



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Facultad de Ingeniería

**ALGUNAS CONSIDERACIONES SOBRE EL SECADO
DEL FRUTO DEL CAFE MEDIANTE RADIACION
TERMICA INFRARROJA.**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**

P R E S E N T A

JOSE ADRIAN VALERA NEGRETE



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas

Tesis Digitales

Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

I N D I C E

"ALGUNAS CONSIDERACIONES SOBRE EL SECADO DEL FRUTO DEL CAFE MEDIANTE RADIACION TERMICA INFRARROJA"

	Pág.
INTRODUCCION.....	1
 CAPITULO 2	
EL SECADO DE CAFE	
2.1 PROPIEDADES Y GENERALIDADES DEL CAFE.....	4
2.2 PROCEDIMIENTOS CONVENCIONALES DE TRATAMIENTO.....	11
2.3 SECADO.....	21
2.4 ALTERNATIVAS PARA EL SECADO: CONVECCION, RADIACION, CON VECCION-RADIACION.....	27
 CAPITULO 3	
ELEMENTOS DE RADIACION TERMICA INFRARROJA	
3.1 HISTORIA DE LA RADIACION TERMICA INFRARROJA.....	29
3.2 PRINCIPIOS FUNDAMENTALES DE RADIACION TERMICA.....	37
3.3 ABSORCION, REFLEXION Y TRANSMISION... ..	40
3.4 LA LEY DE KIRCHHOFF Y EL CUERPO NEGRO.....	41
3.5 PROPIEDADES DE LA RADIACION.....	44

CAPITULO 4

ESQUEMA PROPUESTO PARA EL SECADO DEL CAFE

4.1 SECADO MEDIANTE RADIACION INFRARROJA.....	53
4.2 DIVERSOS TIPOS DE RADIADORES.....	64
4.3 EL USO DE RADIADORES DE COMBUSTION PARA EL SECADO DEL - CAFE.....	71

CAPITULO 5

EXPERIMENTOS Y SUS RESULTADOS PARA LA MEDICION DE PRO-- PIEDADES DE RADIACION DEL CAFE

5.1 NECESIDAD DE MEDICIONES.....	81
5.2 DESCRIPCION DE DIVERSOS APARATOS E INSTRUMENTOS UTILIZA <u>DOS</u> EN RADIACION TERMICA.....	82
5.3 EXPERIMENTOS REALIZADOS.....	85
5.4 RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	95

CAPITULO 6

ANALISIS DE LOS DATOS EXPERIMENTALES

6.1 BALANCE TERMICO DEL SECADO POR RADIACION INFRARROJA DE LA CANADA DE CAFE.....	112
6.2 COMPROBACION DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES Y LA - ECUACION TEORICA.....	115

CAPITULO 7

CONCLUSIONES.....124

APENDICE A.....127

APENDICE B.....131

APENDICE C.....135

REFERENCIAS.....138

CAPITULO 1

INTRODUCCION

Dentro de la tecnología de alimentos que se define como la aplicación de la ciencia y la ingeniería en los procedimientos para la producción, el tratamiento, la elaboración, el empaque, el almacenamiento, la distribución, y el consumo de los alimentos, el secado de grano de café es de gran importancia por su alta producción y consumo en el mundo.

Existen varias alternativas para poder llevar a cabo el proceso de secado, siendo la convección un modo usual de transferir energía mediante el paso de aire caliente entre los granos de café, así como también, el secado por energía solar.

En el presente trabajo se hace un breve estudio de otra alternativa para llevar a cabo el proceso en forma artificial, y consiste en el secado por radiación térmica infrarroja. Para ello, en el Capítulo 2 se dan una serie de generalidades, donde se presentan las principales características, tecnología convencional incluyendo su secado, del grano de café; asimismo, se mencionan las diferentes formas para realizar el proceso.

En el Capítulo 3 se señalan los fundamentos de radiación, las características principales para ser llamada radiación térmica infrarroja y se presenta una sinopsis histórica de la misma.

desde su descubrimiento hasta la actualidad.

Ya el Capítulo 4 se aboca a dar las características generales del secado por radiación térmica infrarroja, se mencionan los diferentes tipos de fuentes de radiación y se propone de manera general el sistema industrial para el secado del grano de café por radiación infrarroja usando la fuente de radiación más apropiada; también se expone la conveniencia de llevar a cabo la expulsión de la humedad de la cámara de trabajo en el esquema propuesto, - por aire en convección libre (sin usar ventilador) con su respectivo modelo matemático.

En el Capítulo 5 se describen los experimentos que se llevaron a cabo para conocer el valor de la emitancia del café, explicando los resultados generales así obtenidos; también se describen diversos aparatos e instrumentos usados para la detección de la radiación térmica.

En el Capítulo 6 se presenta el análisis de los resultados experimentales junto con el modelo semiempírico propuesto, obteniéndose la variación de la masa total del café (café seco más humedad) a través del tiempo durante el secado por radiación térmica infrarroja. Este modelo matemático nos permitió comparar con los datos experimentales la variación de masa en función del tiempo, mencionando los posibles errores de la diferencia.

En el Capítulo 7 se mencionan las conclusiones obtenidas a través de todo el trabajo expuesto, también se da un panorama económico al secar 71 kg de café húmedo colocado sobre un área de 5 m² y un espesor de 1 pulgada, asimismo, se indican algunas recomendaciones al respecto.

CAPITULO 2

EL SECADO DEL CAFE

El presente Capítulo es un resumen hecho de la referencia 1, donde se describen las diferentes especies, generalidades, propiedades, tratamiento convencional, el secado en sus dos diferentes técnicas ya sea artificial o natural, del grano de café y así como también, se mencionan las diferentes alternativas de llevar a cabo el proceso de secado.

2.1 PROPIEDADES Y GENERALIDADES DEL CAFE

El café listo para ser tostado es el llamado café verde. Los cafés verdes tienen principalmente su origen botánico en dos especies muy diferentes: café "arábica" y café "canephora", la primera casi exclusivamente cultivada en América, la segunda ampliamente extendida en África y explotada, junto con el café arábica, en Asia. Algunas especies menos comunes, cultivadas en los mercados europeos son el café "excelsa" y el café "libérica".

Cada especie comprende en sí misma variedades, formas y tipos que hacen todavía más diversas las características específicas de los granos. Asimismo, el origen genético como las influencias debidas al medio producen diferencias más o menos acusadas en el grosor, la forma, el color de las semillas e incluso en la

estructura.

La técnica de preparación de los cafés, los cuidados dedicados a este trabajo así como a la conservación de la mercancía antes de su expedición, etc., tienen igualmente influencias sobre el aspecto del grano (depelliculado más o menos completo, por ejemplo), y especialmente sobre su color (exceso de fermentación, secado insuficiente o irregular).

Generalmente, la coloración de las semillas se atenúa de acuerdo al tiempo de conservación.

Desde el punto de vista comercial, la apariencia es extraordinariamente importante. De ahí la necesidad de que una buena presentación de los cafés verdes esté justificada. La calificación del producto deriva no solamente de su identidad botánica, sino también, y en gran parte, del cuidado con que el productor ha efectuado la tría (eliminación de los granos de color anormal, y principalmente de los granos negros que dan muchas veces mal gusto a la bebida, de las impurezas y de los trozos de granos que se tuestan mal), el calibrado (del que depende la homogeneidad de los lotes, factor de una buena torrefacción que es el tostado de café), etc., y en resumen, la preparación y el acondicionamiento.

Algo muy importante de añadir es que la degustación es obligatoria para apreciar las reales cualidades organolépticas del brebaje.

Desde el punto de vista granulométrico, las diferencias al examen macroscópico son muy acusadas entre las dos grandes especies cultivadas: *café arábica* y *café canephora*. Las semillas de *café arábica* son más voluminosas y de una forma más alargada. Su longitud media, en los de origen brasileño por ejemplo, es de 8 a 10 mm.; las mejores, provenientes de Colombia o de Centroamérica, tienen generalmente de 10 a 12 mm., para alcanzar hasta 14 y 15 mm. en la variedad Maragogype.

Las semillas de *café canephora* (Robusta y Kouilou) son más pequeñas (6 a 8 mm.) y de forma más redonda; el surco medio es más rectilíneo que en el *arábica*. Por otra parte, la proporción de granos "caracolillo" hallada en una muestra media es en general más elevada en los *canephora* (10 a 12% contra 5 a 10% en el *arábica*).

El grano del *café libérico* es más voluminoso que el de las especies precedentes (su longitud sobrepasa con frecuencia los 15 mm.).

En lo concerniente a la densidad, hay una diferencia bastante marcada entre las dos grandes especies: las semillas de *arábica* tienen una media de 0.6, mientras que las de *canephora* se sitúan entre 0.6 y 0.7 (con el mismo contenido de agua), también la densidad puede estar influenciada por el estado de madurez de los frutos en el momento de la cosecha, por los ataques criptogámicos o parasitarios, etc.

Para café verde o tostado la capacidad calorífica (calor específico), puede ser tomada aproximadamente de 0.4. Las composiciones del café y (calores específicos) son: $1/10^3$ agua (1), $1/10$ - aceite (0.45), 0.4 celulosa (0.32) y 0.3 carbohidratos (0.3).

Los cafés arábica lavados, tienen en general un hermoso color verde, verde azulado o gris azulado, uniforme. Los canephora son de color menos determinado, con tendencia al grisáceo en general, como consecuencia de un depelliculado defectuoso.

El olor del café verde es muy característico y la presencia - de granos enmohecidos, fétidos, etc., en un lote, se detecta fácilmente por el olfato. Todavía se aprecia mejor en la torrefacción (granos hediondos) o en la degustación. Los olores de moho y a rancio aparecen en los casos en que las semillas están húmedas.

El grano de café está envuelto por una fina membrana, llamada corrientemente "película" o piel plateada, que es el tegumento se minal o delicado perispermo. Esta es delgada, plateada y brillante en el café arábica, más espesa en el café canephora, papirácea en el café excelsa, grosera y espesa en el café libérica.

El grano de café, tiene una forma esférica, hemielíptica o se miovoide; su sección transversal es, por consiguiente, plano convexa. Una forma excepcionalmente redondeada de esta sección es la que da el grano llamado "caracolillo", desarrollado en un fruto - unilocular o bilocular cuando uno de los óvulos aborta.

Cualquiera que sea su forma, el grano tiene siempre un profundo surco longitudinal, situado en su cara plana cuando es plano - convexo. Este surco presenta, al igual que el propio grano, numerosos caracteres morfológicos (recto, sinuoso, etc.). Si se secciona el grano transversalmente, se comprueba que no es únicamente superficial, sino que es en realidad una hendidura que se prolonga hacia el interior.

Los cafés verdes comerciables contienen agua entre un 10 y - 13%. Las legislaciones de los Estados productores, así como las - de los países consumidores, fijan entre 12 y 13% la tasa límite - admisible. La reglamentación francesa (decreto de 3 de septiembre de 1965) la fija en 12.5%. Por encima de este porcentaje, la conservación del café se ve comprometida, especialmente en medio húmedo; no tarda en enmohecer y decolorarse. Por el contrario, es - raro que los cafés se comercialicen con menos del 10%.

En efecto, los productores que recurren al secado solar difícilmente pueden obtener, en medio tropical, un producto más seco, mientras que los que utilizan medios de calentamiento exponen su café al riesgo de que se inicie la torrefacción cuando el contenido de agua desciende del 10%. En fin, unos y otros no tienen interés alguno, dado el estado del mercado, en eliminar más agua de - la estrictamente necesaria para asegurar una buena conservación - del grano, ya que hasta el momento el estado de sequedad no se - tiene en cuenta en las transacciones.

Algunos autores, como Morris y Wood, han demostrado cómo ciertas reacciones químicas que se producen en los cafés húmedos modifican su capacidad de dar tras la torrefacción productos aromáticos y sabrosos, y estiman que esta alteración se evita cuando el contenido en agua de los granos es inferior al 10%. Se sabe también que la vida del escolite (*Stephanoderes*) es imposible en los granos que contienen como máximo 12.5% de agua.

Este porcentaje, ejerce influencia sobre la torrefacción que es tanto más rápida cuanto más secos están los granos. Navellier hace observar que en el curso de dicha operación un café natural pierde más agua de la que contiene, y explica este fenómeno aparentemente paradójico, por la liberación de moléculas de agua cuyos átomos de hidrógeno y de oxígeno son extraídos de moléculas orgánicas transformadas. Dicho autor da el nombre de agua "química" al agua que se añade al agua "biológica" que contiene el grano verde.

