.15	4185.47	21592.55	13.28	125.58
Caldera (4)		62.7	2120.83	1248.59	12.216	0.792
Caldera (5)		17.24	2077.6	9947.146	11.5	10.65

- (1) Con sistema precalentador de aire y horno sin parrilla
- (2) Con sistema precalentador de aire y horno con parrilla
- (3) Sin precalentador de aire, horno con parrilla y hogar sin contacto con la coraza
- (4) Sin precalentador de aire y con parrilla en el horno
- (5) Sin precalentador de aire y con parrilla en el horno (b)

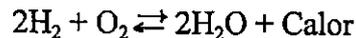
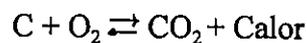
5.0 COMBUSTION Y COMBUSTIBLES

5.1 COMBUSTION

"Los combustibles más comunes constan de carbono, hidrógeno y oxígeno, con algunas pequeñas cantidades de azufre y trazas de otros elementos.

Tanto los elementos, como sus compuestos, arden en la combustión, procurando obtener la mayor cantidad de calor posible, de ahí que la evaluación de la magnitud del calor no utilizado sea de gran interés. Para el logro de tal fin, la comprensión de los principios fundamentales de la transferencia de calor y los procedimientos de medida del calor son indispensables.

Para fines prácticos, la combustión involucra la oxidación de tres elementos: carbono, hidrógeno y azufre. Primordialmente tres reacciones químicas tienen lugar:



La combustión obtenida por la reacción de proporciones exactas de combustible y oxígeno para obtener una completa conversión a dióxido de carbono, vapor de agua y dióxido de azufre (si se encuentra presente el azufre) es conocida como combustión estequiométrica. De contar con una mayor cantidad de O_2 que la requerida para una combustión perfecta, el oxígeno en exceso no se usará. Si hay menor cantidad de oxígeno

que el necesario teóricamente para una combustión perfecta la reacción se conoce como subestequiométrica. Durante esta pueden formarse productos adicionales como: Monóxido de Carbono (CO), gas de Hidrógeno (H_2), compuestos de hidrocarburos (C_xH_y), sulfuro de hidrógeno (H_2S) y carbono. Estos productos son contaminantes comunes dispersados a la atmósfera en los gases de combustión.

El aire seco utilizado en la combustión consta de oxígeno y gases inertes, principalmente nitrógeno. Estos gases inertes incluyen también argón y trazas de gases nobles, los que debido a las pequeñas cantidades en que se encuentran usualmente son considerados como nitrógeno.

El oxígeno para la combustión normalmente proviene del aire, donde se encuentran en una proporción de un 21% del volumen total. La mayor parte del 79% remanente es Nitrógeno y sólo un pequeño porcentaje de él forma parte de la combustión.

El contenido en humedad del aire está sujeto a variaciones extremas que dependen de las condiciones atmosféricas, por lo que es necesario su determinación por separado.

En la práctica una combustión bien realizada presenta humo de color transparente; una combustión con un exceso de aire inadecuado da a los humos un color blanco y una combustión incompleta humos de color negro" (Ocon, 1949).

5.1.1 AIRE EN EXCESO

La combustión completa no ocurre en la práctica, de no inyectarse una cantidad adicional de aire respecto al teórico. Para el caso de los combustibles sólidos, la afirmación anterior se fundamenta en:

- a) Dificultad de mezclar el aire y los volátiles desprendidos del combustible encima del lecho incandescente.

- b) No siempre la combustión toma lugar dentro de la zona destinada a ella.

La fisicoquímica demuestra que la velocidad de una reacción química es proporcional a la concentraciones de las sustancias reaccionantes. Dicho de otro modo, a medida que la combustión progresa las concentraciones de combustible y oxígeno disminuyen, siendo necesario suplir un exceso de oxígeno para mantener la velocidad de reacción dentro de valores suficientes de forma que la reacción finalice antes que los gases abandonen el horno.

La velocidad de combustión depende además, de la velocidad a la que el aire pasa por el combustible, ya que los gases generan un movimiento que favorece el intercambio de O_2 y CO_2 con la superficie sólida.

El aire mezclado con el combustible en el quemador se conoce como **aire primario**. El aire de la atmósfera que se difunde en la llama se conoce como **aire secundario**, muy necesario para el caso de los combustibles sólidos, pues estos desprenden materias volátiles. En suma, la combustión necesita aire primario y secundario, y su rendimiento depende de que ambos entren en cantidades adecuadas. El aire secundario correctamente dosificado ha de combinarse con los volátiles que abandonan el combustible para hacerlos combustionar completamente con el mínimo exceso de aire antes que abandonen el hogar.

Es interesante conocer el efecto perjudicial producido por un exceso de aire. Los gases calientes tienen el calor en forma de calor sensible, que es la cantidad de calor que se ha necesitado para llevarlos de la temperatura base a aquella en que se encuentra.

$$\text{Calor sensible} = \text{Volumen} \times \text{Calor específico} \times \Delta T \quad \text{ec. 5.1}$$

Por tanto, el calor sensible depende del volumen en condiciones normales, del calor específico y de las temperaturas, una vez fijada una base para éstas. Cuando se ha empleado aire en exceso aumenta el volumen de gases de combustión, mientras que el calor específico no se altera prácticamente. Por lo cual el calor sensible aumenta proporcionalmente a aquel. Este calor se pierde completamente y la pérdida sólo puede reducirse procurando no emplear un exceso muy grande de aire (Ocon, 1949).

5.1.2 TIEMPO DE RESIDENCIA

"Todas las reacciones químicas necesitan un tiempo dado para completarse, lo que es debido a la naturaleza de la reacción o a la dificultad de contactar rápidamente las sustancias reaccionantes.

Para el caso particular del uso del combustible sólido, un lecho demasiado delgado (o delgado en relación al tamaño del mismo) facilita el paso del aire sin llegar a consumirse por falta del contacto adecuado dentro del combustible y el aire.

La combustión en el horno no es instantánea, toma cierto tiempo para efectuarse y antes de dicho tiempo no deben pasar los gases entre los tubos de la caldera porque se enfriarían por abajo de su temperatura de combustión interrumpiéndose ésta antes de tiempo". (Ocon, 1949).

5.1.3 TEMPERATURA

"La combustión toma lugar a una temperatura determinada. Usualmente la ignición se efectúa agregando calor de una fuente exterior a la mezcla hasta que se alcanza la temperatura a la cual la reacción con el oxígeno es suficientemente rápida y los componentes de la mezcla se hallan en proporciones adecuadas. La menor temperatura a la que esta es posible se denomina **temperatura de ignición**. La tabla 5.1 muestra la temperatura de ignición de algunos combustibles en el aire. Estos valores no son absolutos, pues están en función de las condiciones.

En la tabla 5.2 se pone de manifiesto la influencia del factor "proporciones adecuadas" de la mezcla aire/combustible sobre los límites de ignición de ésta. Por ejemplo, para un 3% de carbón no se produce la ignición, que si toma lugar al lograr el valor límite de 5.3%. Este es el denominado límite inferior de inflamabilidad. De aumentarse la proporción de gas en la mezcla, la ignición se logra mejor; pero se llega un momento donde la inflamabilidad comienza a decrecer y para concentraciones del 31% en adelante ya no se verifica la ignición. Esta composición es conocida como límite superior de inflamabilidad.

La temperatura más alta producida en la combustión es la **temperatura de llama**. La temperatura de la llama de combustión de un gas (o materia volátil) depende de numerosos factores tales como: la potencia calorífica del gas o vapor, los calores sensibles del aire y del gas, la utilidad de los productos de combustión y sus calores específicos, aire en exceso, disociación.

- a) **La potencia calorífica del gas o vapor.** El calor comunicado a la llama es el obtenido en la combustión. Hemos de tomar un valor neto, ya que el vapor de agua producido abandona la llama sin condensarse.

b) **Los calores sensibles del aire y el gas.** Si se precalientan el aire o el gas, el calor sensible dado se unirá al producido en la combustión. Junto con éste, y una vez restado el calor perdido por c.5) tendremos la entrada de calor en la llama.

Tabla 5.1 Temperatura de Ignición en el Aire

Sustancia	Temperatura (°C)	Temperatura (°F)
Carbón bituminoso para gas	370	700
Carbón bituminoso ordinario	400-425	750-800
Carbón de Gales para vapor	470	880
Antracita	500	930
Coque (blando)	425-500	800-930
Coque (duro)	500-650	930-1020
Hidrógeno	580-590	1080-1095
Monóxido de carbono	644-658	1191-1216
Metano	650-750	1200-1380
Etano	520-630	970-1170
Etileno	542-547	1008-1016
Benceno	740	1365
Tolueno	810	1490
Alcohol etílico	558	1036
Aceite de cilindros	417	783
Gas-oil	336	638
Petróleo	295	562

(Ocon, 1949)

c) **La utilidad de los productos de combustión y su calor específico.** El calor producido en la ignición del gas se emplea en calentar los productos de combustión hasta la temperatura de la llama. Se encuentra el calor empleado en la calefacción de cada sustancia multiplicando su masa por el calor específico y la diferencia entre la temperatura de la llama y la ambiente. Puesto que el calor específico de los gases varía con la temperatura, se necesita conocer los valores a distintas temperaturas para determinar la temperatura teórica de la llama.

Tabla 5.2 Límites de Inflamabilidad en el Aire

Sustancia	Límite inferior % en volumen	Límite superior % en volumen
Gas de carbón	5.3	31
Benceno	1.4	7.5
Gas de alto horno	35.0	74.0
Monóxido de carbono	12.5	74.0
Hidrógeno	4.0	75.0
Metano	5.0	15.0

(Ocon, 1949)

Indudablemente la temperatura de la llama será mayor cuanto menor sea el calor requerido por los productos de combustión. La presencia de inertes o gases que no tomen parte en la combustión disminuirá la temperatura de la llama.

d) Aire en exceso. El aire en exceso empleado aumentará el calor disponible si se añade precalentado, pero en todo caso el balance térmico será negativo por tener que calentarse hasta la temperatura de la llama.

e) Disociación. Las reacciones de combustión $C + O_2 \rightleftharpoons CO_2$ y $2H_2 + O_2 \rightleftharpoons 2H_2O$ son reversibles a temperaturas elevadas, lo cual quiere decir que en estas condiciones no llegan a verificarse por completo. Consecuentemente, debe restarse una parte del calor de combustión de c.1), proporcional a la extensión en que la proporción es incompleta, tanto mayor cuanto más elevada sea la temperatura de la llama.

Cuando hay superficies frías en la proximidad del hogar debe mezclarse el aire secundario con los gases tan pronto y tan bien como se pueda. En este sentido, es muy ventajoso el empleo de aire precalentado. Sin embargo, esta mezcla inmediata debe evitarse en ciertos hornos en que se requiere una llama larga.

La velocidad de reacción se duplica o triplica por cada 10°C de aumento de temperatura. En consecuencia las temperaturas elevadas, que pueden obtenerse por precalentamiento de aire, favorecen la combustión rápida. Se ha demostrado que a la temperatura del horno los hidrocarburos contenidos en el gas de carbón o la materia volátil del mismo se descomponen completamente en carbono e hidrógeno en 1/30 de segundo. Si se quiere evitar la producción de humo negro, hay que procurar que este carbono arda inmediatamente. Aquí juega un papel muy importante las superficies frías. Aunque las llamas tienen temperaturas superiores a 1100°C, variables con la temperatura del lecho combustible y la distancia al mismo, el metal de la caldera, por ejemplo, tiene una temperatura no superior a la del vapor saturante, de unos 230°C. La carga de los hornos suele también añadirse fría. Si tocan las llamas en estas superficies se interrumpe la combustión, pasando el CO y el H₂ a los gases usados. En condiciones extremas se queda también sin quemar el carbono, dando lugar a la formación de humo.

El efecto de las superficies frías puede ir aún más allá. Si cortamos la llama luminosa del gas de carbón con un recipiente lleno de agua fría, las paredes del mismo se recubren inmediatamente de una capa de carbón. De forma análoga se deposita el hollín en las superficies metálicas de la instalación. Este carbón, además de representar una pérdida de poder calorífico disminuye la conductibilidad térmica de las paredes y con ello la transmisión del calor de la llama" (Ocon, 1949).

El enfriamiento de la llama del horno es debido a:

- a) Cargas grandes y no muy frecuentes.
- b) Entrada excesiva de aire.

- c) Una llama larga que toque las superficies.
- d) La forma de la instalación.

5.1.4 TURBULENCIA

"El movimiento turbulento favorece la mezcla rápida del gas y el aire. En esta se mezclan en un pequeño volumen, aumentando la probabilidad de contacto aire-combustible. Por el contrario en presencia de movimiento laminar, la combustión se torna lenta gracias a que las corrientes paralelas de gas y aire se difunden lentamente.

La inyección de aire secundario es inducido al hogar por medio de un chorro de aire en contracorriente con respecto al flujo de combustible estimulando así la turbulencia". (Ocon, 1949).

5.1.5 TIRO

"En la combustión es imprescindible la distribución apropiada del aire en el emparrillado cuando se quema leña o carbón en trozos grandes, o en el hogar cuando se queman combustibles líquidos, gaseosos o sólidos. Además, resulta importante el control sobre la velocidad de la corriente de aire para obtener distintas actividades de combustión, y para lograr la renovación constante del aire sobre cada trozo o partícula de combustible y para que los productos de combustión sean arrastrados hacia la chimenea. Para que todo ello se verifique, debe existir entre el lugar de entrada del aire al hogar y el de salida de los productos de la combustión, una cierta diferencia de presión.

El fenómeno que da paso al movimiento de la masa gaseosa recibe el nombre de tiro.

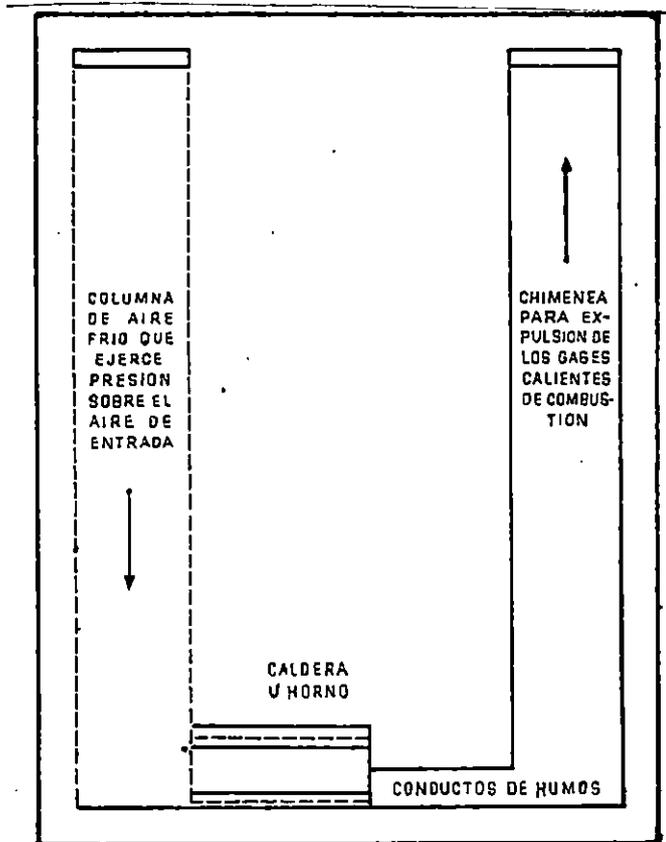


FIG. 5.1 Esquema para la demostración del tiro natural, que muestra la analogía entre una chimenea y un tubo en U con flúidos de densidades diferentes en cada rama.

Si la corriente de aire se debe a la aspiración de una chimenea se trata del **tiro natural**, de lograrse por medio mecánico recibe el nombre de **tiro artificial**. Las diferencias de presiones que se obtienen con los medios citados son relativamente pequeñas, por lo que usualmente el tiro se mide en milímetros de columna de agua. Debe considerarse que la diferencia de presión necesaria depende fundamentalmente de la resistencia que opone la instalación al movimiento de la corriente gaseosa desde el cenicero hasta la boca de la chimenea.

Para hallar el límite a que puede llevarse el tiro natural, deben obviamente conocerse las causas que originan el movimiento del aire.

La chimenea del horno y el aire exterior forman un tubo en U (fig. 5.1). Una de las ramas es la chimenea, y la otra es una columna hipotética de aire frío, y el tramo horizontal está formado por el horno o la caldera y los conductos de humo. En la práctica se consideran iguales los pesos específicos del aire y los gases de combustión (1.22 Kg/m³ a 15.5 °C y presión atmosférica normal).

Así, una chimenea con 40 m de altura, el peso de la columna de aire frío de 1 m² de sección será 48.8 Kg (40 x 1.22). Tomando como temperatura media de la chimenea 170 °C, el peso de una columna de gases de combustión de iguales dimensiones será:

$$48.8 \text{ Kg} + (15.5 \text{ °C} + 273) \div (170 \text{ °C} + 273) = 31.8 \text{ Kg}$$

Dada la relación inversa existente entre volúmenes específicos.

Puesto que el contenido de una de las ramas en U es más pesado que el de la otra (mantenido así por el funcionamiento del horno), se produce un movimiento continuo de descenso del aire atmosférico más pesado y ascenso de los gases de combustión más ligeros en la rama de la chimenea.

La fuerza motriz será de (48.8 - 31.8 = 17 Kg), y como actúa en una sección de 1m² la presión motriz será de 17 Kg/ m². Como una columna de agua de 1m² de base y 1mm de altura pesa 1Kg, esta presión equivale a la ejercida por 17 mm de agua. El tiro medido será menor que el correspondiente a esta presión.

En síntesis, el tiro tiene por finalidad:

a) Hacer llegar al hogar el aire necesario para la combustión.

- b) Obligar a los gases a recorrer los conductos de humos, y
- c) Evacuarlos a una altura considerable, para que no produzcan inconvenientes en las zonas habitadas.

Se sabe que la función del tiro es llevar el aire en contacto con el combustible. Un exceso de aire superior al necesario para la combustión completa simplemente ocasiona un gasto innecesario de combustible.

Al poner el aire en contacto con el combustible, los productos de la combustión formados deben ser separados; para tal fin debe existir una corriente gaseosa a través del sistema. El aire entra al sistema y pasa a través del horno, donde se calienta por las reacciones de combustión en que toma parte. Los gases formados en el horno pasan a través del resto de la instalación, cediendo la mayor parte de su calor y finalmente salen por la chimenea.

El movimiento de los gases, comprendida la admisión de aire en el horno, puede efectuarse en diferentes formas:

- a) El aire puede ser aspirado por el tiro natural ejercido por una chimenea, o bien por:
- b) Por un ventilador situado en la base de la chimenea.
- c) Inyectando el aire a presión por medio de un ventilador. Esta presión impele el aire a través del combustible, mientras que en la chimenea los gases escapan libremente.
- d) El paso del aire puede forzarse por inducción con un chorro de vapor, ejerciendo entonces la chimenea el mismo papel que en c).
- e) Al mismo tiempo que se introduce el aire por medio de un ventilador/impulsor se sacan los gases de combustión con un ventilador/extractor, haciendo que en el espacio de combustión sea nula la sobrepresión. Esto es lo que se conoce con el nombre de **tiro compensado**.

El tiro determina la razón a la que los gases de combustión pasan a través del fogón o caldera. El tiro excesivo puede producir un aumento de temperatura en la chimenea y también reducirá el porcentaje de CO₂ en los gases de combustión.

El tiro inadecuado puede resultar en insuficiente aire de combustión y en una operación humeante. Con un tiro perfecto la llama se copará, proyectándose en tal forma de casi llenar el hogar, proporcionando un tiempo máximo para una combustión completa y limpia.

Las lecturas del tiro se toman normalmente en el fogón y en la chimenea. Un tiro bajo en el fogón, puede resultar en escape de humo y otros productos de combustión a las áreas circundantes. El tiro de la chimenea debe ser suficientemente elevado para prevenir presión positiva en la cámara de combustión" (Ocon, 1949).

5.1.6 EFICIENCIA DE COMBUSTION

"Este parámetro determina que tan eficientemente ocurrió la combustión y se evidencia por la presencia de CO en los gases de combustión. Su magnitud se ve afectada por el exceso de aire suministrado, temperatura de la llama, dinámica de contacto de la mezcla aire-combustible, etc..

Estequiométricamente la eficiencia de combustión puede calcularse si se conoce el porcentaje volumen de dióxido de carbono y monóxido de carbono formados en la reacción de combustión y se define mediante la siguiente expresión" (Avalos, 1941):

$$\eta_c = \%CO_2 \div (\%CO_2 + \%CO) \quad \text{ec. 5.2}$$

En síntesis, este parámetro puede interpretarse como una medida del rendimiento operativo de la unidad.

5.2 COMBUSTIBLES

"Combustible es todo material capaz de combinarse con el oxígeno del aire y generar calor en tal cantidad y rapidéz, que su uso sea costeable.

Según su estado los combustibles se clasifican en: sólidos, líquidos y gaseosos. De acuerdo a su procedencia se constituyen en naturales y artificiales. Los combustibles naturales se obtienen de la naturaleza en la forma en que se usan: carbón, leña. Los combustibles artificiales sufren ciertas transformaciones antes de emplearse como tales: bunker, diesel, gasolina" (Avalos, 1941).

"La tendencia en la utilización de biomasa (leña y cascarilla de café) como combustible para los beneficios de café está determinada por su disponibilidad y precio en el mercado local.

La leña se obtiene de la limpieza de las fincas y la cascarilla del procesamiento del grano de café, que según cálculos preliminares basados en el poder calórico promedio revelan que tan sólo éste último podría suplir la totalidad de las necesidades energéticas del secado, si la eficiencia global (transferencia de calor/secado) estuviera en alrededor del 75%.

Tanto la leña como la cascarilla son considerados como combustibles pobres, es decir, que son combustibles de poca densidad energética, por lo que de ellos es requerido un mayor volumen para conseguir una determinada producción de calor que el volumen necesario de petróleo.

Conociendo las propiedades de la cascarilla como combustible, se concluye que es el más conveniente. Por una parte, es producido dentro del beneficio, siendo su transporte y alimentación relativamente sencillos. Por tener características de fluido, la cascarilla debe ser dosificada regularmente por medios automáticos, con lo que se logra que éste combustione cuando aún está en suspensión, lográndose tasas de liberación de calor considerablemente mayores a las obtenidas con grandes lechos de leña. Por el contrario, la leña debe ser quemada en lecho fijo, limitando sensiblemente la tasa de quemado". (Koss, 1989).

Entre los equipos evaluados, algunos usan mezcla de cascarilla de café y leña como combustible, otros funcionan sólo con cascarilla y se encontró solamente un sistema que trabaja específicamente con leña.

En síntesis, los combustibles más utilizados en el beneficiado de café son la cascarilla de café y la leña (pepeto), que tienen poderes caloríficos comprendidos entre 3500 y 4000 kilocalorías por kilogramo. Esto se evidencia en la tabla 5.3 .

"Poder calorífico (P.C.S.), es el calor producido a volumen constante por la combustión completa de una cantidad unitaria de combustible y enfriando los productos de combustión hasta la temperatura inicial del combustible en un calorímetro de bomba de oxígeno en condiciones específicas. El resultado incluye el calor latente de vaporización del agua en los productos de combustión y se denomina calentamiento bruto o poder calorífico superior (Avalos, 1941). Puede expresarse en kcal/Kg o en BTU/Lb. El poder calorífico del carbono es: 8100 Kcal/Kg (14600 Btu/lb).

Poder Calorífico Inferior (P.C.I.), es el poder calorífico superior disminuido del calor de vaporización del agua contenida o producida por el combustible.

$$(P.C.I.) = (P.C.S.) - r A \quad \text{ec. 5.3}$$

Donde:

A = Agua resultante de la combustión del hidrógeno más la humedad del combustible por unidad de peso del combustible.

r = Calor latente o calor de vaporización del agua (puede tomarse 1080 BTU/Lb de agua ó 600 kcal/Kg)" (Avalos, 1941).

5.2.1 ANALISIS APROXIMADO DE UN COMBUSTIBLE

Es el análisis convencional que establece el porcentaje de humedad, materia volátil, carbón fijo y ceniza, contenidas en el combustible.

La humedad del combustible (h), se encuentra calentando una muestra del mismo hasta 150 °F y manteniéndola en dicha temperatura durante 24 horas.

La materia volátil (M.V.), se encuentra aumentando la temperatura de la muestra anterior a 1700 °F y manteniéndola así por espacio de 7 minutos; la materia volátil es la disminución de peso que presenta la muestra.

La ceniza (Z), se obtiene quemando una muestra de combustible en una atmósfera de oxígeno en la cual se le mantiene al rojo durante 12 a 24 horas, siendo la ceniza lo que quede de la muestra.

El carbón fijo (C.F.), es la diferencia entre el peso original de la muestra y la suma de la humedad, la materia volátil y la ceniza.

5.2.1.1 ANALISIS QUIMICO

EL análisis químico de un combustible nos presenta la composición del mismo, expresada en sus elementos químicos: C, H, S, etc. (Avalos, 1941).

Tabla 5.3 Propiedades Químicas de los Combustibles Utilizados en el Beneficiado de Café

Combustibles	% Peso , base seca				Humedad total	Cenizas	Poder calorifico
	C	H2	S2	O2	% base humeda	% base humeda	Kcal/kg
Leña de café	50.89	4.42	0.07	44.55	11.09	2.53	4131
Cascarilla de café	47.16	4.64	0.12	48.08	9.14	1.01	4190
Leña de manzano	49.63	4.71	0.07	45.57	10.01	1.98	3973
" " ciprés	50.39	4.60	0.34	44.64	10.03	0.45	4341
" " pepeto					10.0	1.91	4022
" " madrecaao					14.63	1.73	3811
Leña *	56.62				12.05	2.39	
Cascarilla de café *	57.98				9.49	0.05	

(Koss, 1989; Archila, 1993)

* Analizado en Laboratorios de PROCAFE

OBSERVACIONES

- 1) Dentro del beneficiado de café, específicamente en la etapa de secado se han encontrado cuatro tipos de máquinas secadoras, estas son: Presecadora Horizontal, Secadora Cilíndrica Vertical tipo Pacas, Secadora de Cilindro Horizontal Rotativo (Guardiola), y la Secadora de Columna Vertical.
- 2) De las secadoras mecánicas nombradas, la Presecadora Horizontal es usada específicamente en la etapa de presecado; la Secadora de Columna Vertical se emplea tanto en la etapa de presecado como en la de secado. Las dos máquinas secadoras restantes operan exclusivamente en la etapa de secado de café pergamino húmedo.
- 3) La Presecadora Horizontal y la secadora de Cilindro Horizontal Rotativo fueron diseñadas estrictamente para lotes, no para operación continua. Estas son máquinas simples, libres de problemas y no requieren gran pericia para operarse; además no han sido diseñadas para recircular aire.
- 4) La secadora Cilíndrica Vertical y la secadora de Columna Vertical pueden tener operación continua o por lotes. La secadora de Columna Vertical se encontró algunas veces en combinación con silos homogenizadores, lo que permite alternar períodos de secado y reposo. Son estas secadoras las que fueron encontradas con mayor frecuencia en los beneficios de café visitados en el país.
- 5) Teniendo en cuenta que la necesidades de un control de operación de los hornos no son tan exigentes, esto hace que el control de temperatura del aire desecante sea lo único que ellos verifican constantemente, puesto que éste aire es el que influye en la calidad del café que está siendo secado.