La determinación analítica de la cantidad de agua del café verde reviste una gran importancia. Existen varios métodos de laboratorio, unos por evaporación en la estufa a 105°C, otros por arrastre, generalmente con tolueno o por medida química. Se han establecido medios científicos, estudiados recientemente por el grupo de café de la Organización Internacional de Estandarización (I.S.O.). El método denominado de referencia establece la pérdida de agua a presión reducida y a 48°C, en presencia de un agente deshidratante, y el método práctico recurre a un calentamiento -

de 130°C en dos tiempos. Junto a estos se utilizan en el comercio y en la industria métodos rápidos, menos precisos que los de los laboratorios, pero capaces, con aparatos bien graduados, de dar resultados suficientemente aproximados. Tales son, por ejemplo, los aparatos de calentamiento por rayos infrarrojos y otros métodos eléctricos. Entre estos últimos señalaremos un aparato automático que funciona mediante la medida de la constante dieléctrica de alta frecuencia.

Los principios volátiles contenidos en el café verde están representados por el agua y una pequeña cantidad de aceite esencial, cuya presencia se descubre por su olor, especialmente si se muele el grano.

Es durante la torrefacción cuando se forma, a partir de sustancias poco conocidas todavía y designadas con el nombre de "precursores", el aroma del café tostado.

El estudio de este "complejo aromático", el aislamiento de sus componentes, su identificación y su dosificación, constituyen un vasto programa de investigaciones, realizado hasta ahora de un modo muy fragmentario. La cromatografía en fase gaseosa ha detectado hasta el momento de 250 a 300 sustancias diferentes entre las que contribuyen al aroma del café, pero ninguna de ellas se caracteriza por sí sola por este aroma.

2.2 PROCEDIMIENTOS CONVENCIONALES DE TRATAMIENTO

Los frutos maduros del café se tratan en los mismos lugares - de producción y sufren una serie de operaciones que tienen por ob- jeto despojar a los granos de sus envolturas (pulpa, mucílago, - pergamino, película) y mejorar su presentación.

Para obtener el grano comerciable, se recurre a una de las - dos técnicas siguientes:

1. Vía húmeda.- En la cual la manipulación de los frutos frescos se efectúa en tres tiempos:
 - Eliminación de la pulpa (depulpado) y del mucílago (demucila- gination), lavado;
 - Secado del café-pergamino;
 - Eliminación de las envolturas internas, pergamino y película ("déparchage").
2. Vía Seca.- Que se resume en dos tiempos:
 - Secado de los frutos (café en fruto o café cáscara);
 - Eliminación de las envolturas secas en una única operación - mecánica (decorticación).

Recurrir a la vía húmeda es lo normal para los cafés arábica escogidos (Centro América, Colombia, etc.), calificados de - "milds" (dulces) para el comercio internacional, porque este méto- do, más cuidadoso que el otro, confiere al grano un aspecto agra- dable que valoriza los lotes. Los cafés, arábica u otros, -

tratados por la vía húmeda, se califican de "lavados". Los cafés canephora (Robusta) se preparan algunas veces así con el fin de valorizarlos.

En cuanto a los cafés tratados por la vía seca, calificados de "naturales", constituyen un alto porcentaje a menos que las condiciones climatológicas hagan preferir la vía húmeda, especialmente cuando se trata de manipular las importantes cantidades producidas en las grandes explotaciones.

Las dos técnicas significan una serie de operaciones cuya sucesión queda indicada en la Figura 2.1. Se observará que las últimas se aplican indistintamente en los cafés obtenidos por los dos métodos.

En los dos casos, el producto a tratar, el fruto maduro, contiene de 65 a 75% de agua, gran parte de la cual debe ser eliminada en el curso del secado.

1. Vía Húmeda

La primera operación, el depulpado, va precedida generalmente de una tréfa, delicada limpieza que tiene como fin eliminar los residuos vegetales (hojas, fragmentos de ramas, etc.) y las materias extrañas (piedras, tierra, etc.) que han sido recogidas en el momento de la recolección, así, el depulpado debe realizarse en el espacio más breve posible tras la recogida. Generalmente, transcurren algunas horas antes de proceder a esta -

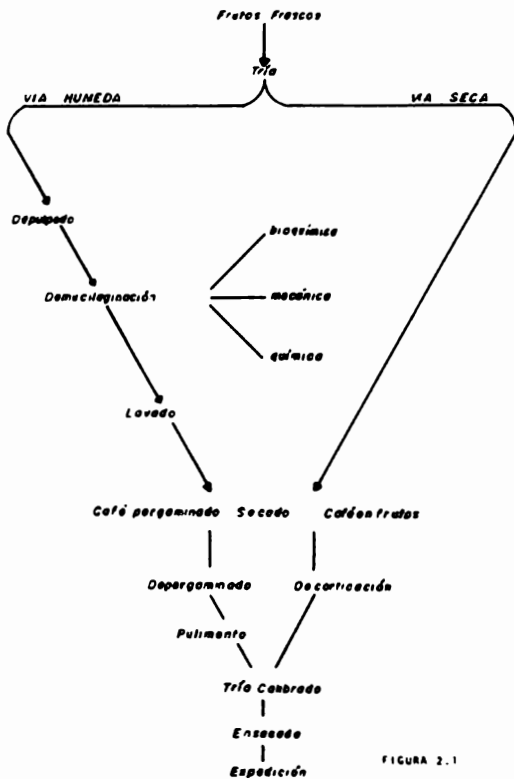


FIGURA 2.1

operación (amontonar los frutos recogidos, transporte, espera antes de la manipulación), pero la demora nunca debe exceder de - 36 horas.

Existen dos tipos de depulpadores: depulpadores de cilindro (o de tambor) y depulpadores de disco, basados en los mismos principios.

A la salida de los depulpadores, el café está todavía recubierto de mucílago, muy adherido al pergamino. Esta sustancia rica en pectina y muy higroscópica, es un obstáculo para el secado rápido de los granos. Se elimina mediante técnicas que se basan en:

- Acciones bioquímicas (fermentación).
- Acciones químicas.
- Acciones mecánicas.
- Acciones combinadas, químico-mecánicas.

Posteriormente viene el lavado que tiene por objeto eliminar los productos formados en el curso de la fermentación, los restos de pulpa adheridos todavía al pergamino, etc. Se efectúa generalmente en grandes cubas llamadas lavadores o por lento deslizamiento en canalizaciones a cielo abierto.

La densidad del café pergamino está comprendida en general entre 1.05 y 1.10 y los granos caídos en el agua tienen a deposi- tarse en el fondo de los recipientes, por lo que esta operación

debe acompañarse de un enérgico agitado.

Después del lavado (y escurrido), el café pergamino contiene de 50 a 60% de agua. Teniendo en cuenta la presencia del pergamino (7 a 8%) y la necesidad de reducir la cantidad de agua de los granos hasta un 12% aproximadamente para asegurar su conservación (como se había dicho anteriormente), debe eliminarse una cantidad aproximada de 100 kg. de agua de 200 kg. de café pergamino para obtener 100 kg. de café comercial. En México al llegar a 94% de humedad del grano se le llama punto de bodega, posteriormente se deja 7 días en silos o trojes de varios metros cúbicos de capacidad para uniformizar y llegar al 12% de humedad llamado punto de trilla; y para utilizar los granos como semillas deben de tener un 30% de humedad.

El secado de café pergamino se acelera con un buen escurrido a la salida de los canales de lavado. En el curso de esta operación, el agua de contacto se elimina por gravedad (de 5 a 10%). Aquí en México (I.M.C.) recibe el nombre de presecado, entrando los granos con un contenido de humedad de 55 a 60% y salen con un 45 a 50%, se realiza por medio de máquinas orificadoras.

Un secado mal conducido, demasiado rápido o demasiado prolongado, un humedecimiento durante el mismo (lluvia, rocío), etc., son capaces de alterar los granos (semillas decoloradas, abigarradas, pardas, rojizas, etc.) y tener grave repercusión sobre el valor comercial del producto. Tampoco debe olvidarse que un

secado excesivo entraña una pérdida de peso suplementaria que - ninguna medida financiera permite compensar.

Posteriormente viene el despergaminado o descascarillado que se realiza por medio de un descascarillador mecánico en tiempos - presentes, donde el grano es más o menos despojado de su película. Para la total eliminación de la película precisa un trabajo suplementario de fricción más profunda, la cual se efectúa me-- diante los aparatos llamados "pulidores" que difieren de los - despergaminadores en la estructura y en la naturaleza del cilindro de bronce fosforoso quienes dan un aspecto lustroso al gra- no.

2. Vía Seca

En esta técnica los frutos son secados inmediatamente después - de la recolección. Al terminar el secado, la pulpa o mesocarpio, el nuclago y el pergamino o endocarpio constituyen una especie de cáscara que envuelve los granos y que basta romper para liberarlos.

Este tipo de tratamiento requiere más tiempo. El secado de los frutos es más lento que el del café pergamino, pues la cantidad de agua a evaporar es muy superior ya que los frutos frescos - contienen alrededor de 60 a 75%. Los riesgos de aparición de - fermentaciones nocivas son mayores, dada la presencia de una - sustancia higroscópica, el nuclago.

Posteriormente la decorticación o descascarillado como operación final en su forma más sencilla consiste en golpear los frutos frescos en un mortero, pero se dispone ya de medios más perfeccionados y de gran rendimiento como los decortecedores ("hullers").

A la salida de los aparatos de depérgaminado o de decorticado, los cafés contienen todavía impurezas y una proporción más o menos grande de granos defectuosos o indeseables (granos manchados, decolorados, etc.) y cáscaras rotas.

Los reglamentos que en cada país definen las condiciones que deben satisfacer los lotes para ser exportadores (reglas de acondicionamiento) implican para el productor o el comerciante exportador la ejecución de cierto número de operaciones complementarias al tratamiento propiamente dicho: limpieza, trifa, calibrado, etc.

Datos sobre la composición de los frutos del café y su rendimiento en café comercial:

CAFE CANEPHORA (ROBUSTA)

100 kg de frutos maduros dan aproximadamente:

	74 kg de café depulpado
	52 kg de café lavado
	49 kg de café escurrido
	44 kg de café presecado
	26 kg de café pergamino
1. Vía húmeda	22 kg de café comercial

2. Vía seca 40-45 kg de frutos secos
 22 kg de café comercial

Subproductos 56-60 kg de pulpa fresca
 12-15 kg de pulpa seca
 3- 5 kg de pergamino
 20 kg de cáscaras

CAFE ARABICA

100 kg. de frutos maduros se descomponen generalmente en:

39 kg de pulpa fresca
 (6 16 kg de pulpa seca)
 22 kg de mucílago
 39 kg de café pergamino húmedo

100 kg. de café-pergamino húmedo dan en general:

79 kg de café pergamino seco
 54 kg de café comercial seco

1 kg de frutos maduros contiene alrededor de 550 cerezas.

1 m³ de frutos maduros pesa alrededor de 620 kg.

1 m³ de pulpa fresca pesa alrededor de 420 kg.

100 kg de pergamino dan alrededor de 3 kg de cenizas.

100 kg de cenizas de pergamino contienen aproximadamente:

10 kg de CaO y 23 kg de K₂O

El rendimiento final de 100 kg de frutos maduros es:

45 a 65% de exocarpio (piel) + mesocarpio (pulpa y mucílago)

35 a 55% de granos lavados llevan:

- agua para evaporar: 55%

- café pergamino con 10 a 12% de humedad:
25% (20% pergamino, 80% café comercial).

El rendimiento final en café comercial es: 12.8 a 18%.

Las cualidades aromáticas del café no aparecen ni se desarrollan si no es bajo la acción de altas temperaturas a las que es sometido en el curso de la torrefacción, llamada también "quemado" o "tostado".

Los especialistas sitúan la "zona de torrefacción" entre 185 y 240°C, siendo la temperatura óptima la comprendida entre 210 y 230°C.

Durante la torrefacción se producen 4 grupos principales de reacciones (deshidratación, hidrólisis, desmólisis y catálisis), que se realizan con mayor intensidad a temperaturas bien determinadas. Igualmente se ha comprobado que algunas de estas reacciones comienzan cuando otras no han terminado todavía.

La duración de la torrefacción es generalmente de 12 a 15 minutos. Es más rápida con algunos aparatos que con otros, y puede terminarse en 5 minutos como con las técnicas americanas llamadas de torrefacción continua. Por el contrario, existen técnicas llamadas de torrefacción lenta que precisan alrededor de 25 minutos.