- 6) Al observar los diferentes equipos de fuego indirecto, se ve claramente que el quemador de cascarilla tiene como inconveniente la emanación de partículas sólidas al medio ambiente, las cuales salen a través de la chimenea.
- 7) En ciertos equipos donde se midieron los flujos de aire, estos no cumplían con las condiciones mínimas de longitud de ducto que es de 6 veces el diámetro del ducto, para lograr tener un flujo laminar.
- 8) De la perspectiva del intercambio de calor, el coeficiente global de transferencia, es un parámetro que evidencia la efectividad con la que la superficie de calefacción y por ende los equipos están siendo utilizados; debido a ello, su cálculo es obligado. Para dar valores exactos es recomendable obtener modelos matemáticos, puesto que se presentan variables que deben controlarse. Para efecto de caracterizar los sistemas de generación de calor sólo se presenta una aproximación de éste parámetro.

CONCLUSIONES

- 1) Desde el punto de vista del aprovechamiento energético, es necesario hacer ver que los equipos de generación de calor encontrados, presentan fallas que pueden ser erradicadas al modificar la superficie de calefacción y aumentar el tiempo de contacto. Con ello se lograría mejorar la eficiencia de los equipos, ahorrar combustible y disminuir los costos de operación.
- 2) En cuanto a la eficiencia de los hornos de fuego indirecto, se encontró que los equipos se hallan en un rango del 20 al 50 % de su rendimiento energético.
- 3) Los resultados obtenidos en los diferentes sistemas se emplearon en la elaboración del presente diagnóstico de operación de los equipos, para que a partir de éste se puedan seleccionar los que puedan ser sujetos de investigaciones futuras, con la tendencia encaminada a mejorar los sistemas al buscar alternativas o desarrollar tecnología con costos de fabricación adecuados a las condiciones económicas de nuestro país.
- 5) En cuanto a las calderas, por ser diseños extranjeros, se pueden sugerir modificaciones que giran en torno a la forma de alimentación de combustible, cantidades de aire en exceso, tipo de parrilla; considerando de antemano el tamaño de partícula y tipo de combustible.
- 6) Las calderas consideradas en el estudio, debido a que no trabajan a plena capacidad, se consideraron sus rendimientos según las condiciones imperantes en el período de prueba, resultando la caldera sin precalentador de aire y con parrilla en el horno (5) con mejor eficiencia global, y la caldera sin precalentador de aire, con parrilla y horno sin contacto con la coraza (3) con la eficiencia más baja. Las eficiencias de las calderas evaluadas se encuentran en el rango de 16 y 62 % de su aprovechamiento energético.

7) Con los datos recabados no es acertado hacer generalizaciones sobre el tiempo de secado de éstas, aunque se tratara del mismo equipo, ya que depende de factores tales como: tamaño del grano, limpieza del pergamino, contenido de humedad inicial del grano, humedad relativa del aire ambiental, humedad relativa del aire desecante, forma como penetra el aire a la masa de café, cantidad de aire suministrado, velocidad del aire y espesor de la capa de café.

RECOMENDACIONES

- 1) Realizar un estudio de la combustión de la cascarilla de café, con el objetivo de encontrar las mejores condiciones para que éste energético se quemé adecuadamente; entre las condiciones a considerar están: la cantidad de aire suministrado, el tipo de lecho para la combustión, la forma de alimentación del combustible, tiro y el volumen de la zona de combustión.
- 2) Mejorar los mecanismos de control de operación de los hornos, para evitar pérdidas excesivas de energía y fluctuaciones de temperatura del aire desecante que puedan dañar la calidad del grano de café.
- 3) Mejorar las superficies de transferencia de calor encontradas. Es necesario ampliarlas o introducir una geometría que permita un mayor tiempo de contacto entre los gases de combustión y el aire que es calentado, lo cual incidirá en una disminución de la cantidad de combustible alimentado y disminuirá costos de operación.
- 4) Hacer pruebas con un flujo de aire desecante mayor que el utilizado actualmente en la secadora cilíndrica, con el objeto de reducir la resistencia que ofrece la camada de café al paso de el aire; o por el contrario, aumentar la velocidad de caída del grano, teniendo como finalidad reducir el tiempo de contacto.
- 5) Para las secadoras de duelas, es bueno realizar pruebas con dos entradas de aire, con la segunda entrada más arriba que la que posee, pero teniendo en cuenta de encontrar el lugar adecuado para lograr una temperatura homogénea en el interior de la secadora con el objetivo de volver más eficiente el proceso, al reducir el tiempo de secado.

GLOSARIO

Atmósfera oxidante. Un ambiente fluido con un exceso de oxígeno o de iones formadores de ácidos.

Atmósfera reductora. Ambiente con exceso de hidrógeno o iones formadores de bases.

Caída de presión. Es la diferencia de presión entre dos puntos, causada por la resistencia al rozamiento y condensación en una línea de tubería.

Calor. El calor es energía en transición (en movimiento) de un sistema o cuerpo a otro, solamente debida a una diferencia de temperatura entre dos cuerpos o sistemas.

Calor sensible. Es el calor que produce una elevación de temperatura en un cuerpo.

Coefficiente de transmisión de calor. Denota la cantidad de flujo de calor en Kcal (Btu) por hora através de un m^2 (pie^2) de superficie por grado de diferencia de temperatura. $Kcal/(h m^2 ^\circ C)$; $Btu/(h pie^2 ^\circ F)$.

Conducción. Es la transmisión del calor entre dos cuerpos o partes de cuerpos en los que existe una diferencia de temperatura.

Convección. Es estrictamente un medio de mover energía de un lugar a otro, es un transporte de energía. Ocurre debido a que un fluido en movimiento recoge energía de un cuerpo caliente y la entrega a un cuerpo más frío.

Coraza. Se le llama así, a la parte exterior de todo intercambiador de calor, es decir, es lo que envuelve la bancada de tubos.

Cuerpo negro. Una referencia teórica que 1) absorbe toda la radiación que cae sobre él sin transmitirla o reflejarla, y 2) irradia más energía en un tiempo dado que cualquier otro cuerpo de forma similar, a la misma temperatura.

Densidad. Característica física de un material tal como un fluido que indica la masa por unidad de volumen, Kg/m³ (lb/pie³).

Ebullición. Es la vaporización de un líquido que tiene lugar en el mismo seno del líquido.

Emisividad. Es la relación de energía emitida por un objeto a la emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura.

Entalpia. Es la cantidad de calor total que tiene la unidad de peso de un fluido en su estado líquido o en su fase vapor, se mide en Kcal/kg o Btu/lb.

Espejo. Se le llama así, a las superficies que tienen los intercambiadores de calor al inicio y al final, siendo éstas, laminas agujereadas donde se colocan o se fijan los tubos del intercambiador de calor.

Evaporación de una caldera. Se llama así, a la cantidad de vapor que produce una caldera bajo determinadas condiciones de presión absoluta en una hora y con determinada temperatura del agua de alimentación.

Flujo laminar. Flujo en el que las partículas de un fluido se mueven en líneas paralelas y en una sola dirección. Caracterizado por una velocidad relativamente baja.

Flujo turbulento. El que se presenta en un fluido que se mueve en una dirección como masa de remolinos de tamaño variable. Estos flujos tienen un número de Reynolds superior a 2,100.

Humedad. Se refiere a la masa de vapor de agua por masa de aire seco limpio y se usa en conexión con los diagramas de humedad.

Presión. Es la fuerza ejercida por el fluido en la unidad de superficie de la pared del recipiente que lo contiene o del seno mismo del fluido. Se mide por medio de un manómetro y se expresa en kg/cm^2 , lb/pulg^2 o bars.

Presión estática. La fuerza, por unidad de superficie, medida sobre la pared de un tubo que conduce un fluido.

Presión dinámica. La diferencia entre la presión de impacto y la presión estática. Presión debida a la velocidad de un fluido en movimiento.

Presión de impacto. La presión se genera cuando un fluido en movimiento deja de moverse repentinamente. Está relacionado únicamente a la velocidad del fluido en movimiento.

Presión de vapor. Fuerza por unidad de superficie, ejercida por el vapor en coexistencia con la fase líquida correspondiente.

Porcentaje de humedad. Es la relación de las moles de vapor por mol de gas libre de vapor con las moles de vapor que estarían presentes por mol de gas libre de vapor si la mezcla estuviera completamente saturada a la temperatura y presión total existentes.

Radiación. La emisión y propagación de energía desde la superficie de un cuerpo a través de un medio tal como el aire, en la forma de ondas electromagnéticas. La cantidad de energía radiante es directamente proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta del cuerpo.

Temperatura. El grado de calor de un cuerpo, que se manifiesta por su habilidad de transmitirlo o recibirlo.

Temperatura ambiente. La temperatura del medio que rodea el objeto bajo consideración.

Temperatura de bulbo seco. Es la temperatura ordinaria que siempre se ha utilizado para un gas en °F o °C (°R o K).

Termopar. Un dispositivo para medir temperatura que consiste en dos alambres disímiles unidos por el extremo. Un milivoltaje se produce en proporción a la diferencia de temperatura de la juntura.

Tubo de pitot. Un instrumento primario para la medición de flujos en tubos y ductos. Por medio de una conexión que conduce al punto de impacto, se mide la presión dinámica y una en la pared del tubo mide la presión estática; la diferencia entre ambas se correlaciona con el flujo.

Vapor. La fase gaseosa de agua. también se refiere a la fase gaseosa de cualquier líquido cuando se encuentran las fases de líquido y gas en equilibrio.

REFERENCIAS

Archila Chiquillo, L., Guzman Zaldaña, A. S., Mejía Velásques, H. E., "**Evaluación de la Eficiencia de las Estufas de Fuego Cerrado para Cocción de Alimentos en el Area Rural**", Trabajo de Graduación, previo a la opción del Título de Ingeniero Químico, Universidad de El Salvador, El Salvador, Octubre de 1993.

Avalos y Vez, L., "**Generadores de vapor**", Instituto Politécnico Nacional, Editorial ESIME, México D.F., (1941).

Caldas, F., "**Avances en el Secado de Café**", Revista abecafé, octubre.noviembre. diciembre , (1994). Páginas 30, 31 y 32.

Caldas, F., "**Evaluación del Secado de Café en Costa Rica**", ICAFE/CICAFE, San José, Costa Rica, (1992).

Clausen III, Chris A., Mattson G., "**Fundamentos de Química Industrial**", 1a. Edición, Editorial Limusa, S.A., México D.F., (1982).

Foust, A.S.; et. al., "**Principios de las Operaciones Unitarias**", 2a. Edición, Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V., México, (1984).

Himmelblau, D. M., "**Balances de Materia y Energía**", 4a. Edición, Prentice-Hall Hispanoamericana S.A., México D.F., (1988).

Kern, D. Q., "**Procesos de Transferencia de Calor**", Vigésima impresión, Cia. Editotal Continental S.A. de C.V., México D. F., (1987).

Koss, L., **"Evaluación de los Sistemas de Generación de Calor para el Secado de Café"**, Instituto del Café de Costa Rica, Centro de Investigaciones del Café, (1989).

Menchu, J. F., **"Manual Práctico de Beneficios de Café"**, Anacafé, Boletín No 13, Guatemala, (1973).

Núñez Lopez, R.A., **"Análisis de los Procesos del Beneficiado del Café"**, Trabajo de Graduación, Universidad de El Salvador, El Salvador, Junio de 1971.

Ocon García, J., **"La Utilización Eficiente de los Combustibles"**, Aguilar S.A. de Ediciones, Madrid, (1949).

Perry, R. H., Chilton, C. H., et. al., **"Manual del Ingeniero Químico"**, 5a. Edición, McGRAW-HILL Inc., Vol II, U.S.A., (1984).

Sivetz, M., **"Coffee Processing Technology"**, Westport, cenn, Avi Publishing, Vol I, (1963).

Treybal, R. E., **"Operaciones de Transferencia de Masa"**, 2a. Edición, McGraw-Hill / Interamericana de México, S.A. de C.V., México, (1988).

"Equipos y Técnicas de Medición para el Ahorro de Energía", M-004, Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología Industrial (ICAITI), Guatemala, (1985).

"Mejoramiento de la Eficiencia de Operación de Calderas de Vapor", M-001
Edición Preliminar, Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología
Industrial (ICAITI), Guatemala, (1981).

"Primer Seminario sobre Beneficiado de Café", Fundación Salvadoreña para
Investigación del Café, Nueva San Salvador, El Salvador, C.A.(18-19 Septiembre
de 1991).