La torrefacción provoca algunas modificaciones en el grano, - donde primeramente se registra pérdida de peso (llamada "pérdida por el fuego") debido a la evaporación de una gran parte del agua contenida en el café verde. Su importancia depende (de la pérdida de peso) primero del porcentaje de agua del grano verde, luego de su origen botánico, del modo de preparación de las semillas en el lugar de producción, de las condiciones de almacenaje, de la técnica de torrefacción, etc. La evaporación del agua no es la única responsable, pues también se debe a la eliminación de la película plateada (0.2 a 0.4%) y al desprendimiento de ciertos principios volátiles.

Hay dos técnicas de torrefacción que se distinguen por el hecho de estar el café en contacto o no con los gases calientes o - la llama.

El primer método tiene dos variantes: la torrefacción llamada por aire caliente, que consiste en poner los granos en contacto - con los gases calientes producidos por un generador, y el flameado, en el cual el grano es sometido a la acción directa de una - llama.

Subproductos de la preparación del café.- Las pulpas y las - cáscaras en general desperdiciadas, constituyen un excelente material fertilizante, recomendándose su utilización en forma de compost.

Hay que destacar una utilización muy importante: la preparación de gas combustible (metano) realizada en la India, República Centroafricana, etc.

Treinta kg de pulpa, parcialmente descompuesta, y a los que se han adicionado 18 l de agua y 2 kg de estiércol fermentado, han dado en 72 días 670 l de gas capaz de elevar la temperatura de 30 l de agua de 20°C a 70°C. Una tonelada de frutos da alrededor de 400 kg de pulpa fresca (más mucílago), es decir, 200 kg de pulpa parcialmente descompuesta, por lo que puede proporcionar un resultado térmico 15 veces superior. En una plantación adulta de 50 Ha, que produce 200 Tm de frutos, es decir, 40 Tm de pulpa parcialmente descompuesta, la utilización de esta fuente de calor puede significar el disponer permanentemente de agua caliente en la vivienda.

2.3 SECADO

El secado provoca una contracción volumétrica del grano del orden de 12 a 15%.

Se distinguen dos grandes técnicas de secado: el secado natural (o solar) y el secado artificial. Muchas veces se utilizan las dos, en general la segunda para completar la primera (secado mixto).

VIA HUMEDA

1. Secado Solar

En el secado solar la forma más sencilla es por medio de rejillas fijas o móviles, elevadas, confeccionadas con poco gasto a base de los recursos locales; sin embargo, el medio de secado más extendido es "la era", generalmente de cemento, cuya superficie es función de la importancia de las cosechas. Se estima que un metro cuadrado puede recibir una decena de kilos de café-pergamino húmedo. Se da a la "era" una ligera inclinación (de 1 a 2%) para facilitar el drenaje de las aguas de lluvia hacia desagües axiales o periféricos.

En los países en que son de temer lluvias durante el período de secado, es indispensable prever medios de protección de la "era".

El método de secado ejerce gran influencia sobre el valor del producto; un café de excelente origen puede, si se seca mal, perder parte de sus cualidades.

El secado debe ser progresivo, con el fin de dejar al revestimiento protector, que es el pergamino, intacto durante todo el tiempo de la exposición al aire. Una desecación correcta se traduce en un hermoso color uniforme de las semillas.

El secado debe iniciarse con la exposición de una capa de café de poco espesor, que se remueve con frecuencia para

eliminar rápidamente el agua superficial capaz de desencadenar una posterior fermentación nociva, la cual se produce en los cafés muy húmedos extendidos en capas gruesas y que no son removidos. A medida que el grano se deshidrata, el espesor de la capa puede aumentarse y alcanzar en las últimas horas una carga de 10 a 15 kg de café-pergamino húmedo por metro cuadrado, es decir, una capa de 3 ó 4 cm de espesor. Posteriormente al secar el café, se recoge en un gran montón que se cubre con un toldo o una hoja de polietileno hasta su transporte a los silos de almacenamiento.

La duración del secado depende principalmente de la climatología: temperatura diurna, intensidad de la insolación, grado higrométrico del aire, ventilación, naturaleza del soporte del café. En los países en que el aire es relativamente seco en el momento de la cosecha y de intensa insolación, el secado del café-pergamino requiere solamente de 6 a 8 días. En regiones menos favorecidas (que son la mayoría), el secado precisa de 10 a 15 días.

Para apreciar el grado de sequedad adecuado, generalmente, se somete al café a la prueba del diente, cuando ésta deja huecillo en el grano, puede considerarse que el secado es insuficiente. Para obtener una cifra aproximada del grado de humedad se utilizan los humidímetros de laboratorio.

2. Secado Artificial

El secado artificial es indispensable en los climas muy lluviosos y cuando el volumen a tratar hace necesaria la aceleración de las operaciones.

La técnica más antigua es la del suelo ardiente del horno clásico que consiste en un cambiador de calor que calienta una superficie plana, este se utiliza para el cacao, la copra, etc.

Se han hecho desde principios de siglo secadores mecánicos cuyo uso está muy extendido. Son los aparatos "Guardiola" (utilizado en México) y "Okassa", cuyo principal órgano es un tambor cilíndrico de palastro perforado (cuyas dimensiones son: 1.80 m de diámetro y 1.3 a 4.8 m de largo), animado por un lento movimiento de rotación (2 rev/min) alrededor de un eje tubular. El tambor está dividido en compartimientos de modo que se equilibre el aparato. El tubo axial comunica con una red de tuberías que atraviesa los compartimientos y que se abre en una camisa exterior. El aire caliente producido en una caldera o calentado con flama directa inyectado por un ventilador circula por las tuberías, y calienta la masa de café que va perdiendo poco a poco su agua. La temperatura de la masa no debe sobrepasar los 90°C al principio, para descender a 65-70°C en las últimas horas. Hay varios modelos de este tipo de secador rotativo, los cuales difieren sobre todo por su capacidad (de 1 a 6 Tm de café pergamino húmedo). La

duración del secado es de 20 a 30 horas, según el porcentaje de humedad inicial del café y la temperatura a que se desarrolla el tratamiento.

En términos generales, los cafés Arábica deben secarse más lentamente y a temperatura menos elevada que las demás especies.

Estos aparatos funcionan bien, pero su rendimiento es relativamente escaso y su compra gravosa, no interesando más que en factorías en que se traten volúmenes importantes.

La utilización de grupos generadores de aire caliente funcionando con aceites pesados y de fácil regulación, goza de gran favor en estos últimos años.

VIA SECA

1. Secado Solar

Las superficies de extendido deben ser mayores para volúmenes iguales respecto al secado solar en vía húmeda.

La capa de frutos no debe pasar los 5 ó 6 cm de espesor (alrededor de 40 kg de frutos frescos por m²), ya que existe un peligro serio de enmohecimiento, de germinación de los granos, de formación de granos negros, etc.

La duración del secado depende igualmente de la climatología, y es mayor, siendo por término medio de 10 a 20 días. Se considera terminado cuando las envolturas del grano (cáscara) se rompen con facilidad bajo la presión de los dedos.

Nunca se advertirá bastante a los pequeños plantadores sobre la depreciación del café que puede ocasionar un secado defectuoso. El caso más grave es el de un secado entrecortado por humedecimientos (lluvias), que se prolongue durante varias semanas, debido a las alteraciones que se puedan ocasionar en los granos, por eso, debemos tomar algunas precauciones como:

- a) Extender el café que debe secarse en una capa delgada mientras está fresco y muy húmedo todavía; aumentar el espesor de la capa progresivamente, sin sobrepasar al final los 5 cm.
- b) Velar con cuidado para que el café puesto a secar no quede expuesto a las lluvias o al rocío nocturno. Protegerlo en el sitio o colocar los zarzos bajo un abrigo.
- c) Remover varias veces al día el café en curso de secado.
- d) No introducir en el almacén, antes de ser decorticado, más que café con cáscara bien seco.
- e) Proceder a la decorticación con la menor dilación posible, para evitar riesgos de alteraciones por humedecimiento si las condiciones de almacenamiento no son satisfactorias.

2. Secado Artificial

Para el secado artificial del café en fruto se utiliza el mismo material que para el café pergamino. La operación es evidentemente más larga y exige un gasto de calorías más elevado.

En Brasil y en las grandes haciendas, con frecuencia alternan el secado solar y el secado artificial, de modo que el proceso se acerque al natural que es el preferido por los productores. Siguiendo esta orientación, en dicho país se utiliza un aparato de secado lento para el café en fruto, llamado secador Torres.

2.4 ALTERNATIVAS PARA EL SECADO: CONVECCION, RADIACION, CONVECCION-RADIACION

Así, hemos visto, que el secar café consiste en darle energía en forma de calor, siendo convencionalmente el método de convección (pasar aire caliente a través de los granos de café).

Ahora bien, existe otra alternativa debido al desarrollo industrial que es el usar la radiación térmica infrarroja, la cual explicaremos sus características en el cuarto capítulo, ésta consiste en enviarle un haz de rayos de cierta longitud de onda sobre el café para su secado.

Se puede también hacer una combinación de los dos métodos anteriores, que da por resultado una mejor técnica de secado, que -

hablaremos posteriormente de ella.

Las formas de secar el café mencionadas anteriormente es para realizar el secado artificialmente, pues, en el secado natural, - sólo existe una única manera de transferirle energía que es la radiación.

CAPITULO 3

ELEMENTOS DE RADIACION TERMICA INFRARROJA

En este Capítulo que es un resumen de las referencias 4 y 5, se presenta una sinopsis histórica de la radiación térmica infraroja que incluye su descubrimiento, problemas a los cuales se enfrentaron los investigadores de la misma, desarrollo de los aparatos de detección y características principales, asimismo, se define y se da la diferencia entre emisividad y emitancia, como también los fundamentos de radiación.

3.1 HISTORIA DE LA RADIACION TERMICA INFRARROJA

En 1800 Sir William Herschel llevó a cabo una serie de experimentos para determinar la distribución de la potencia calorífica entre los varios colores en el espectro solar. El experimentó en un espectro prismático proyectado sobre una mesa, usando como un detector de energía calorífica un termómetro sensible de mercurio dentro de vidrio, el cual podría ser movido con él el espectro. El se sorprendió al encontrar que la potencia calorífica se incramentaba hacia el rojo final del espectro, ~ no alcanzó un máximo hasta que el termómetro se movió más allá del límite del espectro visible. Así, estableció la existencia de una forma de energía radiente la cual se refracta por un prisma, que es menor refractante que la luz roja, y para lo cual el ojo es insensible. Herschel

siguió en pie este descubrimiento a propósito, exponiendo que esta radiación se refleja y se refracta de acuerdo a las leyes de óptica.

También expuso, que la radiación térmica para fuentes semejantes, como una bujía, un fuego, un bургón caliente rojo, y aún una estufa de casa demostraron que la radiación en la región no visible obedeció a las mismas leyes de la radiación solar térmica. Conjeturó que esta radiación fué de la misma naturaleza que la luz, "diferiendo" sólo en "cantidad de movimiento". Así, él usó el término de "luz invisible". Como correcta esta sugerencia, fué teniendo sólo una conversión aparente en tiempos recientes desde que la simple relación entre cantidad de movimiento y longitud de onda de un quantum ha venido a conocerse. Herschel no obtuvo beneficios al venir probando su conjetura, la cual fué discutida por cerca de medio siglo.

Por 30 años siguió Herschel en su descubrimiento que ahora se conoce como el espectro infrarrojo (debido a su posición relativa de dispersión hacia el rojo visible), y muy pocos progresos fueron hechos posteriormente, estableciendo que la radiación obedece a las leyes simples de la óptica. Esto fué principalmente debido a que los experimentos fueron poniendo obstáculos por la carencia de un detector mejor que el ordinario termómetro.

En 1830 L. Nobili usó un aparato, basado en el descubrimiento

de Seebeck (en 1826) por medio de efectos termoeléctricos, al medir pequeñas diferencias en temperatura. Esto llegó a ser conocido como un termopar. Un número de termopares semejantes en serie los usó M. Melloni como un detector de radiación el cual llamó - termopila. Este instrumento fué mucho más sensible que el termómetro previamente utilizado y llegó a ser el detector más usado de radiación infrarroja para el siguiente medio siglo. Melloni extendió grandemente el rango de observaciones en el espectro infrarrojo.

Sir John Herschel continuó con los trabajos de su padre en el espectro infrarrojo, y en particular, comprobó por el aparato fotográfico y otros métodos al hacer el espectro infrarrojo visible, fuertemente apoyó las conjeturas de su padre: que la luz y la radiación infrarroja son esencialmente lo mismo.

El siguiente problema de importancia, el cual ocupó la mayor parte de los investigadores en este campo fué el determinar la longitud de onda límite de toda la radiación infrarroja. Varias estimaciones fueron hechas, pero todas resultaron erróneas.

El método usado para la medición de la longitud de onda en este tiempo fué simplemente el del interferómetro óptico por medio del cual el cambio en distancia entre 2 placas planas requirió - cambiar de una máxima interferencia a la siguiente observación hecha. En esta forma las leyes de dispersión para varios materiales

prismáticos en uso fueron determinadas.

En principio, el solo efecto observable de la radiación infrarroja fué el calentamiento. En 1843, sin embargo, E. Becquerel - descubrió los efectos fotográficos y fosforescentes, pero éstos - fueron mostrados sólo dentro del espectro visible. El nuevo desarrollo prolongó el rango de longitud de onda superior al cual estos efectos pueden ser observados, pero hasta hoy ellos están limitados a longitudes de onda menores de 1.3μ .

El siguiente gran avance en tecnología viene con la invención del bolómetro por S.P. Langley en 1880. Este instrumento depende para su operación en un pequeño cambio de resistencia de un alambre delgado que es calentado por la radiación incidente. Su sensibilidad fué mucho mayor que la de las termopilas contemporáneas - las cuales han sido perfeccionadas desde su uso por Melloni. El incremento de la sensibilidad, facilitó el uso de ser hecha la difracción áspere para obtener altas dispersiones, y para mediciones de longitud de onda. Por este medio, Langley fué capaz de investigar en detalle la absorción de radiación solar en la atmósfera y establecer las leyes de dispersión para varios metales con un lejano grado de exactitud que han sido posibles en la actualidad.

Por 1897 siguieron las investigaciones para saber el límite - del espectro infrarrojo, usando técnicas en el interferómetro. -

Luego vino la teoría de ondas electromagnéticas de Maxwell, y Hertz llevó a cabo sus investigaciones de las propiedades de estas ondas. Dentro de los pocos años próximos, rayos con longitud de onda de hasta 300μ fueron observados y llegó a quedar clara la duda existente entre la longitud de onda de la radiación infrarroja y las ondas electromagnéticas hertzianas.

Además, experimentos con radiación infrarroja confirmaron bastante la teoría electromagnética de Maxwell, dando resultados mucho más de acuerdo con predicciones hechas en experimentos de luz visible.

En 1920 Giagoleva Arkadiewa mostró que la radiación infrarroja de longitud de onda hasta 90μ puede ser generada por un pequeño oscilador hertziano en forma de latón timado sumergido en aceite.

En 1923 E.F. Nichols y J.D. Teer usando difracción óptica para medir la longitud de onda, mostraron que las ondas hertzianas de longitud de onda hasta 220μ pueden ser generadas. Estas ondas difieren de las usadas en técnicas de radio por ser incoherentes. Ellas aparecen del alto amortiguamiento de oscilaciones de muchos dipolos de fases casuales.

En recientes años, sin embargo, la generación de trenes de ondas coherentes hasta longitudes de onda de sólo unos pocos milímetros

tros han podido ser posibles, y éstas han ayudado a mostrar la absorción de moléculas individuales como en la luz. Las primeras observaciones de esto, fueron hechas por C.E. Cleeton y M.H. Wi-
lliams en 1934 usando gas amoníaco y un rango de longitud de onda de 1 a 4 cm.

Para esta observación en general, el nuevo campo del espectro de microondas ha crecido y las dudas existentes entre el infrarrojo y las ondas de radio han sido discipadas. Se debe también ha-
cer notar que la radiación térmica ahora pueda observarse usando técnicas de microondas.

Entre tanto hacia el comienzo del siglo XX, terminado el in-
cremento en precisión disponible para el uso del bolómetro y la -
termopila perfeccionada (los cuales en breve llegaron a ser un se-
rio rival), así como otros detectores térmicos, el panorama mara-
villosa del espectro en la banda infrarroja fué desplegado. Este
fué primero observado como banda difusa pero era enseguida clasi-
ficado dentro de grupos en espacios cerrados de líneas angostas -
regulares, siendo posible debido al desarrollo de prismas y enre-
jados de difracción para usar en el infrarrojo, donde la urgencia
actual era fijar más sensibilidad y alta precisión.

El siguiente gran avance en técnicas de detectar viene con el
uso del fenómeno fotoeléctrico como la base de detección. Por mu-
chos años éste fué restringido a longitudes de onda menores de -
1.3 μ pero recientes avances en detectores fotoconductivos han ex

tendido su uso a cerca de 9μ .

El momento de investigar el problema principal del infrarrojo, es el de extender el uso de sensibilidad semejante en detectores a lo largo de toda longitud de onda para la cual la intensidad - disponible de fuentes llegue a ser más y más débil.

Ahora, vemos que la radiación infrarroja no es una manera diferente que la luz, excepto en longitud de onda, ambas consisten de ondas electromagnéticas transversales. El ojo humano responde a solo una muy angosta banda de longitud de onda (0.38 a 0.78μ), así que el espectro visible es una pequeña parte de un espectro - de radiación, extendiéndose hasta un muy largo rango de long. de onda que incluye la radiación ultravioleta en el lado de onda-corta y la radiación infrarroja en el lado de onda larga.

Las largas longitudes de onda son las ondas usadas en la radio. La esencial diferencia entre éstas y el calor radiante es - que las ondas de radio pueden ser generadas eléctricamente como - trenes de onda con una fase bien definida. La mínima longitud de onda en la cual esto es posible es de 1 mm aproximadamente, así por lo tanto, se determina la long. de onda límite para el espectro infrarrojo que es de 1 mm (sólo es un límite conveniente y - arbitrario).

Entonces, la radiación infrarroja se extiende de una long. de

onda de 0.78μ a 1000μ , cubriendo un enorme rango del espectro - electromagnético e incluye más de 3 décadas. Es conveniente subdividirlo dentro de pequeños rangos. Esta subdivisión ha sido determinada específicamente por las técnicas empleadas para la detección y medición de la radiación, y como éstas tienen variaciones de acuerdo a los tiempos en que se han usado, la subdivisión no - ha sido siempre la misma.

Ese ancho justamente usado en la actualidad es:

Long. de onda

$0.78 - 1.5 \mu$	Cercano Infrarrojo
$1.5 - 10 \mu$	Intermedio Infrarrojo
$10 - 1000 \mu$	Lejano Infrarrojo

La radiación cercana infrarroja tiene la propiedad de producir la mayor parte de los fenómenos físicos como la luz visible, con la excepción que no es vista por el ojo. Los métodos físicos de detección y medición son por lo tanto muchas veces los mismos que los usados para la luz. Para el lejano infrarrojo, hasta muy recientemente, el efecto físico sólo observado fué el calentamiento y esto formó las bases de los métodos usados para su detección. Como el nombre lo dice, la radiación intermedia infrarroja tiene algunas pero no todas las propiedades que la luz visible. Métodos de detección en uso para las 3 subdivisiones será expuesto en el Capítulo 5.

La temperatura a la cual principia a radiar un cuerpo en el rango infrarrojo es de 523°C aproximadamente.

3.2 PRINCIPIOS FUNDAMENTALES DE RADIACION TERMICA

La transmisión del calor por radiación es sólo uno de los numerosos fenómenos electromagnéticos. El término "radiación" se aplica generalmente a toda clase de procesos que transmiten energía por medio de ondas electromagnéticas. La gama total de esas ondas se subdivide en grupos de acuerdo con la longitud de onda o frecuencia y también con la aplicación. La figura 3.1 representa el espectro electromagnético, que abarca desde ondas eléctricas de gran longitud y baja frecuencia, hasta rayos cósmicos de longitud extremadamente corta y alta frecuencia.

Algunos fenómenos de radiación pueden describirse en términos de la teoría ondular y otros por la teoría cuántica, pero ninguna de ellas explica todas las observaciones experimentales. Sin embargo, se sabe, que la radiación viaja en el espacio libre con la velocidad de la luz (V_e) y no requiere para su propagación un medio interpuesto. La transferencia de energía se efectúa en forma de unidades de energía pequeñas, pero finitas, conocidas como quanta (plural de quantum). La frecuencia de la radiación (f_r) depende del todo de la naturaleza de la fuente, o sea, que un cuerpo de cualquier clase emite radiación térmica a cualquier temperatura. La longitud de onda λ de la radiación se define como la ra-

ción de la velocidad de propagación a la frecuencia:

$$\lambda = \frac{v_e}{f_r} \quad (3.1)$$

La unidad de longitud de onda es el micrón (μ).

$$\mu = 1 \times 10^{-6} \text{ m} = 3.94 \times 10^{-5} \text{ in}$$

Una explicación cualitativa del mecanismo mediante el cual se transmite energía radiante puede darse en términos de la teoría ondular. En el proceso de emitir radiación, un cuerpo convierte parte de su energía interna en ondas electromagnéticas que son una forma de energía. Estas ondas se mueven a través del espacio, hasta que chocan sobre otro cuerpo, donde parte de su energía es absorbida y convertida en energía interna. La emisión de radiación produce un descenso de la energía interna del cuerpo emisor y, a menos que se genere calor dentro de ese cuerpo, o reciba calor de otra fuente, su temperatura decrecerá. Sólo cuando la velocidad a que el cuerpo genera o recibe calor es igual a la velocidad de emisión de energía, permanecerá constante la temperatura del mismo.

Las características de la radiación emitida por un cuerpo dependen de su estado físico.

La gran proximidad de las moléculas vecinas en sólidos y líquidos, perturba los niveles de energía de una molécula emittente o absorbente, a tal grado que las líneas espectrales se funden -

una con otra, para producir un espectro continuo. Así pues, los líquidos y sólidos emiten y absorben radiación en un intervalo continuo de longitudes de onda, pero con intensidades que varían con ésta.

3.3 ABSORCION, REFLEXION Y TRANSMISION

Cuando la radiación choca contra la superficie de un cuerpo es parcialmente absorbida, parcialmente reflejada y, si el cuerpo es transparente, parcialmente transmitida. La relación entre las frecuencias de energía absorbida, la reflejada y la transmitida respectivamente es de acuerdo con la ley de la conservación de la energía:

$$\alpha + \rho + \zeta = 1 \quad (3.2)$$

Las magnitudes relativas de α , ρ y ζ no sólo dependen de la temperatura, las características de la superficie, las propiedades geométricas del cuerpo y el material, sino también varían con la longitud de onda y el ángulo de incidencia.

Los sólidos y líquidos son, generalmente, opacos en la mayor parte de las aplicaciones de la ingeniería, y los gases reflejan muy poco.

La reflexión de la radiación desde una superficie puede ser difusa o regular. En la reflexión regular el ángulo de incidencia de

un rayo de radiación es igual al ángulo de reflexión, y en la reflexión difusa (que es casi isotrópica) un haz incidente de rayos es distribuido uniformemente en todas direcciones al ser reflejado. El análisis de los problemas de radiación se simplifica bastante cuando se limita a la radiación difusa, con lo que se supondrá siempre, a menos que se indique otra cosa (como en revestimientos metálicos pulimentados que se usan en reflectores solares y en algunas superficies de satélites), que son difusas la reflexión y la emisión.

3.4 LA LEY DE KIRCHHOFF Y EL CUERPO NEGRO

La ley de Kirchhoff establece que ninguna superficie puede absorber o emitir más radiación que una negra. El cuerpo negro es, por lo tanto, un radiador ideal que absorbe toda la radiación incidente. Un corolario, de la ley de Kirchhoff es que, en el equilibrio térmico, son iguales la absortancia y la emitancia de cualquier cuerpo:

$$\alpha = \epsilon \quad \dots (3.3)$$

Para un cuerpo negro α y ϵ son iguales a la unidad.

Un elemento de superficie de un cuerpo negro irradia difusamente en todas direcciones. La potencia emisiva E (que es la emisión total de energía por unidad de área y por unidad de tiempo), varía en razón directa de la cuarta potencia de la temperatura ab

soluta, de acuerdo con la fórmula:

$$\epsilon = \sigma T^4 \quad . . . (3.4)$$

donde σ = constante de Stefan - Boltzmann $= 5.7 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$

La potencia emisiva se obtiene, sin embargo, integrando con respecto a λ , de 0 a ∞ , la ec. de Max Planck:

$$\epsilon_{\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} \quad . . . (3.5)$$

$$C_1 = 3.74 \times 10^8 W \mu^4 / m^2$$

$$C_2 = 1.4387 \times 10^4 \mu \cdot K$$

que nos da la potencia emisiva monocromática de un cuerpo negro, puesto que la emitancia y absorptancia de la mayor parte de los materiales dependen de la longitud de onda.