ANEXOS

ANEXO A
Evaluación de Hornos y Calderas

ANEXO A.1 Calderín

ANEXO A.2 Quemador de Cascarilla

ANEXO A.3 Caldera con Precalentador de Aire y sin Parrilla en el Horno

ANEXO A.4 Caldera con Precalentador de Aire y con Parrilla en el Horno

**ANEXO A.5 Caldera sin Precalentador de Aire, con Parrilla y Horno sin contacto con
la Coraza**

ANEXO A.6 Caldera sin Precalentador de Aire y con Parrilla en el Horno

ANEXO A.7 Caldera sin Precalentador de Aire y con Parrilla en el Horno (b)

A.1 Evaluación de Hornos

Equipo: calderín

	Med 1	Med 2	Med 3	Med 4	Med 5	Promedio
Tiempo de Alimentación (Hora de Medición)	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	
Presión de Velocidad (Plg H ₂ O)	0.10	0.08	0.10			
Presión Estática (plg Hg)	0.43	0.31	0.31			
Densidad del Aire (lb/ft ³)	0.07	0.07	0.07			0.07
Temperatura aire salida del Horno Ts (° C)	64.80	74.05	65.35	71.93	65.13	68.25
Velocidad de Aire Va (ft/min)	1,382.35	1,191.83	1,371.62			1,315.27

Ta : Temperatura Ambiente (° C) 27.50
 p : Densidad del aire (lb/ft³) 0.07
 A : Area de flujo de aire (m²) 0.17
 Wa: Flujo de aire (Kg/h) 4,281.60
 F : Factor de conversión de sistema ingles a SI 293.56

$$Q = Wa * p * A * F \quad (\text{Kg/h})$$

$$Q = Wa * [0.2385 * (Ts - Ta) + 1.708 \times 10^{-5} * (Ts^2 - Ta^2) + 8.76 \times 10^{-9} * (Ts^3 - Ta^3)] \quad (\text{Kcal/h})$$

Q : Calor útil (Kcal/h) 41,908.77
 Q (MJ/h) 176.02
 Q (Kw) 48.93

Combustible: leña
 Mezcla: Proporción:

Poder Calorífico del Combustible (P2) (Kcal/Kg): 3,988.00
 Poder Calorífico del Carbono (P1) (Kcal/Kg): 8,100.00

	Med 1	Med 2	Med 3	Med 4	Med 5	Promedio
Tiempo de Alimentación t (hora)	5.25	15.75		5.75	16.25	
Masa de Combustible Alimentado W (Kg)	490.91			563.63		
Flujo de combustible Wc (Kg/h)	46.75			53.68		50.22

Z : Cantidad de ceniza en el combustible (Kg ceniza/Kg combustible) 0.02
 Cc : Cantidad de carbono en la ceniza (Kg carbono/Kg ceniza) 0.07
 Wc: Flujo de combustible (Kg/h) 50.22

$$Qa = Wc * Z * Cc * P1 \quad (\text{Kcal/h})$$

Qa : Pérdida por combustible sin quemar (Kcal/h) 567.82
 Qa (MJ/h) 2.38
 Qa (Kw) 0.66

Tipo de Material de la superficie: hierro laminar
 Forma y Posic. de la Superf.: cilindro vertical

	Med 1	Med 2	Med 3	Med 4	Med 5	Promedio
Tiempo de Medición (hora)	9.00	10.00	11.00	12.00		
Temperatura de superficie de pared T1 (° C)	52.80	58.10	51.10	56.50		54.63

Ta : Temperatura ambiente (°C) 27.50
 C : Constante que depende de forma y posic. superf. 1.70
 E : Emisividad del material 0.60
 T1: Temperatura de la superficie (° C) 54.63
 A1: Area de la superficie (m²) 14.96

$$Q_e = \{ C * (T1 - Ta)^{1.25} + (4.92 \times 10^{-8}) * E [(T1+273)^4 - (Ta + 273)^4] \} * A1 \quad (\text{Kcal/h})$$

Qe: Pérdidas por estructura (Kcal/h) 3,061.40
 Qe (MJ/h) 12.86
 Qe (Kw) 3.57

$$Q_{ch} = W_c * P2 - Q - Q_a - Q_e - Q_c \quad (\text{Kcal/h})$$

Qch: Pérdidas por chimenea (Kcal/h) 154,724.17
 Qch (MJ/h) 649.84
 Qch (Kw) 180.66

$$Ne = [Q / (W_c * P2)] * 100$$

Ne: Eficiencia energética 20.93

$$R = \frac{T_s - T_a}{U} \quad 40.75$$

A2 : Area de Transferencia de calor (m²) 19.55

$$U = Q / (A2 * R)$$

U : Coeficiente global de Transferencia de Calor (Kcal/h m² ° C) 52.61
 U (MJ/h °C m²) 0.22
 U (W/ °C m²) 61.42

Resumen de Resultados

	Qa	Qe	Qch	Q
(MJ/h)	2.38	12.86	649.84	176.02
(%)	0.28	1.53	77.26	20.93

A.2 Evaluación de Hornos

Equipo : Quemador de cascarilla

	Med 1	Med 2	Med 3	Med 4	Med 5	Promedio
Tiempo de Alimentación (Hora de Medición)	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	
Presión de Velocidad (Plg H ₂ O)	0.10					
Presión Estática (plg Hg)	0.04					
Densidad del Aire (lb/ft ³)	0.06					0.06
Temperatura aire salida del Horno Ts (° C)	70.50	73.50	65.00	83.00	75.20	73.44
Velocidad de Aire Va (ft/min)	1,395.09					1,395.09

Ta : Temperatura Ambiente (° C) 32.00
 p : Densidad del aire (lb/ft³) 0.06
 A : Area de flujo de aire (m²) 0.27
 Wa: Flujo de aire (Kg/h) 7,031.95
 F : Factor de conversión de sistema ingles a SI 293.56

$$Wa = Va * p * A * F \quad (Kg/h)$$

$$Q = Wa * [0.2385*(Ts - Ta)+1.708 \times 10^{(-5)}*(Ts^2-Ta^2)+8.76 \times 10^{(-9)}*(Ts^3-Ta^3)] \quad (Kcal/h)$$

Q : Calor útil (Kcal/h) 70,047.03
 Q (MJ/h) 294.20
 Q (Kw) 81.79

Combustible: cascarilla de café
 Mezcla: Proporción:

Poder Calorífico del Combustible (P2) (Kcal/Kg): 4,190.00
 Poder Calorífico del Carbono (P1) (Kcal/Kg): 8,100.00

	Med 1	Med 2	Med 3	Med 4	Med 5	Promedio
Tiempo de Alimentación t (hora)	9.50	10.50	11.50			
Masa de Combustible Alimentado W (Kg)	44.00	46.20				
Flujo de combustible Wc (Kg/h)	44.00	46.20				45.10

Z : Cantidad de ceniza en el combustible (Kg ceniza/Kg combustible) 0.01
 Cc: Cantidad de carbono en la ceniza (Kg carbono/Kg ceniza) 0.07
 Wc: Flujo de combustible (Kg/h) 45.10

$$Qa = Wc * Z * Cc * P1 \quad (Kcal/h)$$

Qa : Pérdida por combustible sin quemar (Kcal/h) 254.99
 Qa (MJ/h) 1.07
 Qa (Kw) 0.30

Tipo de Material de la superficie: **hierro laminar**
 Forma y Posic. de la Superf.: **cilindro vertical**

	Med 1	Med 2	Med 3	Med 4	Med 5	Promedio
Tiempo de Medición (hora)	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	
Temperatura de superficie de pared T1 (°C)	45.70	42.30	38.80	52.50	60.50	47.96

Ta : Temperatura ambiente (°C) 32.00
 C : Constante que depende de forma y posic. superf. 1.70
 E : Emisividad del material 0.60
 T1: Temperatura de la superficie (°C) 47.96
 A1: Area de la superficie (m²) 16.01

$$Q_e = \{ C * (T1 - Ta)^{1.25} + (4.92 \times 10^{-8}) * E [(T1+273)^4 - (Ta + 273)^4] \} * A1 \quad (\text{Kcal/h})$$

Qe: Pérdidas por estructura (Kcal/h) 1,793.84
 Qe (MJ/h) 7.53
 Qe (Kw) 2.09

$$Q_{ch} = W_c * P_2 - Q - Q_a - Q_e - Q_c \quad (\text{Kcal/h})$$

Qch: Pérdidas por chimenea (Kcal/h) 116,873.14
 Qch (MJ/h) 490.87
 Qch (Kw) 136.46

$$N_e = [Q / (W_c * P_2)] * 100$$

Ne: Eficiencia energética 37.07

$$R = \frac{T_s - T_a}{U} \quad 41.44$$

A2 : Area de Transferencia de calor (m²) 5.90

$$U = Q / (A2 * R)$$

U : Coeficiente global de Transferencia de Calor (Kcal/h m² °C) 286.50
 U (MJ/h °C m²) 1.20
 U (W/°C m²) 334.51

Resumen de Resultados

	Qa	Qe	Qch	Q
(MJ/h)	1.07	7.53	490.87	294.20
(%)	0.13	0.95	61.85	37.07

A.3 Evaluación de Calderas

Equipo: caldera (1) con precalentador de aire y sin parrilla en el horno

	Med 1	Med 2	Med 3	Med 4	Med 5	Promedio
Tiempo de Alimentación (Hora de Medición)	11.22	11.28	11.37	11.43	11.53	11.62
Agua alimentada (kg)	280.10	261.34	305.34	351.44	320.83	
Flujo de Agua Wv (Kg/h)	4,668.40	2,903.73	5,088.93	3,514.37	3,564.74	3,948.04

Tw :	Temperatura del agua de alimentación (° C)	96.00
Ha :	Entalpía del agua de alimentación (Kcal/Kg)	95.98
Ta :	Temperatura ambiente (°C)	28.90
Pa :	Presión del agua de alimentación (Psi)	12.78
Hv:	Entalpía del vapor (Kcal/Kg)	612.22
Tv:	Temperatura del vapor (° C)	153.10
Pv:	Presión de vapor (Psi)	75.00

$$Q = Wv * (Hv - Ha) \quad (\text{Kcal/h})$$

Q :	Calor útil (Kcal/h)	2,038,138.17
Q (MJ/h)		8,560.18
Q (Kw)		2,319.81

Combustible: cascarrilla de café
Mezcla: x Proporción:

Poder Calorífico del Combustible (P2) (Kcal/Kg):	4,190.00
Poder Calorífico del Carbono (P1) (Kcal/Kg):	8,100.00

	Med 1	Med 2	Med 3	Med 4	Med 5	Promedio
Tiempo de Alimentación (hora)	10.35	11.35	12.35			
Masa de Combustible Alimentado W (Kg)	1,055.00	1,308.20				
Flujo de Combustible Wc (Kg/h)	1,055.00	1,308.20				1,181.60

Z :	Cantidad de ceniza en el combustible (Kg ceniza/Kg combustible)	0.01
Cc :	Cantidad de carbono en la ceniza (Kg carbono/Kg ceniza)	0.04

Wc: Flujo de combustible (Kg/h) 1,181.60

$$Wc = W / t \quad (\text{Kg/h})$$

$$Qa = Wc * Z * Cc * P1 \quad (\text{Kcal/h})$$

Qa :	Pérdida por combustible sin quemar (Kcal/h)	3,828.38
Qa (MJ/h)		16.08
Qa (Kw)		4.47

Tipo de material de la superficie: ladrillo refractario y aislante
 Forma y posición: horizontal rectangular

	Med 1	Med 2	Med 3	Med 4	Med 5	Promedio
Tiempo de Medición (hora)						
Temperatura de superficie de pared T1 (° C)	31.36	31.36	31.55	32.57		31.71

Ta: Temperatura ambiente (°C) 28.90
 C : Constante que depende de forma y posic. superf. 1.70
 E : Emisividad del material 0.75
 T1: Temperatura de la superficie (° C) 31.71
 A1: Area de la superficie (m²) 49.73

$$Q_e = [C * (T_1 - T_a)^{1.25} + (4.92 \times 10^{-8}) * E [(T_1 + 273)^4 - (T_a + 273)^4]] * A_1 \quad (\text{Kcal/h})$$

Qe: Pérdidas por estructura (Kcal/h) 883.09
 Qe (MJ/h) 3.71
 Qe (Kw) 1.03

$$Q_{ch} = W_c * P_2 - Q - Q_a - Q_e \quad (\text{Kcal/h})$$

Qch: Pérdidas por chimenea (Kcal/h) 2,908,054.36
 Qch (MJ/h) 12,213.83
 Qch (kw) 3,395.44

$$N_e = (Q / (W_c * P_2)) * 100$$

Ne: Eficiencia energética (%) 41.17

Resumen de resultados

	Qch	Qa	Qe	Q
(MJ/h)	12,213.83	16.08	3.71	8,560.18
(%)	58.74	0.08	0.02	41.17

A.4 Evaluación de Calderas

Equipo: caldera (2) con precalentador de aire y con parrilla en el horno

	Med 1	Med 2	Med 3	Med 4	Med 5	Promedio
Tiempo de Alimentación (Hora de Medición)	10.43	10.75	11.18	11.82	12.25	12.65
Agua alimentada (kg)	707.68	1,087.44	929.46	672.72	537.77	
Flujo de Agua Wv (Kg/h)	2,211.50	2,528.93	1,452.28	1,564.47	1,344.43	1,820.32

Tw :	Temperatura del agua de alimentación (° C)	55.00
Ha :	Entalpía del agua de alimentación (Kcal/Kg)	55.00
Ta :	Temperatura ambiente (° C)	30.10
Pa :	Presión del agua de alimentación (Psi)	2.29
Hv :	Entalpía del vapor (Kcal/Kg)	658.65
Tv :	Temperatura del vapor (° C)	160.15
Pv :	Presión de vapor (Psi)	90.00

$$Q = Wv * (Hv - Ha) \quad (\text{Kcal/h})$$

Q :	Calor útil (Kcal/h)	1,098,837.48
Q (MJ/h)		4,615.12
Q (Kw)		1,250.70

Combustible: leña y cascarilla
Mezcla: x Proporción: 0.21

Poder Calorífico del Combustible (P2) (Kcal/Kg): 4,039.00
Poder Calorífico del Carbono (P1) (Kcal/Kg): 8,100.00

	Med 1	Med 2	Med 3	Med 4	Med 5	Promedio
Tiempo de Alimentación (hora)	9.25	12.25	15.25	18.25		
Masa de Combustible Alimentado W (Kg)	2,619.00	2,605.47	2,544.21			
Flujo de Combustible Wc (Kg/h)	873.00	868.49	848.07			863.19

Z : Cantidad de ceniza en el combustible (Kg ceniza/Kg combustible) 0.02
Cc : Cantidad de carbono en la ceniza (Kg carbono/Kg ceniza) 0.06

Wc: Flujo de combustible (Kg/h) 863.19

$$Wc = W / t \quad (\text{Kg/h})$$

$$Qa = Wc * Z * Cc * P1 \quad (\text{Kcal/h})$$

Qa :	Pérdida por combustible sin quemar (Kcal/h)	8,390.17
Qa (MJ/h)		35.24
Qa (Kw)		9.80

Tipo de material de la superficie: ladrillo refractario y aislante
 Forma y posición: horizontal rectangular

	Med 1	Med 2	Med 3	Med 4	Med 5	Promedio
Tiempo de Medición (hora)						
Temperatura de superficie de pared T1 (° C)	30.50	30.60	30.90	31.60		30.90