La energía radiada dentro de un ángulo sólido unitario, en una dirección dada, por un elemento unitario de superficie proyectado sobre un plano perpendicular a la dirección de la radiación, es llamada la intensidad de radiación I (implica la cantidad de radiación emitida en una cierta dirección y que es posteriormente interceptada por algún otro cuerpo) y es un vector dado por la relación:

$$I_{12} = \frac{dq_{1 \rightarrow 2}}{(dA_1 \cos \theta_1) d\omega_{12}} \quad . . . (3.6)$$

donde $d\omega_{1 \rightarrow 2}$ es el ángulo sólido subtendido por dA_2 , con respecto al centro de dA_1 , como se muestra en la figura 3.2, definiendo como $d\omega_{12} = dA_2 \cos \theta_2 / r^2$, y $dq_{1 \rightarrow 2}$ es la parte de la radiación proveniente de dA_1 , que es interceptada por dA_2

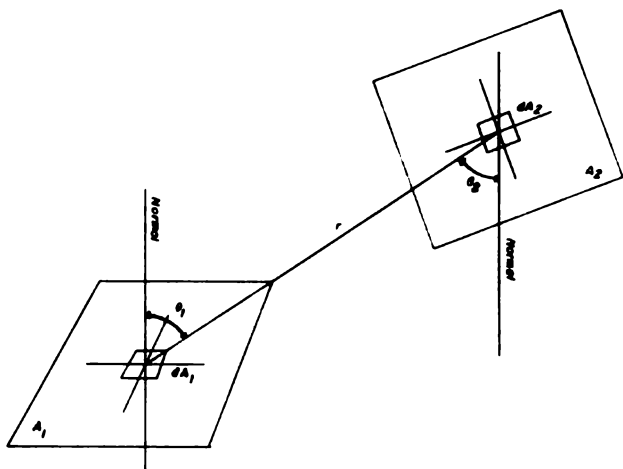


FIGURA 3.2

En un cuerpo negro que radia difusamente, o sea, su intensidad es independiente de la dirección, la radiación interceptada - por una área dA_2 en un hemisferio colocado sobre dA_1 , variará solamente con el tamaño de dA_1 , visto por un observador situado sobre el hemisferio. Esto se conoce como la ley de Lambert del coseno:

$$I(\theta_1) = I \cos \theta_1 \quad \dots (3.7)$$

donde I es la intensidad en la dirección normal.

Para una área difusa dA_1 , la relación entre E_1 e I es:

$$E_1 = \int_{A_2} I(\theta_1) \cos \theta_1 \, d\omega_1 = 2\pi I_1 \int_0^{\pi/2} \cos \theta_1 \sin \theta_1 \, d\theta_1 \quad \dots (3.8)$$

$$= \pi I_1$$

La potencia emisiva monocromática presenta su valor máximo hacia longitudes de onda más cortas al aumentar la temperatura. Esto se expresa por medio de la ley de Wien:

$$\lambda_{\max} T = C_3 = 2897.6 \, \mu^\circ K \quad \dots (3.9)$$

donde $\lambda_{\max}$ es la longitud de onda a la que ocurre la máxima emisión.

El área total comprendida entre las curvas espectrorradiométricas y el eje horizontal, representa la energía total radiada - por un cuerpo negro a la temperatura indicada.

3.5 PROPIEDADES DE LA RADIACION

Un gran número de sugerencias se han hecho en un empeño por - estandarizar la nomenclatura en radiación. La "National Bureau of

Standards" está intentando estandarizar la nomenclatura, y en sus publicaciones reserva la terminación "ividad" para las propiedades de una superficie ópticamente lisa sin contaminantes (emisividad, reflexividad, etc.), mientras que la terminación "ancia" - (emitancia, reflectancia, etc.) se usa en propiedades donde hay necesidad de especificar las condiciones de la superficie.

En la práctica, la terminación "ividad" se asigna a propiedades intensivas de materiales (resistividad eléctrica, conductividad térmica, difusividad, etc.), y la terminación "ancia" se reserva por lo tanto a propiedades extensivas de materiales (resistencia eléctrica, conductancia, etc.). El uso del término emitancia definido anteriormente no sigue esta convención, ya que la emitancia supuestamente es una propiedad intensiva cuando se consideran materiales opacos. Además, es incómodo definir dos términos para el mismo concepto, pues usando el término apropiado diferencia solo el caso especial de la superficie perfectamente preparada.

Por estas razones, la terminación "ancia" será usada durante todo este trabajo en las propiedades de radiación. La terminación "ancia" puede entonces reservarse para una propiedad extensiva como la emitancia de una capa de agua donde la emitancia varía con el espesor de ella. Las relaciones se derivaron sin considerar la aplicación de la nomenclatura adoptada.

Debe notarse que la terminación "ancia" se encuentra a menudo en la literatura comercial en la determinación experimental de las propiedades de la superficie. El término emitancia se usa también en algunas referencias al describir a la potencia emisiva.

La evaluación de la emitancia, absorptancia y reflectancia globales efectivas de una superficie es, a menudo, una importante parte de los cálculos de la transmisión del calor por radiación. Generalmente, se consignan valores de las emitancias y absorptancias de diversas superficies como valores medios para cada propiedad, y no se toma en cuenta la fuente de radiación. Además, en algunos casos, ha sido medida la emitancia en la dirección normal a la superficie y es necesaria una extrapolación de exactitud incierta cuando se usa ese resultado en lugar del valor global hemisférico. Así, se ha hecho evidente que este tipo de información no es adecuada para una exacta evaluación de la transmisión del calor por radiación y se han publicado resultados de la emitancia, absorptancia o reflectancia monocromáticas en un amplio intervalo de longitudes de onda para diversos materiales.

Si se conocen las distribuciones espectrales de la reflectancia, absorptancia o la emitancia de la superficie de un cuerpo, la emitancia, absorptancia o reflectancia efectivas de esas superficies pueden ser calculadas con exactitud, pero los valores de los últimos propiedades pueden depender en gran parte no sólo de la temperatura del receptor, sino también de la naturaleza de la fuente de radiación.

Las definiciones básicas de la emitancia global hemisférica - ϵ_T y de la absorptancia α_T de una superficie a temperatura T son:

$$\epsilon_T = \frac{\int_0^\infty \epsilon_{\lambda T} E_{\lambda T} d\lambda}{\int_0^\infty E_{\lambda T} d\lambda} \quad \dots (3.10)$$

$$\alpha_T = \frac{\int_0^\infty \epsilon_{\lambda T} G_{\lambda T} d\lambda}{\int_0^\infty G_{\lambda T} d\lambda} \quad \dots (3.11)$$

donde $\epsilon_{\lambda T}$ = emitancia hemisférica monocromática

$E_{\lambda T}$ = potencia emisiva monocromática del cuerpo negro

$\alpha_{\lambda T}$ = absorptancia monocromática

$G_{\lambda T}$ = radiación incidente monocromática, o irradiación, desde una fuente a T_1 .

La ley de Kirchhoff restringiéndola a una dada longitud de onda λ es:

$$\epsilon_{\lambda T} = \alpha_{\lambda T} \quad \dots (3.12)$$

Combinando estas 3 anteriores ecuaciones, mencionaremos algunos puntos importantes para la correcta aplicación de las propiedades de radiación de varias fuentes al diseño térmico:

1. La emitancia hemisférica global de un cuerpo es igual a la absorptancia global hemisférica ($\alpha_T = \epsilon_T$) si: a) la superficie del cuerpo es "gris", lo que significa que la emitancia y la absorptancia no cambian con la longitud de onda y $\epsilon = \alpha = \epsilon^h$ ó b) la radiación incidente $G_{\lambda T}$ proviene de un cuerpo negro o gris, a la misma

na temperatura del receptor, esto es, $T=T_1$, de manera que $G_{\lambda T_1}$ es proporcional a $E_{\lambda T}$. Esta condición corresponde al equilibrio térmico.

2. La absorbancia hemisférica global de una superficie a la temperatura T_1 es igual a la emitancia hemisférica global de la misma superficie a la temperatura T_2 , si $\alpha_{\lambda T}$ no es una función de la temperatura y si las características espectrales de la radiación incidente para la cual ha sido medida la absorbancia, corresponden a las de un cuerpo negro como fuente, a T_2 , esto es, $G_{\lambda T_2} = E_{\lambda T_2}$.

Si $\alpha_{\lambda T}$ es invariante de la temperatura, tenemos que $\alpha_{\lambda T_1} = \alpha_{\lambda T_2} = \epsilon_{\lambda T_2}$, la aplicación de la ley de Kirchhoff muestra que $\epsilon_{T_2} = \alpha_{T_1}$.

3. Cuando la superficie no es gris y no es posible obtener datos a la temperatura deseada y de la fuente adecuada, pueden calcularse los valores medios apropiados de las propiedades de la radiación, siempre que se disponga de los datos espectrales.

3.6 ANALISIS DE LA TRANSMISION DEL CALOR POR RADIACION

Se presentan 3 métodos de análisis de los problemas de radiación térmica que difieren más bien en su punto de vista que en su método básico. La aplicación de éstos, está restringida a sistemas en que la radiación es difusa o isotrópica, es decir, que la in

tensidad en cualquier punto es independiente de la dirección. La intensidad de radiación es una cantidad vectorial cuya posición se describió en el inciso c y cuya magnitud $|l_{12}|$ puede ser definida para la radiación de dA_1 a dA_2 como:

$$dq_{1-2} = \frac{|l_{12}| (dA_1 \cos \theta_1) (dA_2 \cos \theta_2)}{r^2} \quad \dots (3.13)$$

Para cuerpos grises que irradian difusamente, así como para cuerpos negros, esta ecuación, puede ser generalizada definiendo la radiosidad J_1 como la radiación total (esto es, la suma de la radiación emitida, reflejada y transmitida) que parte de una superficie unitaria A_1 , en la unidad de tiempo:

$$J_1 = \frac{dq_{1-Total}}{dA_1} \quad \dots (3.14)$$

Cuando es constante a lo largo de su trayectoria el vector l_{12} , es decir, cuando la radiación viaja a través de un medio no absorbente, se demuestra que para un cuerpo negro $J = \pi I_1$. El valor de la transmisión por radiación desde una superficie gris dA_1 a dA_2 es entonces

$$dq_{1-2} = J_1 d(A_1 F_{12}) \quad \dots (3.15)$$

en donde F_{12} es el factor de forma que a continuación definiremos. Y, del mismo modo, el valor de la transferencia por radiación desde dA_2 a dA_1 es:

$$dq_{2-1} = J_2 d(A_1 F_{12}) \quad \dots (3.16)$$

$$\text{donde } d(A_1 F_{12}) = d(A_2 F_{21}) = \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{r^2} dA_1 dA_2 \quad \dots (3.17)$$

El valor neto de la transmisión entre dA_1 a dA_2 combinando

las ecs. anteriores será:

$$dq_{1-2} = (J_1 - J_2) \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{\pi r^2} dA_1 dA_2 \quad \dots (3.18)$$

Si las áreas son finitas, pero uniformemente irradiadas, el valor neto de la transferencia por radiación se obtiene integrando la última ecuación:

$$q_{1-2} = (J_1 - J_2) \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{\pi r^2} dA_1 dA_2 = -q_{2-1} \quad \dots (3.19)$$

La doble integral se escribe generalmente en forma cómoda como $A_1 F_{12}$ ó $A_2 F_{21}$, donde F_{12} es llamado el factor de forma basado en el área A_1 y F_{21} es llamado el factor de forma basado en el área A_2 (en este caso, implica la fracción de energía radiante que sale de la superficie 2 y es interceptada por la 1).

La relación general:

$$A_i F_{ij} = A_j F_{ji} \quad \dots (3.20)$$

es conocida como el teorema de reciprocidad.

Además de los teoremas de reciprocidad, existe otra importante relación entre los factores de forma de un cuerpo dado cualquiera, en un recinto que consiste de n superficies. Puesto que toda la radiación emitida por el cuerpo 1 debe llegar a las superficies circundantes, ó, si el cuerpo tiene un contorno cóncavo, a una parte de su propia superficie, se sigue que:

$$F_{11} + F_{12} + \dots + F_{1n} = 1 \quad \dots (3.21)$$

Esta ecuación se aplica solamente cuando J_1 es uniforme sobre la superficie A_1 .