Ta: Temperatura ambiente (° C) 30.10
 C : Constante que depende de forma y posic. superf. 1.70
 E : Emisividad del material 0.75
 T1: Temperatura de la superficie (° C) 30.90
 A1: Area de la superficie (m²) 85.28

$$Q_e = [C * (T_1 - T_a)^{1.25} + (4.92 \times 10^{-8}) * E [(T_1 + 273)^4 - (T_a + 273)^4]] * A_1 \quad (\text{Kcal/h})$$

Qe: Pérdidas por estructura (Kcal/h) 391.20
 Qe (MJ/h) 1.64
 Qe (Kw) 0.46

$$Q_{ch} = W_c * P_2 - Q - Q_a - Q_e \quad (\text{Kcal/h})$$

Qch: Pérdidas por chimenea (Kcal/h) 2,378,792.09
 Qch (MJ/h) 9,990.93
 Qch (kw) 2,777.48

$$N_e = (Q / (W_c * P_2)) * 100$$

Ne: Eficiencia energética (%) 31.52

Resumen de resultados

	Qch	Qa	Qe	Q
(MJ/h)	9,990.93	35.24	1.64	4,615.12
(%)	68.23	0.24	0.01	31.52

A.5 Evaluación de Calderas

Equipo: caldera (3) sin precalentador de aire, con parrilla y horno sin contacto con la coraza

	Med 1	Med 2	Med 3	Med 4	Med 5	Promedio
Tiempo de Alimentación (Hora de Medición)	11.33	11.58	12.08	12.58		
Agua alimentada (kg)	307.58	1,437.96	707.44			
Flujo de Agua Wv (Kg/h)	1,230.34	2,875.92	1,414.89			1,840.38

Tw :	Temperatura del agua de alimentación (° C)	96.00
Ha :	Entalpía del agua de alimentación (Kcal/Kg)	94.25
Ta :	Temperatura ambiente (° C)	28.00
Pa :	Presión del agua de alimentación (Psi)	12.01
Hv :	Entalpía del vapor (Kcal/Kg)	635.73
Tv :	Temperatura del vapor (° C)	157.80
Pv :	Presión de vapor (Psi)	84.70

$$Q = Wv * (Hv - Ha) \quad (\text{Kcal/h})$$

Q :	Calor útil (Kcal/h)	996,540.37
Q (MJ/ h)		4,185.47
Q (Kw)		1,134.26

Combustible: leña y cascarilla
Mezcla: x Proporción: 0.05

Poder Calorífico del Combustible (P2) (Kcal/Kg): 4,179.00
Poder Calorífico del Carbono (P1) (Kcal/Kg): 8,100.00

	Med 1	Med 2	Med 3	Med 4	Med 5	Promedio
Tiempo de Alimentación (hora)	8.00	16.00	24.00	0.00	8.00	16.00
Masa de Combustible Alimentado W (Kg)	11,427.27	11,119.22		11,289.77	13,414.77	
Flujo de Combustible Wc (Kg/h)	1,428.41	1,389.90		1,411.22	1,676.85	1,476.59

Z :	Cantidad de ceniza en el combustible (Kg ceniza/Kg combustible)	0.01
Cc :	Cantidad de carbono en la ceniza (Kg carbono/Kg ceniza)	0.25
Wc:	Flujo de combustible (Kg/h)	1,476.59

$$Wc = W / t \quad (\text{Kg/h})$$

$$Qa = Wc * Z * Cc * P1 \quad (\text{Kcal/h})$$

Qa :	Pérdida por combustible sin quemar (Kcal/h)	29,901.04
Qa (MJ/h)		125.58
Qa (Kw)		34.91

Tipo de material de la superficie: ladrillo refractario y aislante
 Forma y posición: horizontal rectangular

	Med 1	Med 2	Med 3	Med 4	Med 5	Promedio
Tiempo de Medición (hora)						
Temperatura de superficie de pared T1 (° C)	32.10	32.30	31.40	34.70		32.63

Ta: Temperatura ambiente (° C) 28.00
 C : Constante que depende de forma y posic. superf. 1.70
 E : Emisividad del material 0.75
 T1: Temperatura de la superficie (° C) 32.63
 A1: Area de la superficie (m²) 103.42

$$Q_e = [C * (T_1 - T_a)^{1.25} + (4.92 \times 10^{-8}) * E [(T_1 + 273)^4 - (T_a + 273)^4]] * A_1 \quad (\text{Kcal/h})$$

Qe: Pérdidas por estructura (Kcal/h) 3,162.61
 Qe (MJ/h) 13.28
 Qe (Kw) 3.69

$$Q_{ch} = W_c * P_2 - Q - Q_a - Q_e \quad (\text{Kcal/h})$$

Qch: Pérdidas por chimenea (Kcal/h) 5,141,085.19
 Qch (MJ/h) 21,592.56
 Qch (kw) 6,002.73

$$N_e = (Q / (W_c * P_2)) * 100$$

Ne: Eficiencia energética (%) 16.15

Resumen de resultados

	Qch	Qa	Qe	Q
(MJ/h)	21,592.56	125.58	13.28	4,185.47
(%)	83.31	0.48	0.05	16.15

A.6 Evaluación de Calderas

Equipo: caldera (4) sin precalentador de aire y con parrilla en el horno

	Med 1	Med 2	Med 3	Med 4	Med 5	Promedio
Tiempo de Alimentación (Hora de Medición)	14.25	14.50	14.65	14.92	15.15	
Agua alimentada (kg)	135.37	252.94	139.48	174.46		
Flujo de Agua Wv (Kg/h)	541.48	1,686.27	522.40	748.76		874.72

Tw :	Temperatura del agua de alimentación (° C)	75.00
Ha :	Entalpia del agua de alimentación (Kcal/Kg)	75.00
Ta :	Temperatura ambiente (° C)	33.00
Pa :	Presión del agua de alimentación (Psi)	5.59
Hv :	Entalpia del vapor (Kcal/Kg)	652.28
Tv :	Temperatura del vapor (° C)	138.30
Pv :	Presión de vapor (Psi)	50.00

$$Q = Wv * (Hv - Ha) \quad (\text{Kcal/h})$$

Q :	Calor útil (Kcal/h)	504,961.11
Q (MJ/h)		2,120.84
Q (Kw)		574.75

Combustible: cascarrilla de café
Mezcla: Proporción:

Poder Calorífico del Combustible (P2) (Kcal/Kg):	4,190.00
Poder Calorífico del Carbono (P1) (Kcal/Kg):	8,100.00

	Med 1	Med 2	Med 3	Med 4	Med 5	Promedio
Tiempo de Alimentación (hora)	14.08	15.83				
Masa de Combustible Alimentado W (Kg)	336.36					
Flujo de Combustible Wc (Kg/h)	192.21					192.21

Z :	Cantidad de ceniza en el combustible (Kg ceniza/Kg combustible)	0.01
Cc :	Cantidad de carbono en la ceniza (Kg carbono/Kg ceniza)	0.01
Wc:	Flujo de combustible (Kg/h)	192.21

$$Wc = W / t \quad (\text{Kg/h})$$

$$Qa = Wc * Z * Cc * P1 \quad (\text{Kcal/h})$$

Qa :	Pérdida por combustible sin quemar (Kcal/h)	188.69
Qa (MJ/h)		0.79
Qa (Kw)		0.22

Tipo de material de la superficie: ladrillo refractario y aislante
 Forma y posición: horizontal rectangular

	Med 1	Med 2	Med 3	Med 4	Med 5	Promedio
Tiempo de Medición (hora)						
Temperatura de superficie de pared T1 (° C)	42.00	41.20	40.90	37.60		40.43

Ta: Temperatura ambiente (° C) 33.00
 C : Constante que depende de forma y posic. superf. 1.70
 E : Emisividad del material 0.75
 T1: Temperatura de la superficie (° C) 40.43
 A1: Area de la superficie (m²) 54.47

$$Q_e = [C * (T_1 - T_a)^{1.25} + (4.92 \times 10^{-8}) * E [(T_1 + 273)^4 - (T_a + 273)^4]] * A_1 \quad (\text{Kcal/h})$$

Qe: Pérdidas por estructura (Kcal/h) 2,908.64
 Qe (MJ/h) 12.22
 Qe (Kw) 3.40

$$Q_{ch} = W_c * P_2 - Q - Q_a - Q_e \quad (\text{Kcal/h})$$

Qch: Pérdidas por chimenea (Kcal/h) 297,283.50
 Qch (MJ/h) 1,248.59
 Qch (kw) 347.11

$$N_e = (Q / (W_c * P_2)) * 100$$

Ne: Eficiencia energética (%) 62.70

Resumen de resultados

	Qch	Qa	Qe	Q
(MJ/h)	1,248.59	0.79	12.22	2,120.84
(%)	36.91	0.02	0.36	62.70

A.7 Evaluación de Calderas

Equipo: caldera (5) sin precalentador de aire y con parrilla en el horno (b)

	Med 1	Med 2	Med 3	Med 4	Med 5	Promedio
Tiempo de Alimentación (Hora de Medición)	10.33	10.57	10.80	11.03		
Agua alimentada (kg)	202.38	205.65	202.38			
Flujo de Agua Wv (Kg/h)	853.92	882.62	868.58			868.37

Tw :	Temperatura del agua de alimentación (° C)	92.00
Ha :	Entalpía del agua de alimentación (Kcal/Kg)	92.06
Ta :	Temperatura ambiente (° C)	23.30
Pa :	Presión del agua de alimentación (Psi)	10.97
Hv :	Entalpía del vapor (Kcal/Kg)	661.71
Tv :	Temperatura del vapor (° C)	173.50
Pv :	Presión de vapor (Psi)	125.00

$$Q = Wv * (Hv - Ha) \quad (\text{Kcal/h})$$

Q :	Calor útil (Kcal/h)	494,665.86
Q (MJ / h)		2,077.60
Q (Kw)		563.03

Combustible: leña y cascarilla
Mezcla: x Proporción: 0.17

Poder Calorífico del Combustible (P2) (Kcal/Kg): 4,029.40
Poder Calorífico del Carbono (P1) (Kcal/Kg): 8,100.00

	Med 1	Med 2	Med 3	Med 4	Med 5	Promedio
Tiempo de Alimentación (hora)	9.33	17.50				
Masa de Combustible Alimentado W (Kg)	5,813.64					
Flujo de Combustible Wc (Kg/h)	711.84					711.84

Z :	Cantidad de ceniza en el combustible (Kg ceniza/Kg combustible)	0.02
Cc :	Cantidad de carbono en la ceniza (Kg carbono/Kg ceniza)	0.02
Wc:	Flujo de combustible (Kg/h)	711.84

$$Wc = W / t \quad (\text{Kg/h})$$

$$Qa = Wc * Z * Cc * P1 \quad (\text{Kcal/h})$$

Qa :	Pérdida por combustible sin quemar (Kcal/h)	2,537.01
Qa (MJ/h)		10.66
Qa (Kw)		2.96

Tipo de material de la superficie: ladrillo refractario y aislante
 Forma y posición: horizontal rectangular

	Med 1	Med 2	Med 3	Med 4	Med 5	Promedio
Tiempo de Medición (hora)						
Temperatura de superficie de pared T1 (° C)	29.50	28.60	30.90	31.60		30.15

Ta: Temperatura ambiente (° C) 23.30
 C : Constante que depende de forma y posic. superf. 1.70
 E : Emisividad del material 0.75
 T1: Temperatura de la superficie (° C) 30.15
 A1: Area de la superficie (m²) 59.40

$$Q_e = [C * (T_1 - T_a)^{1.25} + (4.92 \times 10^{-8}) * E [(T_1 + 273)^4 - (T_a + 273)^4]] * A_1 \quad (\text{Kcal/h})$$

Qe: Pérdidas por estructura (Kcal/h) 2,736.34
 Qe (MJ/h) 11.49
 Qe (Kw) 3.19

$$Q_{ch} = W_c * P_2 - Q - Q_a - Q_e \quad (\text{Kcal/h})$$

Qch: Pérdidas por chimenea (Kcal/h) 2,368,367.98
 Qch (MJ/h) 9,947.15
 Qch (kw) 2,765.31

$$N_e = (Q / (W_c * P_2)) * 100$$

Ne: Eficiencia energética (%) 17.25

Resumen de resultados

	Qch	Qa	Qe	Q
(MJ/h)	9,947.15	10.66	11.49	2,077.60
(%)	82.57	0.09	0.10	17.25

ANEXO B
MEDIDORES DE FLUJO (ICAITI, M004, 1985)

B.1 TUBOS PITOT

Los tubos Pitot son usados para medir el flujo en tubería y conductos. En mediciones energéticas se aplican a gases y vapor. Las aplicaciones más comunes son para la entrada (o salida) de flujos a secadores, evaporadores, y sistemas de aire acondicionado. Los tubos Pitot también pueden medir bajas velocidades.

Son ampliamente utilizados en la industria especialmente donde se necesita verificar el flujo. Generalmente, los tubos Pitot tienen diámetros menores de 1 cm. Se insertan en la corriente en ángulo recto con respecto al flujo, y solamente miden la velocidad en un punto simple. Cuando se manejan apropiadamente, suministran datos exactos y confiables.

Son especialmente adecuados en conductos grandes con flujos bajos o medios. Los tubos Pitot tienden a ser menos caros que las placas de orificio o los tubos Venturi. A causa de su pequeño tamaño, los tubos Pitot provocan una pequeña pérdida permanente de presión y son apropiados para aplicaciones donde se dispone de baja caída de presión como en servicios de calentamiento y ventilación. Son muy atractivos donde no se requiere su instalación permanente, ya que pueden fácilmente insertarse o retirarse en los puntos elegidos.

Operación básica e instalación

Los tubos Pitot, al igual que los medidores de orificio y los tubos Venturi, son medidores inferenciales que no dan una medida directa del flujo, pero que en cambio miden una diferencia de presión que la relaciona con el valor del flujo. A diferencia de las placas de orificio y los tubos Venturi, el flujo no pasa a través del tubo Pitot. En cambio el flujo produce una alta presión por impacto. La diferencia entre la presión de impacto y la presión estática (la diferencia se llama presión dinámica) se relaciona con la velocidad del flujo. Nótese que el tubo Pitot solamente infiere velocidad en un punto simple.

La velocidad promedio se determina al promediar la velocidad en varios puntos; el valor del flujo se consigue al considerar la geometría de tubo o conducto y las propiedades del fluido. El flujo calculado es un valor instantáneo, el cual se totaliza en un microprocesador.

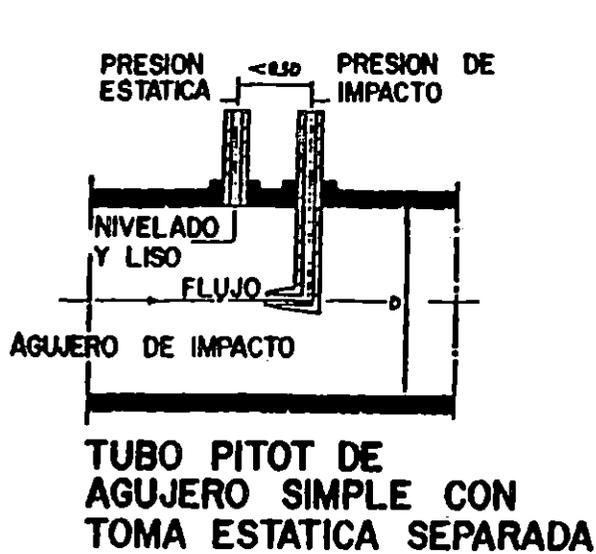
Las principales diferencias en cuanto al diseño de tubos Pitot, se relacionan con la localización de las conexiones para medir presión estática y dinámica o si el tubo debe ser de instalación portátil o permanente. La posición de las conexiones para medir presión es una consideración más de conveniencia que de la exactitud o de la aplicación. Con algunos diseños, éstas se separan con la conexión estática localizada en la pared del conducto y la conexión de impacto al final del tubo Pitot. Otros diseños colocan las conexiones en el propio tubo Pitot, y algunos emplean varias conexiones de impacto para producir una diferencia promedio de presión. Algunos de éstos pueden instalarse permanentemente en el conducto de flujo. Los tubos Pitot equipados con las conexiones estática y de impacto, y aquéllos con la conexión estática abierta a la atmósfera, están disponibles como modelos portátiles conocidos como velómetros. Tanto los modelos portátiles como fijos pueden emplearse para medir flujos de gases, aire, y vapor, y son particularmente útiles, cuando están involucrados conductos grandes o de configuración extraña que impiden el uso de placas de orificio o tubos Venturi.

Para entender como funcionan los tubos Pitot, recuerde que cuando un flujo golpea un objeto, su velocidad se reduce a cero y la presión de impacto se incrementa (Ver fig. B.1a) Esta presión de impacto es más grande que la presión de la corriente libre (o la presión estática) medida en la pared. El valor del flujo se relaciona con la diferencia de presión de acuerdo a la siguiente ecuación:

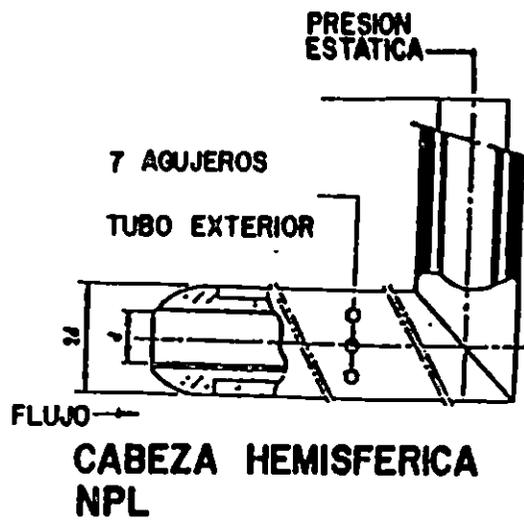
$$M = a_p C_p A (dp + 2 \rho_c)^{1/2}$$

donde M = flujo másico

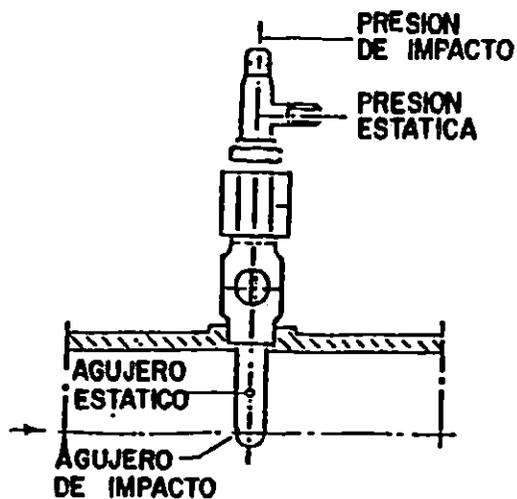
a_p = relación de la velocidad promedio a la velocidad en el punto de medición



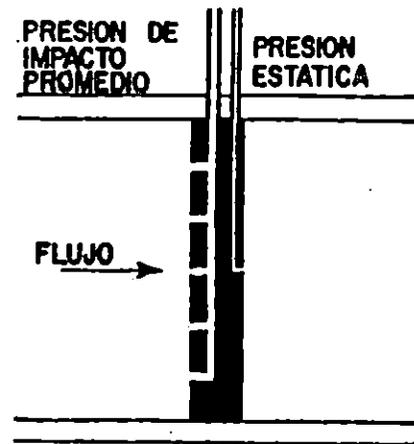
(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURA B.1. DISEÑO E INSTALACION DE TUBOS DE PITOT.

C_p = coeficiente Pitot
 A = área del tubo o conducto
 dp = presión diferencial medida
 e = densidad del fluido
 g_c = constante gravitacional

Para un tubo de Pitot específico en un fluido específico, esta ecuación se reduce a:

$$M = \text{constante} \times [\text{alta presión} - \text{baja presión}]^{\frac{1}{2}}$$

Sin embargo, esta ecuación es válida cuando se siguen ciertas reglas, como exacta determinación de la velocidad promedio, impacto recto del flujo en la conexión de impacto, limpieza de las conexiones y estipulaciones de flujo. Si se siguen estas reglas, los términos de la ecuación son constantes o son medibles, permitiendo el cálculo de flujo. El coeficiente Pitot es una constante por diseño del tubo Pitot, g_c es constante por definición, y el área es constante determinada por el comportamiento del flujo en el conducto. Esta se encuentra por la medición de la velocidad a diferentes puntos y determinando la velocidad promedio y su relación al punto donde dp debe medirse. La densidad del fluido, e , se determina a partir de tablas de densidad. Si la densidad cambia con la temperatura y presión como con los gases, aire, y vapor, estos cambios deben incluirse para el cálculo del flujo. La diferencia entre presión estática y de presión puede medirse de varias maneras que se tratan abajo.

El tubo Pitot es insertado en el conducto con la conexión de impacto orientada en ángulo recto con respecto al flujo que se aproxima a ella. La conexión para medir presión estática se efectúa en la pared del conducto, o en el mismo tubo Pitot. La figura B.2 ilustra una variedad de instalaciones de tubos Pitot.

La colocación del tubo Pitot es crítica. El tubo Pitot mide la velocidad en un sólo punto, pero su velocidad debe representar la velocidad promedio para que la ecuación de flujo sea válida. En todos los

conductos, la velocidad varía con la posición. Para encontrar el punto de velocidad promedio, el conducto se divide en secciones y la velocidad es medida en varios puntos para calcular el promedio. El tubo Pitot puede colocarse luego en el punto de velocidad promedio para mediciones prolongadas.

Para tubería que requiere longitudes mínimas rectas, el punto de velocidad promedio, \bar{V} , varía levemente con el Número de Reynolds (Re), la distancia a partir de la pared a \bar{V} es conocida:

<u>Re</u>	<u>Punto de \bar{V}</u>	<u>% Error</u>
< 2 000	0.29 D	± 1.50
2 000 - 10 000	0.27 D	± 2.00
> 10 000	0.25 D	± 1.25

A este punto a_p es 1.00 porque la velocidad coincide con la velocidad promedio para el conducto. Note que la exactitud en la localización de \bar{V} varía con Re debido a las variaciones en la turbulencia y la estabilidad del flujo.

Un segundo método para determinar \bar{V} se consigue al situar el tubo Pitot en el centro y corregir la ecuación de flujo para a_p . Para tubería, el valor de a_p se conoce para cada Re dado. La figura B.3 puede utilizarse para determinar a_p . Note que el tubo Pitot instalado en el centro no se usa para $2\,000 < Re < 10\,000$ ya que en esta gama la transición de flujo laminar a turbulento proporciona valores inconsistentes de C_p .

En conductos que no cumplen con requerimientos de longitud mínima recta o no son redondos, a_p debe determinarse a partir de mediciones. El conducto se divide en secciones y la velocidad se mide para cada uno. El promedio se calcula posteriormente y se emplea en la ecuación de flujo.

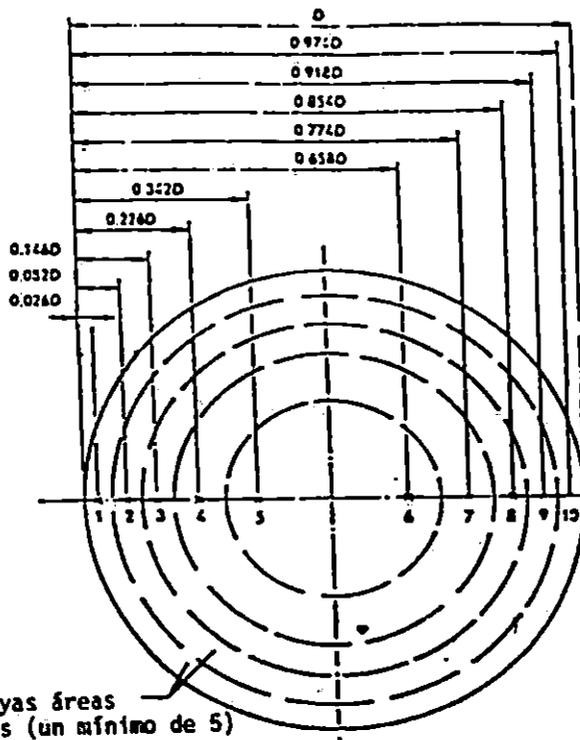
Para encontrar el flujo, d_p debe ser medido y convertido a flujo másico. Los tubos Pitot son esencialmente conexiones especiales para

medir presión, por lo cual no se requieren otras conexiones. La señal de presión debe ser transmitida; sin embargo, para un indicador de dp; tubería de plástico es típicamente usada. Existen tres métodos básicos para medir dp:

- **Manómetros** - Estos son en forma de U con la terminación abierta llenados con agua o aceite cuando se usan con tubos Pitot. Cuando se conectan a conexiones para medir presión, la diferencia de presión provoca que el líquido se eleve sobre la conexión de baja presión. La altura de la columna de líquido indica el dp en pulgadas de agua. Típicamente los manómetros deben calibrarse en ppm o pulgadas de agua. El valor instantáneo de flujo se determina por la ecuación de flujo, curvas de calibración o tablas. Manómetros portátiles o fijos son construidos de plástico o vidrio. Su precio varía de \$ 25 a \$ 200.
- **Velómetros** - Son medidores mecánicos que detectan la diferencia de presión entre las conexiones de alta y baja presión. Además de lo anterior, se calibran para dar la velocidad en ppm. El valor de la velocidad que se lee en el velómetro es la velocidad instantánea; el flujo se puede determinar por curvas de calibración, la ecuación de flujo o tablas. Los modelos portátiles o fijos tienen precios de \$ 200 a \$ 400.
- **Celdas de presión diferencial y microprocesadores** - Su uso principal con tubos de Pitot es para controlar flujos en sistemas de aire acondicionado. El costo de celdas de presión diferencial varía de \$ 300 a más de \$ 600, y para microprocesadores de \$ 1 500 a más de \$ 2 500.

Principios de operación

El tubo Pitot se conforma a la ecuación de flujo como placas de orificio y tubos Venturi. Debe usarse sólo cuando la ecuación de flujo es

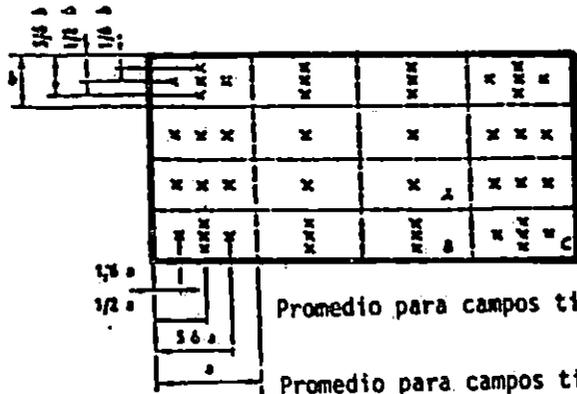


Método 1:
 Hacer mediciones en los puntos 1, 2, 3, etc. deben repetirse la operación en dos o más diámetros. Las dimensiones indicadas en la gráfica son para 10 puntos diferentes, por diámetro, pero puede resultar necesario usar más puntos.

Método 2:
 Hacer mediciones en puntos equidistantes. Medir en otros puntos si resultara necesario. Dibujar una curva con los valores obtenidos, y en ella leer valores para los puntos 1, 2, 3, etc.

Anillos cuyas áreas son iguales (un mínimo de 5)

MÉTODOS POR SECCIONES TRANSVERSALES PARA TUBERIAS CIRCULARES



Hacer mediciones en el centro de cada campo y mediciones adicionales en los campos vecinos a las paredes, si resultan aquellas ser menos de 100.