Para un cuerpo negro que no refleja nada de la radiación incidente $J=E$ y tendremos que el intercambio de calor entre 2 superficies es:

$$q_{1j} = A_1 F_{1j} (E_1 - E_j) = -A_j F_{ji} (E_j - E_1) = -q_{ji} \quad . . . (3.22)$$

La velocidad neta de transmisión de calor desde una superficie negra A_1 contenida en un recinto al resto del mismo, consistente en n superficies negras, es:

$$q_{1-\text{Total}} = \sum_{j=1}^n A_j F_{1j} (E_1 - E_j) \quad . . . (3.23)$$

Las superficies rerradiantes son aquellas que reflejan difusamente y emite radiación en la misma proporción en que recibe.

Para superficies grises, definiendo la radiosidad J como la velocidad a que sale la radiación de una superficie unitaria, tenemos:

$$J = \rho G + \epsilon E \quad . . . (3.24)$$

para un cuerpo gris opaco y difuso. La velocidad neta a que sale la radiación por unidad de área es igual a la diferencia entre la radiosidad y la irradiación:

$$\frac{dq_{\text{neto}}}{dA} = J - G \quad . . . (3.25)$$

Como para una superficie gris ρ es constante y $\rho + \epsilon = 1$. e in

tegrando queda que:

$$q_{\text{neto}} = \frac{A_e}{\rho} (E - J) \quad (3.26)$$

El efecto de las propiedades geométricas del sistema sobre la radiación neta entre dos superficies grises A_i y A_j , que emiten J_i y J_j respectivamente, es la misma para superficies negras similares.

$$q_{ij} = A_i F_{ij} (J_i - J_j) = -A_j F_{ji} (J_j - J_i) = -q_{ji} \quad (3.27)$$

CAPITULO 4

ESQUEMA PROPUESTO PARA EL SECADO DEL CAFE

En el presente capítulo se mencionan las principales características del secado por radiación infrarroja y los diferentes tipos de fuentes de radiación, lo cual es un resumen de la referencia 6, además, se propone en forma general el sistema industrial de secado de café por radiación infrarroja y se expone la conveniencia de usar aire en convección libre, para expulsar la humedad proveniente del café con su respectivo modelo matemático en el esquema propuesto.

4.1 SECADO MEDIANTE RADIACION INFRARROJA

El secado es un proceso físico-químico complejo, el cual no sólo debe dar por resultado el conservar las propiedades naturales del material, sino también, en muchos casos, debe mejorar estas propiedades. Esta condición se aplica en particular a los productos alimenticios, el secado involucra fenómenos fisiológicos - bioquímicos y físico-químicos, dependiendo de las propiedades del producto. De acuerdo con los principios científicos de la tecnología del secado, la selección del método para llevar a cabo el proceso y sus condiciones óptimas, debe depender de las propiedades del producto a tratarse. Sobre esta base se diseña la apropiada instalación de secado. Es también necesario, al establecer las

condiciones para el secado termorradiante, tener una información adicional de las propiedades ópticas de los materiales (productos), y las peculiaridades específicas del proceso.

Las características ópticas de los materiales, son de gran importancia, pues basados en estos datos, se puede dar una formulación de las características básicas del mecanismo de secado y tratamiento térmico de materiales por rayos infrarrojos, ya que de estas características dependen las condiciones tecnológicas del proceso.

La densidad del flujo de calor sobre la superficie del material sujeto a la radiación infrarroja es muy grande (unas 20 a 100 veces) a diferencia del secado por convección. Algunos datos experimentales permiten suponer que el secado por radiación comparado con el convectivo, reduce el tiempo de secado hasta un 50%. Al mismo tiempo, como un resultado de la interacción de las ondas electromagnéticas con la sustancia radiada, algo de la energía suministrada es absorbida por la sustancia, mientras que otra parte de ella la emite el mismo material por medio de ondas electromagnéticas secundarias.

Es importante destacar que el rango del espectro más adecuado para la radiación deberá ser aquel en el que el material ofrezca la máxima transmitancia y la mínima reflectancia. Así, se sugiere que para la mayor parte de los productos alimenticios, este rango

esté comprendido entre 1.2 y 2.4μ , con un radiador por ejemplo - de una $\lambda_{\text{máx}} = 1.6 \mu$ (1800°K).

La calidad de los productos secados con radiación infrarroja se preserva notablemente, ya que el calentamiento se lleva a cabo a temperaturas relativamente bajas.

Se dice, que el secado infrarrojo es muy semejante al secado solar.

El súbito gradiente de humedad inicial puede dar lugar a que el material se agriete e inclusive, se rompa; por esto, se debe tener mucho cuidado con él.

Hay que notar que el contenido de agua afecta notablemente - las propiedades ópticas del producto y la reflectancia total de - los materiales disminuye al decrecer su contenido de humedad.

El estudio más completo de las características ópticas de los materiales consiste en determinar la transmitancia, reflectancia y absorptancia en un rango amplio del espectro, tomando en cuenta a la radiación difusa y los efectos de la temperatura y de la humedad.

La transmitancia del material depende de factores como: su estructura (porosidad) y sus propiedades ópticas, el contenido de humedad, el tipo de enlace entre la humedad y la materia seca del material, la longitud de onda, etc.

La transmitancia del producto disminuye al aumentar la longitud de onda y parece seguir un comportamiento acorde con la Ley de Bouguer:

$$I_x = I_0 e^{-sx} \quad \dots\dots (4.1)$$

donde: $S = S' + K$ (dispersión más extinción)

También, la transmitancia depende sustancialmente de la porosidad del material y al aumentar el espesor de la muestra no sólo disminuye su transmitancia sino que además aumenta la reflectancia. Se supone, además, que las propiedades ópticas del material son constantes en un rango considerado de longitudes de onda.

W. Koch en su tratado sobre la absorción de materiales, demostró que, mientras la absorción de rayos infrarrojos dió como resultado únicamente oscilaciones o rotaciones de grupos atómicos, la absorción de rayos de luz visible dió como resultado cambios más bruscos, lo cual se traduce en la desunión de electrones de los grupos de átomos, y que la radiación ultravioleta causa transformaciones de las moléculas de átomos. En varios procesos, la

unión de rayos luminosos e infrarrojos dan resultados muy satisfactorios en su aplicación (aumenta la transmitancia de gruesas - capas de material húmedo).

Por otra parte, la energía radiante suministrada nivela a moléculas en cuerpos sólidos dependiendo de la energía que nivela a la capa de electrones de los átomos y de los movimientos de oscilación y rotación de átomos dentro de moléculas, además, cambia la condición energética de las moléculas, y llega a ser transformada en calor.

De acuerdo a la teoría de J. Leconte, en materiales de origen botánico (vegetales, frutas), así como en el agua y en la grasa, la acción de rayos infrarrojos contribuye al cambio en la estructura del cuerpo y la disposición direccional (orientación) de las cadenas moleculares.

M. Deribere presentó una hipótesis análoga en el reacomodo de moléculas localizadas en las capas superficiales del cuerpo, y en la formación de una estructura específica que facilita un intenso precalentamiento del cuerpo (probablemente por medios de conducción).

Dependiendo de las propiedades del material tratado, y la temperatura del radiador (que depende de la longitud de onda), los rayos infrarrojos pueden ser capaces de penetrar en el fondo del

material. Al incrementar la temperatura del radiador, la longitud de onda disminuye y para muchos materiales la profundidad de penetración se incrementa.

La profundidad de penetración de los rayos infrarrojos de onda corta alcanza en ciertos productos alimenticios de unos 7 a 30 mm. Es importante tomar en cuenta no sólo la máxima profundidad de penetración, sino también la cantidad de energía radiante que alcanza esta profundidad. Observaciones hechas revelan que aunque la cantidad de energía penetrante hasta una profundidad de 7 mm o más, fue comparativamente pequeña, en vista de la alta densidad del flujo de energía, la temperatura de la superficie del material posiciona a la distancia del radiador por encima de ella, cuya temperatura se incrementa mucho más intensamente que en el calentamiento convectivo.

Para calcular la energía necesaria en el proceso de radiación se deben considerar los siguientes factores:

- a) La eficiencia del radiador se ve afectada por la absorción y la transmitancia del producto.
- b) La penetración de la radiación depende de los coeficientes de absorción (o extinción) y de dispersión.
- c) Resulta de la mayor importancia el papel de la reflexión selectiva de los productos.

Y el decaimiento de la intensidad de la radiación esté dado - también por la Ley de Bouguer, mencionada anteriormente:

$$I_x = I_0 e^{-sx} \quad \dots\dots(4.2)$$

donde $S = S' + K$

Evidentemente, el calentamiento por rayos infrarrojos tiene - sus características específicas propias, relacionadas no sólo con la penetración de los rayos dentro del material, sino también con un efecto profundo en la estructura molecular del material. Cuando la frecuencia de radiación incidente es cercana al valor de la frecuencia de oscilaciones naturales de los átomos (la resonancia), entonces, la amplitud de las vibraciones producidas en los átomos se incrementa. Al mismo tiempo la absorción se incrementa.

La radiación infrarroja tiene un efecto también sobre las características de intercambio de calor y masa del material tratado. Cuando se sujeta un material grueso a la radiación infrarroja, - los gradientes de temperatura obtenidos son muy grandes a diferencia del secado ordinario por convección (50-250°C/cm). El flujo - de humedad transporta una cierta cantidad de calor en el fondo - del material, y esto intensifica el intercambio de calor interno. La zona de evaporación generalmente es de profundidad descendiente, y se localiza en la zona de máxima temperatura del material.

Los materiales porosos, tratados por radiación infrarroja, - tienen un intercambio de calor convectivo externo, y sus perfiles de temperatura y humedad se ven afectados por los fenómenos asociados con la circulación de aire y flujo de vapor en los tubos - capilares (como la termodifusión^A relativa, el calor deslizante y la efusión^{AA}). Bajo la termodifusión relativa, el aire, que es un gas de alto peso molecular (cerca de 29) vira en la dirección del flujo de calor (hacia el interior del material), mientras que el vapor de agua (con peso molecular de 18) se mueve desde las capas internas de la zona de evaporación hacia la superficie del cuerpo, y de ahí al medio circundante.

El perfil de temperatura de un material sujeto a la radiación infrarroja depende de la transmitancia del material, grosor, temperatura y rapidez del flujo de aire dentro de la cámara de trabajo.

^A Termodifusión es un fenómeno de difusión de masa que se produce en el seno de un gas cuando existe un gradiente de temperatura.

^{AA} Efusión es la salida de gases a través de aberturas pequeñas. Cuando dos gases se mezclan a través de un orificio estrecho, se cumple la relación:

$$\frac{v_1}{v_2} = \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2}}$$

que indica que los volúmenes mezclados son inversamente proporcionales a la raíz cuadrada de las densidades o a la raíz cuadrada de las masas moleculares. Esta propiedad sirve para medir densidades relativas de gases.

Tanto el secado convencional como el infrarrojo de materiales húmedos procede en dos etapas. En la primera etapa, cuando la temperatura del medio es más baja que la temperatura de la superficie del material, al incrementarse la rapidez del aire circundante del material cause un descenso en la rapidez de secado debido a la gran intensidad de calor transferido desde la superficie del material. El carácter de las curvas de secado para la segunda etapa depende de las propiedades y dimensiones del material, y también de las condiciones del tratamiento.

El efecto de secado se incrementa por la aplicación de secado intermitente, y también, por el método combinado radiación-convección. En muchos casos el tratamiento por radiación intermitente es benéfico tanto con respecto al descenso de duración del proceso y la cantidad de energía requerida, como en el mejoramiento de la calidad de productos, particularmente en el secado de materiales sensibles al calor denso.

La temperatura óptima del aire depende de las propiedades del material, así como también en la transmitancia del material y sus dimensiones.

Particularmente, es de grandes beneficios, la aplicación de radiación infrarroja para el secado de materiales inertes-húmedos.

como cuando el proceso de secado está limitado por el intercambio interno de masa.

En semejantes casos la intensificación del recalentado del material ayudará a incrementar el coeficiente de difusión-húmeda dentro del material. Es de gran interés la aplicación de la radiación infrarroja en la primera etapa de secado, cuando la temperatura del material es comparativamente baja, y la intensidad de intercambio de calor radiante alcanza su máximo.

En la selección de condiciones para el tratamiento por radiación, es importante considerar las propiedades específicas de los materiales. W. Jubitz demostró que es necesario bajar la energía para ciertos productos alimenticios (frutas, vegetales, papas, granos, leche) a fin de conservar sus valores biológicos (vitaminas, enzimas, etc.), y esto interactúa con la prolongación de la duración del proceso.

Evidentemente, para tales productos, es benéfico aplicar los métodos combinados de tratamiento, y en particular, el secado por radiación-convección intermitente. La aplicación de la radiación infrarroja es de gran efectividad para procesos de alta temperatura, como los que hornean pasteles y pan, secado de

bizcochos, tostado de café y semillas de cacao, curado de pescado, etc.

El efecto de los rayos infrarrojos en insectos dañinos presentes en la capa superficial del grano es también de gran interés. Unos 50 segundos es un tiempo adecuado para llevar a cabo una desinfección satisfactoria de la capa del grano, sin sobrecalentamiento.

En el estudio de horneado de pan por rayos infrarrojos, llevado a cabo por A.S. Ginzburg, se observó que los poros de pan horneado con radiación por lámparas reflectoras (con una temperatura del radiador de cerca de 2500°K) fueron pequeños, y las paredes porosas fueron escasas a diferencia del pan horneado en condiciones ordinarias.

En estudios del tostado de semilla de cacao, algunos investigadores encontraron que la cantidad requerida para la molienda de semillas las cuales fueron calentadas por rayos infrarrojos es muy pequeña que para semillas tostadas en "tostadores convencionales".

En cada caso individual, cuando se selecciona de una manera racional las condiciones para secado y tratamiento térmico por rayos infrarrojos, se debe hacer un informe de la tecnología básica, óptica y las características de intercambio de masa del producto.

4.2 DIVERSOS TIPOS DE RADIADORES

La eficiencia del calentamiento y del secado, dependen de la intensidad de la radiación que se intercambie entre la fuente y el material.

Los factores principales que determinan a la intensidad de radiación son:

- Distribución espectral, dependiente de la temperatura.
- Propiedades ópticas y termofísicas de los materiales.
- Geometría de los sistemas en juego.
- Características físicas del medio entre la fuente y el material.

Los generadores de radiación se clasifican de acuerdo con:

a) La longitud de onda que corresponde a la máxima radiación:

- Radiador claro (onda corta), $T \approx 1500$ a 1800°C

$$\lambda_{\text{máx}} \leq 1.3 \mu$$

- Radiador oscuro (onda larga), $T \approx 350$ a 400°C

$$\lambda_{\text{máx}} > 1.3 \mu$$

b) El método de calentamiento:

- Eléctrico
- De gas

Los generadores eléctricos generalmente incluyen lámparas incandescentes infrarrojas de reflexión, tubos de cuarzo (radiadores claros) o elementos de resistencia eléctrica (radiadores oscuros).

Los generadores de gas pueden disponer de elementos impermeables al gas, calentados por dentro mediante la combustión del gas, o bien, pueden contar con superficies metálicas perforadas, o de materiales cerámicos permeables a través de los cuales se efectúa la combustión sin flama del gas. Generalmente los generadores de gas se consideran como oscuros.

Los requisitos que debe cumplir un generador de radiación infrarroja son:

- Estabilidad de la distribución espectral de la intensidad, una vez así seleccionada.
- Máxima uniformidad posible de la radiación sobre el material de interés. Esto se logra generalmente con una adecuada distribución de generadores.
- Máxima posible vida útil del generador.

- Mínima inercia térmica.
- Resistencia a la abrasión* causada por la humedad y productos químicos.
- Máxima eficiencia en cuanto al manejo de energías.

Para el calentamiento de los radiadores que trabajan con gas, se puede utilizar gas natural, gas licuado, etc. En un tipo de radiadores la superficie calefactora se calienta por el lado posterior mediante pequeños chorros de gas caliente provenientes de sendos quemadores, o mediante los gases calientes provenientes de un quemador central grande. La superficie puede alcanzar temperaturas de 300 a 500°C, correspondientes a una $\lambda_{\text{máx}}$ de 4μ . El método se utiliza ampliamente en los hornos de panadería. En un segundo tipo de radiadores, la superficie radiante está hecha de placas de cerámica porosa y en su interior se efectúa la combustión sin flama del gas. La superficie puede alcanzar temperaturas de 850 a 900°C que corresponden a $\lambda_{\text{máx}} = 2 \mu$. Estos constituyen buenos prospectos para radiadores oscuros infrarrojos.

El radiador de cerámica porosa utiliza gas a presión baja con un quemador de inyección atmosférica como el que se muestra esquemáticamente en la Figura 4.1.

* Abrasión es las diversas formas de desgaste, natural o provocado, que experimentan en general todos los materiales sometidos a la acción de partículas de otros cuerpos. Este desgaste no debe confundirse con el que se produce por el rozamiento o frotamiento entre dos cuerpos, como ocurre por ejemplo en los cojinetes de rozamientos.

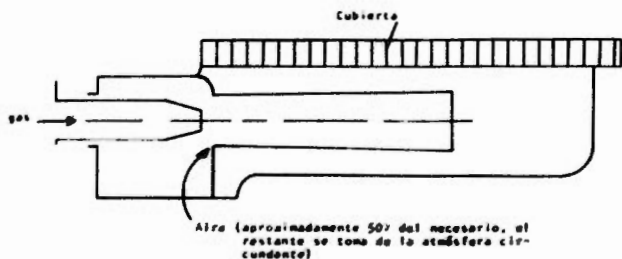


FIGURA 4.1

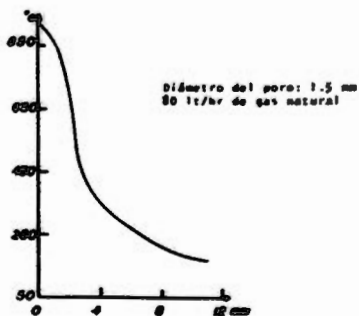


FIGURA 4.2

Aumentando el aire inyectado, disminuye la flama y aumenta la temperatura, pudiéndose en un extremo, interrumpir la estabilidad de la flama.

Para gastos de la mezcla aire-gas muy pequeños se corre el riesgo de que la flama se introduzca a la cámara de mezclado.

Se han estado desarrollando nuevos sistemas (como el llamado "combustión de superficie") en los que todo el aire necesario para la combustión se inyecta (tal es el caso en realidad del esquema dibujado anteriormente).

La mezcla aire-gas entra a la cámara distribuidora a una presión manométrica de 250 a 500 mm de agua.

La combustión de la mezcla se efectúa en una delgada capa sobre la superficie exterior de las placas de cerámica, una vez que dicha mezcla ha sido empujada a través de las placas. Las temperaturas que se pueden alcanzar en esa película (800-900°C) se logran muy rápidamente (40 a 50 segundos). El calentamiento de las placas de cerámica permite el precalentamiento de la mezcla conforme ésta pase a través de las placas, evitando así la discontinuidad de la flama.

Por otro lado, el diámetro de los poros de las placas es menor que un determinado valor crítico, con objeto de eliminar la

posibilidad del paso de la flama a la cámara de mezcla.

La baja conductividad térmica de las placas a su vez permite mantener baja la temperatura de la superficie interna y evita por lo tanto, una eventual ignición prematura de la mezcla.

Algunos experimentos indican datos como:

- Distribución de temperaturas a lo largo del espesor de las placas de cerámica que se muestra en la Figuras 4.2 y 4.3.

Las dimensiones de las placas de cerámica fueron: 69 x 47 x 14 mm.

- Espectros típicos de prototipos de quemadores que se ven en la Figura 4.4.

Con objeto de asegurar el adecuado funcionamiento del quemador (no pre-ignición, etc.), se deben de observar las condiciones de combustión pre-establecidas para cada caso.

Los resultados experimentales parecen indicar las ventajas económicas de los radiadores de combustión por inyección comparados con los eléctricos, de ahí que no tratemos con detalle los radiadores eléctricos.

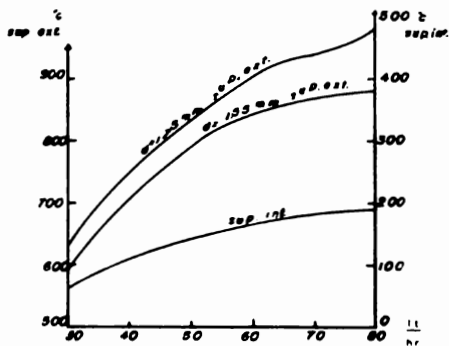


FIGURA 4.3

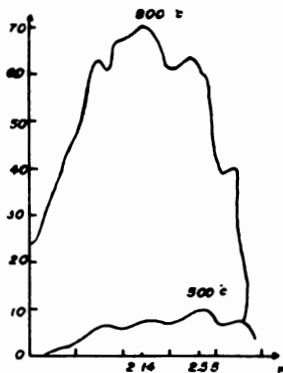


FIGURA 4.4

4.3 EL USO DE RADIADORES DE COMBUSTION PARA EL SECADO DE CAFE

Ya a nivel industrial, se podría pensar en un sistema de secado por medio de radiadores de combustión, pues el factor determinante en su uso es el económico en comparación con los radiadores eléctricos cuya energía es demasiado costosa.

Además, se ha pensado en poder aprovechar la pulpa del fruto de café cuya descomposición nos puede producir gas con una riqueza del 55% de gas metano aproximadamente, este gas puede ser conducido a los quemadores infrarrojos que a su vez van a producir la energía necesaria para el secado del café.

Una de las ventajas al adaptar a nivel industrial el secado de café por radiación infrarroja sería el expulsar la humedad de la cámara de trabajo por aire mediante convección natural (cuyo coeficiente de transferencia de calor por convección varía hasta $25 \text{ W/m}^2\text{°C}$), esto traería por consecuencia el necesitar una menor energía los radiadores de combustión y por lo tanto menos gasto económico para el secado de café, ya que el expulsar la humedad por aire mediante convección forzada (cuyo coeficiente de transferencia de calor por convección puede variar de 25 a $500 \text{ W/m}^2\text{°C}$) ocasionaría un aumento considerable de pérdida de energía, lo que implica que los radiadores de combustión suministren más energía. Para verificar si podemos usar aire en convección natural para expulsar la humedad se presenta el modelo matemático en base al

bosquejo de la Figura 4.5 que muestra una forma en que se puede encontrar el café para su secado mediante radiación infrarroja; - con el propósito de hallar una velocidad u a partir del valor conocido de $h = 3 \text{ w/m}^2\text{°C}$ hallado en nuestros experimentos, para calcular el Δp en función de R y poder conocer este valor máximo tolerable al igualar con la Δp máxima obtenible de $\Delta p = L \Delta p$, y así, si el valor de R calculado se encuentra en un intervalo apropiado podremos usar aire en convección natural para expulsar la humedad.

Un bosquejo de la forma en que puede estar el café para su secado sería como el de la Figura 4.5.

Donde:

T = temperatura

$$T_1 < T_2$$

$$\Delta p = \rho_1 - \rho_2 \text{ (incremento de densidad) ... (4.3)}$$

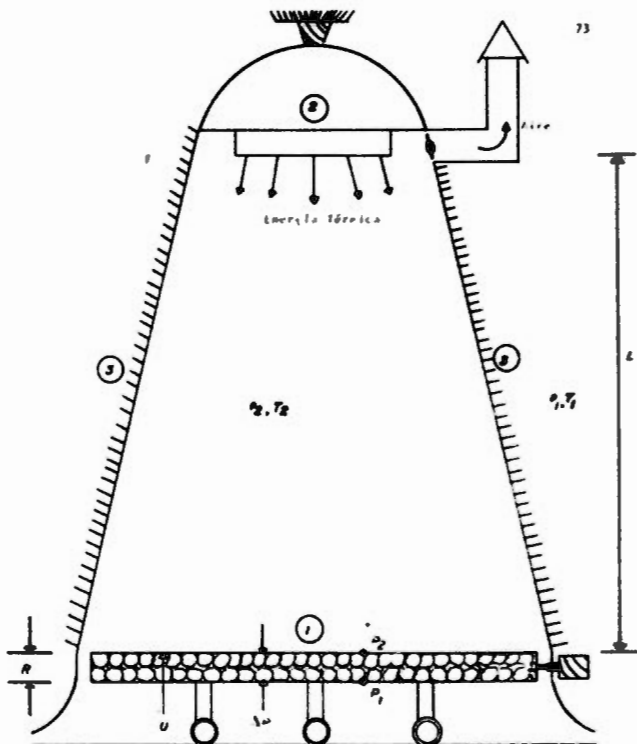
$$\Delta p = L \Delta p \text{ (incremento de presión) ... (4.4)}$$

1 = Camada de café

2 = Sistema de quemadores infrarrojos

3 = Pared de aluminio pulido o acero inoxidable aislado térmicamente.