Promedio para campos tipo A = medida del centro

Promedio para campos tipo B = promedio de tres mediciones

Promedio para campos tipo C = $\frac{Ph \times Pv}{C}$

Ph = promedio de mediciones horiz.
 Pv = promedio de mediciones verticales.
 C = valor en el centro del campo.

POR SECCIONES TRANSVERSALES

FIGURA B.3 DETERMINACION DE a_p PARA TUBOS DE PITOT

válida, para lo cual se define el valor de las variables y se estipulan las condiciones límites de flujo.

C_p es la constante del tubo Pitot. C_p debe ser la unidad si no existieran efectos de fricción y si el diseño mecánico no afecta dp . Sin embargo, a veces este no es el caso. En la práctica C_p es una constante suministrada por el fabricante.

A es el área de flujo. Este se calcula a partir de los valores reales de las dimensiones del conducto. La posición del dp medida debe tomarse en cuenta. La velocidad, y el dp varían con la posición en el conducto. Si el área completa es utilizada como una medida de dp , el tubo Pitot debe ser posicionado para leer la velocidad promedio. Si el punto de velocidad promedio no es conveniente, el área de flujo se divide en secciones y la dp y velocidad se miden en cada una de ellas. Si un punto es medido, la ecuación de flujo es corregida por a_p .

La correlación de la presión a la velocidad se mantiene bajo una gama de flujo que es infinito. Sin embargo, existen algunas consideraciones. (ICAITI, M004,1985)

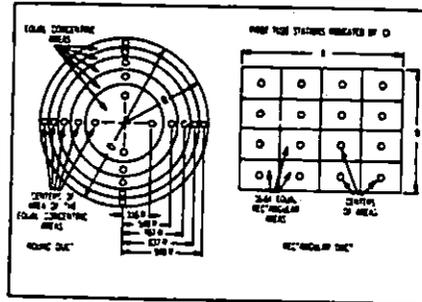
AIR VELOCITIES WITH THE DWYER PITOT TUBE

AIR VELOCITY

The total pressure of an air stream flowing in a duct is the sum of the static or bursting pressure exerted upon the sidewalls of the duct and the impact or velocity pressure of the moving air. Through the use of a pitot tube connected differentially to a manometer, the velocity pressure alone is indicated and the corresponding air velocity determined.

For accuracy of plus or minus 2%, as in laboratory applications, extreme care is required and the following precautions should be observed:

1. Duct diameter 4" or greater.
2. Make an accurate traverse per sketch at right, calculate the velocities and average the readings.
3. Provide smooth, straight duct sections a minimum of 8½ diameters in length upstream and 1½ diameters downstream from the pitot tube.
4. Provide an egg crate type straightener upstream from the pitot tube.



In making an air velocity check select a location as suggested above, connect tubing leads from both pitot tube connections to the manometer and insert in the duct with the tip directed into the air stream. If the manometer shows a minus indication reverse the tubes. With a direct reading manometer, air velocities will now be shown in feet per minute. In other types, the manometer will read velocity pressure in inches of water and the corresponding velocity will be found from the curves in this bulletin. If circumstances do not permit an accurate traverse, center the pitot tube in the duct, determine the center velocity and multiply by a factor of .9 for the approximate average velocity. Field tests run in this manner should be accurate within plus or minus 5%.

The velocity indicated is for dry air at 70°F., 29.9" Barometric Pressure and a resulting density of .075#/cu. ft. For air at a temperature other than 70°F. refer to the curves in this bulletin. For other variations from these conditions, corrections may be based upon the following data:

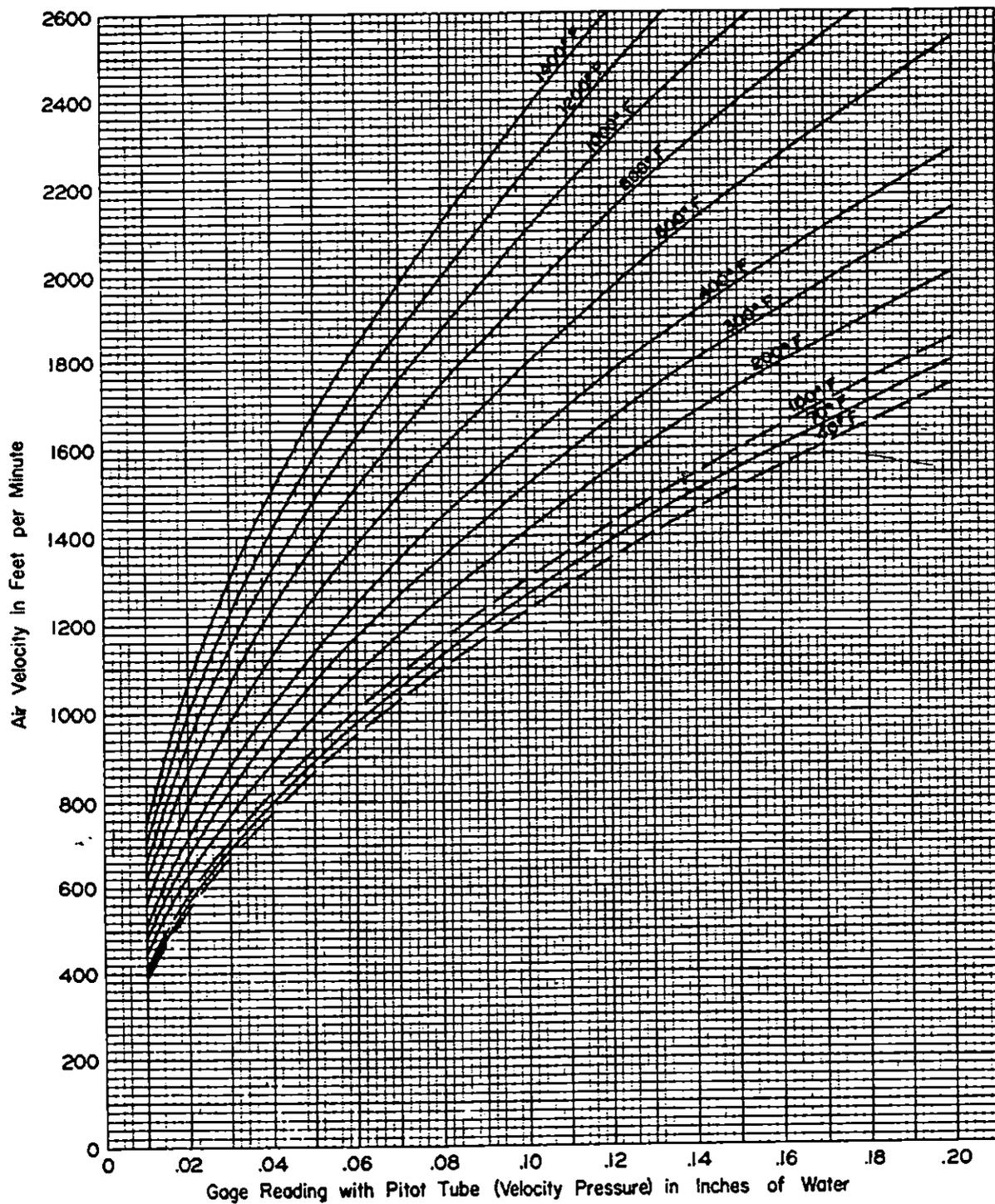
$$\text{Air Velocity} = 1096.2 \sqrt{\frac{P_v}{D}}$$

where P_v = velocity pressure in inches of water
 D = Air density in #/cu. ft.

$$\text{Air Density} = 1.325 \times \frac{P_b}{T}$$

where P_b = Barometric Pressure in inches of mercury
 T = Absolute Temperature (indicated temperature °F plus 460)

Flow in cu. ft. per min. = Duct area in square feet x air velocity in ft. per min.



FR 72-440226-00

ANEXO C
TABLAS DE PARAMETROS TECNICOS

Tabla C.1 Método para el Cálculo de Áreas

Ángulo central, grados	Ángulo grados				Ángulo central, grados	Ángulo grados				Ángulo central, grados	Ángulo grados			
	Flecha R	Cuerda R	Flecha R	Área R ²		Flecha R	Cuerda R	Flecha R	Área R ²		Flecha R	Cuerda R	Flecha R	Área R ²
1	0.000036	0.017453	0.002177	0.000009	61	0.138371	0.11508	0.136315	0.0950155	121	0.507576	74071	0.291591	0.6273404
2	0.00151	0.034905	0.004326	0.000035	62	0.142831	0.13008	0.138662	0.0995782	122	0.515190	74974	0.294522	0.6406267
3	0.00343	0.052354	0.006552	0.000119	63	0.147350	0.14500	0.141014	0.1042754	123	0.522841	75763	0.297469	0.6540421
4	0.00609	0.069799	0.009725	0.000283	64	0.151921	0.15984	0.145373	0.1091083	124	0.530528	76590	0.300429	0.6675852
5	0.00952	0.087239	0.013913	0.000554	65	0.156609	0.17460	0.149737	0.1140780	125	0.538251	77402	0.303411	0.6812546
6	0.01371	0.104672	0.019098	0.000956	66	0.161329	0.18928	0.154106	0.1191858	126	0.546010	78201	0.306401	0.6950488
7	0.01865	0.122097	0.025275	0.001519	67	0.166114	0.20387	0.158483	0.1244328	127	0.553802	78987	0.309409	0.7089613
8	0.02436	0.139513	0.032461	0.002266	68	0.170962	0.21839	0.162864	0.1298199	128	0.561629	79759	0.312434	0.7230052
9	0.03083	0.156918	0.040657	0.003202	69	0.175874	0.23281	0.167255	0.1353483	129	0.569491	80517	0.315477	0.7371642
10	0.03805	0.174311	0.049864	0.004343	70	0.180848	0.24715	0.171650	0.1410188	130	0.577382	81262	0.318534	0.7514417
11	0.04604	0.191692	0.060088	0.005696	71	0.185885	0.26140	0.176053	0.1468325	131	0.585307	81992	0.321611	0.7658357
12	0.05479	0.209057	0.071431	0.007269	72	0.190983	0.27557	0.180460	0.1527602	132	0.593263	82709	0.324704	0.7803448
13	0.06428	0.226406	0.083891	0.009070	73	0.196143	0.28965	0.184873	0.1587927	133	0.601251	83412	0.327814	0.7949670
14	0.07454	0.243739	0.097461	0.012121	74	0.201365	0.30364	0.189298	0.1649309	134	0.609269	84101	0.330943	0.8097026
15	0.08555	0.261052	0.112141	0.016491	75	0.206647	0.31752	0.193738	0.1711755	135	0.617317	84776	0.334089	0.8245437
16	0.09732	0.278346	0.128463	0.022187	76	0.211989	0.33132	0.198185	0.1775264	136	0.625391	85436	0.337255	0.8394945
17	0.10984	0.295619	0.145811	0.029211	77	0.217392	0.34503	0.202639	0.1839837	137	0.633491	86081	0.340437	0.8545511
18	0.12312	0.312867	0.164206	0.037671	78	0.222854	0.35864	0.207100	0.1904472	138	0.641618	86711	0.343634	0.8697177
19	0.13714	0.330095	0.183661	0.047582	79	0.228375	0.37215	0.211568	0.1970168	139	0.649761	87326	0.346846	0.8849942
20	0.15192	0.347296	0.204196	0.058959	80	0.233956	0.38558	0.216143	0.2036927	140	0.657921	87926	0.350073	0.9003862
21	0.16745	0.364471	0.225831	0.071806	81	0.239594	0.39890	0.220825	0.2104759	141	0.666098	88511	0.353316	0.9158966
22	0.18373	0.381618	0.248486	0.086139	82	0.245290	0.41212	0.225514	0.2173744	142	0.674291	89081	0.356574	0.9315269
23	0.20075	0.398736	0.272181	0.102071	83	0.251044	0.42524	0.230259	0.2243391	143	0.682499	89636	0.359846	0.9472720
24	0.21852	0.415823	0.296836	0.119612	84	0.256855	0.43826	0.235060	0.2313700	144	0.690721	90176	0.363131	0.9631271
25	0.23704	0.432879	0.322471	0.138880	85	0.262723	0.45118	0.240018	0.2384676	145	0.698958	90701	0.366431	0.9790974
26	0.25630	0.449902	0.349106	0.159895	86	0.268646	0.46400	0.245033	0.2456319	146	0.707209	91211	0.369746	0.9951769
27	0.27630	0.466891	0.376751	0.182668	87	0.274625	0.47672	0.250104	0.2528530	147	0.715473	91706	0.373075	1.0113604
28	0.29704	0.483844	0.405426	0.207201	88	0.280660	0.48934	0.255231	0.2601309	148	0.723741	92186	0.376418	1.0276533
29	0.31852	0.500760	0.434841	0.233595	89	0.286751	0.50186	0.260414	0.2674646	149	0.732013	92651	0.379775	1.0440596
30	0.34074	0.517630	0.464926	0.261850	90	0.292899	0.51428	0.265653	0.2748542	150	0.740289	93101	0.383146	1.0605731
31	0.36370	0.534477	0.495691	0.292075	91	0.299101	0.52660	0.270946	0.2822988	151	0.748569	93536	0.386531	1.0771966
32	0.38736	0.551292	0.527056	0.324380	92	0.305357	0.53882	0.276292	0.2907984	152	0.756851	93956	0.389931	1.0939331
33	0.41180	0.568063	0.559441	0.358775	93	0.311667	0.55094	0.281690	0.2993530	153	0.765135	94361	0.393346	1.1107866
34	0.43699	0.584793	0.592856	0.395270	94	0.318031	0.56296	0.287140	0.3079726	154	0.773421	94751	0.396775	1.1277501
35	0.46283	0.601482	0.627301	0.433875	95	0.324449	0.57488	0.292642	0.3166572	155	0.781709	95126	0.400218	1.1448266
36	0.48934	0.618134	0.663796	0.474600	96	0.330921	0.58670	0.298296	0.3254068	156	0.790000	95486	0.403675	1.1619181
37	0.51656	0.634749	0.701851	0.517455	97	0.337447	0.59842	0.304012	0.3342314	157	0.798293	95831	0.407146	1.1791266
38	0.54441	0.651324	0.741466	0.562450	98	0.344027	0.61004	0.309788	0.3431310	158	0.806589	96161	0.410631	1.1964531
39	0.57289	0.667859	0.782641	0.609605	99	0.350661	0.62156	0.315624	0.3521056	159	0.814887	96481	0.414131	1.2138986
40	0.60202	0.684354	0.825286	0.658930	100	0.357349	0.63298	0.321622	0.3611552	160	0.823187	96791	0.417646	1.2314641
41	0.63180	0.700809	0.869401	0.710435	101	0.364091	0.64430	0.327732	0.3702798	161	0.831489	97091	0.421175	1.2491506
42	0.66222	0.717224	0.915006	0.764120	102	0.370887	0.65552	0.333954	0.3794744	162	0.839793	97381	0.424718	1.2669581
43	0.69328	0.733599	0.962101	0.819995	103	0.377737	0.66664	0.340288	0.3887390	163	0.848100	97661	0.428275	1.2848866
44	0.72499	0.749934	1.009696	0.878070	104	0.384641	0.67766	0.346734	0.3980736	164	0.856410	97931	0.431846	1.3029351
45	0.75734	0.766229	1.058781	0.938355	105	0.391600	0.68858	0.353292	0.4074782	165	0.864723	98191	0.435431	1.3211046
46	0.79034	0.782484	1.109366	0.999850	106	0.398614	0.69940	0.360062	0.4169528	166	0.873039	98441	0.439031	1.3393951
47	0.82399	0.798699	1.161451	0.106455	107	0.405683	0.71012	0.366944	0.4264974	167	0.881357	98681	0.442646	1.3578066
48	0.85829	0.814874	1.215036	0.114270	108	0.412807	0.72074	0.373938	0.4361120	168	0.889678	98911	0.446275	1.3763381
49	0.89324	0.831009	1.270121	0.123295	109	0.420087	0.73126	0.381044	0.4457966	169	0.897999	99131	0.449918	1.3949906
50	0.92884	0.847104	1.326706	0.133540	110	0.427522	0.74168	0.388262	0.4555512	170	0.906323	99341	0.453575	1.4137631
51	0.96509	0.863159	1.384791	0.144995	111	0.435112	0.75190	0.395592	0.4653758	171	0.914650	99541	0.457246	1.4326556
52	1.00189	0.879174	1.444276	0.157670	112	0.442757	0.76192	0.403036	0.4752704	172	0.922980	99731	0.460931	1.4516681
53	1.03924	0.895149	1.505161	0.171565	113	0.450457	0.77174	0.410694	0.4852350	173	0.931313	99911	0.464631	1.4707906
54	1.07714	0.911074	1.567446	0.186690	114	0.458212	0.78136	0.418466	0.4952696	174	0.939650	100081	0.468346	1.4899331
55	1.11559	0.926949	1.632131	0.203045	115	0.466022	0.79078	0.426352	0.5053742	175	0.947993	100241	0.472075	1.5091956
56	1.15459	0.942774	1.699216	0.220630	116	0.473887	0.80000	0.434352	0.5155488	176	0.956343	100391	0.475818	1.5285681
57	1.19414	0.958549	1.768701	0.239455	117	0.481807	0.80902	0.442466	0.5257934	177	0.964698	100531	0.479575	1.5479506
58	1.23424	0.974274	1.840586	0.259530	118	0.489782	0.81784	0.450694	0.5361080	178	0.973058	100671	0.483346	1.5673431
59	1.27489	0.989949	1.914871	0.280855	119	0.497812	0.82646	0.459036	0.5464926	179	0.981423	100801	0.487111	1.5867456
60	1.31609	1.005574	1.991556	0.303430	120	0.505897	0.83488	0.467492	0.5569472	180	0.989793	100931	0.490881	1.6061581

(Perry, 1984).

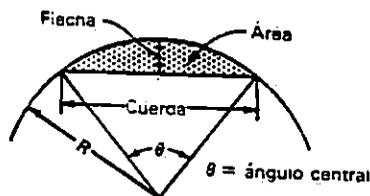


Tabla C.2 Emisividades de Diferentes Materiales

SUSTANCIA	ESTADO DE LA SUPERFICIE	Emisividad ϵ (cuerpo negro 1)
Latón	Brillante	0,057
	Recientemente esmerilada	0,208
Cobre	Pulimentada	0,041
	Atacada o raspada	0,094
	Negra por oxidación	0,788
Aluminio	Pulimentada	0,053
	Mate	0,072
Plomo	Gris por oxidación	0,284
	Niquelada y pulimentada	0,059
	Niquelada mate	0,114
	Recién estañada	0,082
	Recién galvanizada	0,230
	Galvanizada, gris	0,280
	Recién esmerilada	0,245
Hierro	Enmohecida	0,694
	Forjada	0,664
	Oxidada	0,817
	Fundida	0,817
	Blanco de nieve	0,919
Esmalte barnizado	Barnizado	0,401
Aluminio	Barnizado	0,910
Papel	Barnizado	0,910
Yeso	Medio milímetro de espesor	0,915
Madera de roble	Cepillada	0,941
Ladrillo	Rojo	0,941
Porcelana	Vidriada	0,936
Vidrio	Pulimentada	0,950
Mármol	Gris claro, pulimentada	0,943
Pintura de aluminio	Sobre chapa negra de hierro	0,38 - 0,7
Pinturas metálicas	Todos los colores	(Valor medio 0,55;
Interior de horno	Cámaras cerradas a temperatura uniforme	0,9 - 0,95
Ladrillo refractario	Ladrillo de hogar a temperatura uniforme	1
		0,75 - 0,80

Ocon, 1949

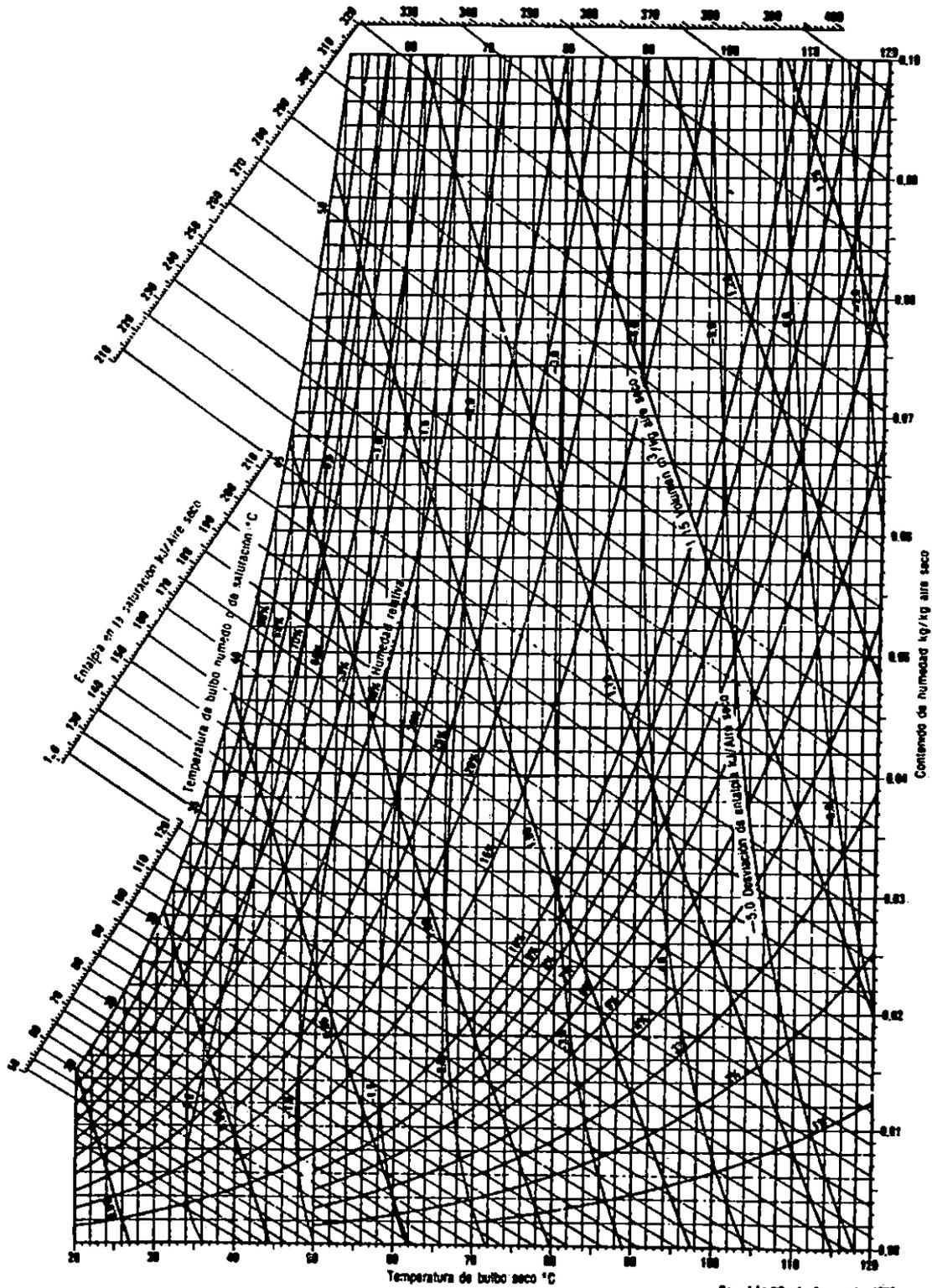


Figura C.1 Carta Psicrométrica

Copyright ©Carrier Corporation 1978
Cat. No. 794-006 Printed in U.S.A.



**Tabla C.3 RESULTADOS DE ANALISIS ESPECIALES
DEPARTAMENTO DE SERVICIOS ANALITICOS**

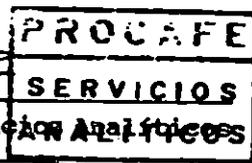
INFORME: No. 86

NOMBRE DEL SUBPROYECTO:

NOMBRE TECNICO RESPONSABLE: Sr. Yuri Renderos
FECHA DE ENTRADA: 21 de diciembre de 1994
FECHA DE SALIDA: 2 de enero de 1995

ANALISIS	No.I-748	No.I- 749	No.I-750	No.I-751
NITROGENO ‡				
POSFORO ‡				
POTASIO ‡				
CALCIO ‡				
MAGNESIO ‡				
AZUFRE ‡				
BORO ppm				
HIERRO ppm				
COBRE ppm				
ZINC ppm				
MANGANESO ppm				
MATERIA ORGANICA‡				
pH				
C/N ‡				
CENIZA ‡				
HUMEDAD ‡				
CARBONO ORGANICO ‡	3.83	20.46	6.98	6.99


 P. _____
 Jefe Depto. Servicios Analíticos



Final 1a. Avenida Norte Santa Tecla, Tels.: 28-0490, 28-0694, 28-2563, 28-2453, FAX 28-0669
 El Salvador, C. A.
 Apartado Postal No. 23

Tabla C.4 RESULTADOS ANALISIS EN MUESTRAS DE FERTILIZANTES
DEPARTAMENTO DE SERVICIOS ANALITICOS

INFORME No.

NOMBRE DEL SUBPROYECTO:

TÉCNICO RESPONSABLE: DE. FERNANDO CALDAS

FECHA RECIBIDO: 10 FEBRERO DE 1995

DEPARTAMENTO SOLICITANTE: AGROINDUSTRIA

FECHA ENTRADA LAB: 27 DE ENERO DE 1995

FECHA DE MUESTREO:

FECHA ENTREGA:

TIPO DE ANALISIS	No. I- 40	No. I- 40	No. I- 49	No. I-	No. I-
NITROGENO %					
POTASIO %					
K ₂ O %					
AZUFRE %					
BORO %					
CALCIO %					
MAGNESIO %					
FOSFORO %					
P ₂ O ₅ %					
MATERIA ORGANICA %	3.88	2.11 %	10.09		
HIERRO PPM					
COBRE PPM					
MANGANESO PPM					
ZINC PPM					
HUMEDAD %					
BIURET %					
CENIZA %	96.14	97.89	89.91		
pH (H ₂ O)					
C/N					
CARBONO ORGANICO	2.24	1.22	5.85		
PROTEINA %					

mdm

Jefe Depto. de Servicios Analíticos



Tabla C.5.
RESULTADOS ANALISIS EN MUESTRAS DE FERTILIZANTES
DEPARTAMENTO DE SERVICIOS ANALITICOS

INFORME No.

NOMBRE DEL SUBPROYECTO:

TÉCNICO RESPONSABLE: DE. FERNANDO CALDAS

FECHA RECIBIDO: 14 FEBRERO DE 1995

DEPARTAMENTO SOLICITANTE: AGROINDUSTRIA

FECHA ENTRADA LAB: 27 DE ENERO DE 1995

FECHA DE MUESTREO:

FECHA ENTREGA:

TIPO DE ANALISIS	No. I- 45	No. I- 47	No. I- 49	No. I-	No. I-
NITROGENO %					
POTASIO %					
K ₂ O %					
AZUFRE %					
BORO %					
CALCIO %					
MAGNESIO %					
FOSFORO %					
P ₂ O ₅ %					
MATERIA ORGANICA %	99.95	97.61			
HIERRO PPM					
COBRE PPM					
MANGANESO PPM					
ZINC PPM					
HUMEDAD %	9.49	12.05			
BIURET %					
CENIZA %	0.05	2.39			
pH (H ₂ O)					
C/N					
CARBONO ORGANICO	0.5798	56.62			
PROTEINA %					

mdm

Final 1a. Avenida Norte Santa Tecla, Tels.: 28-0490, 28-0694, 28-2563, 28-2453, FAX 28-0669

El Salvador, C. A.

Jefe Depto. de Servicios Analíticos

Apartado Postal No. 23