Sea u la velocidad del aire a la entrada del sistema tal que $\Delta p = \rho_1 - \rho_2$ que cumpla las condiciones de equilibrio hidrodinámico a T_1 y T_2 constantes.



Para continuar con el análisis introduciremos una nueva definición que es la de esfericidad (ψ):

$$\psi = \frac{\text{Área superficial de una esfera de igual volumen al de un grano}}{\text{Área superficial de un grano}}$$

Entonces hay que:

- Obtener el volumen de un grano medio (V)
- Obtener un diámetro equivalente (D_e) tal que

$$V = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{D_e}{2} \right)^3 \quad \dots\dots\dots(4.5)$$

De aquí despejamos D_e con V conocido.

- Ahora ya podemos calcular la esfericidad como sigue:

$$\psi = \frac{4 \pi (D_e/2)^2}{A_{\text{medida}}} \quad \dots\dots\dots(4.6)$$

Una forma de hallar el área superficial y el volumen del grano es tomarlo como un elipsoide.

Otra forma de hallar el área superficial del grano es recortar pequeños cuadritos de $5 \times 5 \text{ mm}^2$ y pegarlos a través de toda la superficie del grano, haciendo esto a varios granos el área varía de 2.25 a 2.75 cm^2 aproximadamente.

De la Figura B-12 (p. 537), Apéndice B de la referencia 7 - hallamos valores de ψ (esfericidad) contra θ (porosidad), a continuación se muestran algunos valores:

ψ	θ porosidad (empaquetamiento normal)
1	0.38
0.9	0.40
0.8	0.46
0.7	0.50
0.6	0.55
0.5	0.61
0.4	0.70

Hallamos el valor de porosidad (θ) correspondiente y los sustituimos en la ecuación 22.86 de la referencia 7 para poder conocer por otro lado el Δp :

$$= \frac{\Delta p}{R} \cdot g_c \cdot \frac{D_p}{\rho u^2} \cdot \frac{\theta^3}{(1-\theta)} = 150 \frac{(1-\theta)}{Re} + 1.75 \quad \dots (4.7)$$

Donde:

Δp = caída de presión [lb/ft²]

R = altura de la cama [ft]

D_p = diámetro equivalente de la partícula [ft]

ρ = densidad del fluido [lb/ft³]

u = velocidad del flujo [ft/s]

$$g_c = \text{factor de conversión} = 32.2 \quad (\text{lb/lb}_f)(\text{ft/s}^2)$$

$$\phi = \text{porosidad adimensional}$$

$$Re = \frac{D_p u \rho}{\mu} \quad \dots\dots\dots(4.8)$$

ρ y μ se evalúan a temperatura media del flujo.

Para hallar la velocidad u , podemos obtenerla a partir del valor conocido de $h = 3 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$ (calculado en el apéndice C) hallado en nuestros experimentos mediante convección natural con la ayuda de las ecuaciones que nos dan coeficientes de transferencia de calor por convección forzada a través de camas empacadas (estrictamente debían ser ecuaciones que nos dieran estos coeficientes por convección libre pero no existen, de ahí que las utilizemos en convección forzada):

$$j_H = 0.91 Re^{-0.51} \psi \quad (Re < 50) \quad \dots\dots\dots(4.9)$$

$$j_H = 0.61 Re^{-0.41} \psi \quad (Re > 50) \quad \dots\dots\dots(4.10)$$

donde:

$$j_H = \frac{h}{C_p f \rho u} \left(\frac{C_p \mu}{k} \right)^{2/3} f \quad \dots\dots\dots(4.11)$$

$$Re = \frac{\rho u}{a \mu f \psi} \quad \dots\dots\dots(4.12)$$

el subíndice f denota propiedades evaluadas a una temperatura media.

a = área superficial de las partículas sólidas por unidad de volumen de la cama

ψ esfera = 1

Estas ecuaciones son desde la (13.4-2) hasta la (13.4-5) de -

referencia 8.

De la ecuación 4.7 se puede obtener la Δp en función de R e igualar con la Δp máxima tolerable ($\Delta p = L \Delta p$) para hallar la máxima R tolerable. Si el valor de R no se encuentra en un intervalo apropiado, usaremos aire en convección forzada (mediante un ventilador) para expulsar la humedad de la cámara de trabajo.

Es importante decir que la R no puede ser mayor de 4 cm (dato tomado del secado solar del café), así como también el aire es totalmente translúcido a la radiación infrarroja.

Por lo tanto, la velocidad $u = f(T_1, T_2) = f(\Delta p_{\text{aire}}, L)$.

El sistema también llevará un aditamento que haga mover continuamente nuestra cama de café tal que el proceso sea intermitente, este se muestra a la derecha junto a la camada en el esquema.

Para calcular el intercambio de calor entre la fuente y la cama de café, el factor de forma considerando a éstas como dos discos planos circulares directamente opuestos como en la Figura 4.6 está dado por:

$$\eta = r_2/d, \quad \xi = d/r_1$$

$$x = 1 + (1 + \eta^2) \xi^2$$

$$F_{12} = \frac{1}{2} (x - \sqrt{x^2 - 4 \eta^2 \xi^2}) \quad \dots\dots\dots (4.13)$$

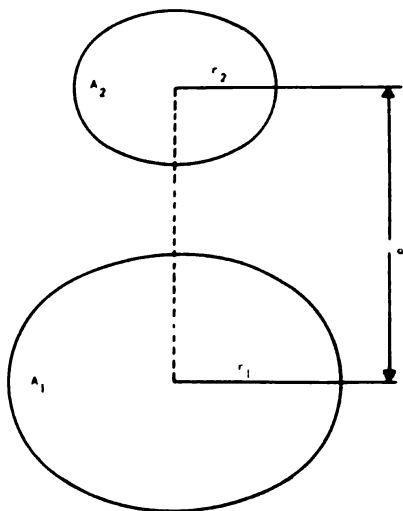


FIGURA 4.6

$$\text{Del teorema de reciprocidad } A_1 F_{12} = A_2 F_{21} \quad \dots\dots\dots(4.14)$$

podemos encontrar F_{21} , y con respecto al área envolvente (A_3) para hallar los demás factores de forma se utiliza la ecuación:

$$F_{11} + F_{12} + \dots + F_{1n} \quad \dots\dots\dots(4.15)$$

y así poder conocer la interacción de las tres superficies.

La energía que llegará a la cámara de café será igual:

$$q_{r1} = q_{r2-1} + q_{r3-1} \quad \dots\dots\dots(4.16)$$

donde q_{r3-1} se pueda hallar del q_{r2-3} con el respectivo factor de forma,

igualmente la energía que emitirá el café q'_{r1} será igual a:

$$q'_{r1} = q_{r1-2} + q_{r1-3} \quad \dots\dots\dots(4.17)$$

y en general:

$$q_{r1-n} = A_{r1} F_{1n} \sigma T_1^4 \epsilon_1 \quad \dots\dots\dots(4.18)$$

A_{r1} = Área radiante del cuerpo 1.

En este bosquejo dibujado tenemos que:

$$F_{11} = F_{22} = 0 \quad (\text{pues no se "ven" los cuerpos 1 y 2 ellos mismos}).$$

La base donde irá la camada puede ser simplemente alambrada - para permitir el paso de aire.

,

CAPITULO 5

EXPERIMENTOS Y SUS RESULTADOS PARA LA MEDICION DE PROPIEDADES DE RADIACION DEL CAFE

En el presente Capitulo se describen los experimentos realizados para conocer el valor de la emitancia del café, mostrando los resultados generales obtenidos, asimismo, se describe en forma breve el aparato donde se llevaron a cabo tales experimentos y diversos instrumentos usados para detectar a la radiación térmica, lo cual este último es un resumen de la Referencia 4.

5.1 NECESIDAD DE MEDICIONES

Como hemos visto anteriormente el conocer las propiedades ópticas del material a tratar por radiación térmica infrarroja es de vital importancia. Así como también, el conocer la potencia emisiva que es capaz de emitir el café en su respectivo balance térmico. Esto nos conduce a realizar pruebas de laboratorio de donde podamos saber la emitancia del café que es función de su temperatura y de la pérdida de humedad principalmente, la emitancia medida será global ya que el equipo e instrumentación utilizados no permiten determinarla en función de la longitud de onda ni del ángulo de incidencia.

5.2 DESCRIPCION DE DIVERSOS APARATOS E INSTRUMENTOS UTILIZADOS EN RADIACION TERMICA

La detección más familiar de radiación infrarroja es indudablemente la sensación de calor inducida por ella cuando choca sobre la piel. Esta forma, sin embargo, no se usa para propósitos de mediciones precisas. Además, en contraste al detectar luz con el ojo, el cual es insuperable en sensibilidad, la piel es relativamente insensible y muestra poca discriminación en la calidad de la radiación.

Los instrumentos usados para la detección de radiación infrarroja se dividen en dos distintos grupos: unos usan el efecto calorífico de la radiación y son conocidos como detectores térmicos y los otros hacen uso de los efectos fotoeléctricos de los quantum y son conocidos como fotodetectores.

Dentro de los detectores térmicos, los radiómetros eran usados para medición y demostraciones en el laboratorio en presencia de calor radiante. El radiómetro consiste de dos o más aspas ligeramente balanceadas sobre un soporte. La radiación incidente sobre una de estas aspas la calienta y por medio de un momentum suplementario aparta de ella a las moléculas de gas cercanas, y así, las aspas tienden a girar. Si el radiómetro se usa para demostración, las aspas pueden girar libremente, pero si se usa para medición, las aspas se suspenden de una fibra de cuarzo.

El siguiente paso en el desarrollo de los detectores térmicos fue el uso del cambio de resistencia eléctrica en función de la temperatura, el elemento térmico consiste en este caso de un fino alambre el cual uno de los brazos se conecta al puente de Wheatstone, el pequeño cambio en resistencia se mide por el desbalanceo de corriente dentro del puente, este instrumento se llamó bolómetro y al tiempo de su introducción se consideró un gran paso alcanzado respecto a sensibilidad. Langley expuso que su invento era algo más que la termopila, el cual debería ser igual de exacto, que significaría ser un "contador" y no un "indicador" de la presencia de radiación débil, o sea, que algo más que un indicador era un medidor de energía radiante. En las décadas siguientes las termopilas fueron también mucho más perfeccionadas y actualmente, la termopila y el bolómetro son grandes competentes respecto a la sensibilidad, lo que ha hecho difícil optar de entre ellos, y permanecen como los detectores térmicos en uso principales.

Los recientes desarrollos dentro de la transición hacia la superconductividad ha facilitado hacer un bolómetro extremadamente sensible.

En principio, cualquier efecto sensible de temperatura puede usarse como la base de un detector térmico.

Un reciente desarrollo interesante del termómetro usa la expansión térmica de un pequeño volumen de gas como elemento sensible. Por medio de un ingenioso sistema electromecánico, se observa el más pequeño movimiento de un diafragma debido al cambio de presión. Este detector, conocido como la celda Golay, es ahora comparable con el termopar y el bolómetro en sensibilidad absoluta. Se han usado otros efectos térmicos, como cambios de constantes dieléctricas con la temperatura, etc.

Un método interesante desarrollado por Czerny con la técnica de evaporación de Sir John Herschel se ha usado para formar directamente fotografías térmicas, y obtener fotografías del espectro de al menos 9μ . Lo interesante en estos métodos está en su habilidad de mostrar las fotografías térmicas directamente, y no se comparan en sensibilidad con el bolómetro o termopila.

Los detectores infrarrojos discutidos hasta ahora dependen para su acción de la potencia calorífica radiante. Claro que esto fue el único efecto físico observable durante los primeros 40 años después de su descubrimiento. Muchas tentativas se hicieron en los primeros días de la fotografía en la historia del espectro infrarrojo fotográfico. Becquerel descubrió otro efecto interesante: la estimulación o limitación por radiación infrarroja de chips fosforescentes, excitadas por medio de luz visible o ultravioleta. Hasta el siglo XX se observaron los efectos fotoeléctricos en el infrarrojo.

La diferencia esencial entre un fotodetector y un detector -
térmico, es que el primero cuenta el número de quantum efectivos
de radiación absorbida, mientras que el otro la respuesta depende
de la energía total absorbida.

5.3 EXPERIMENTOS REALIZADOS

El sistema Scott modelo 9053 en el cual se llevaron a cabo -
los experimentos, permite la medición de radiación y temperatura.
Es todo un laboratorio montado sobre una mesa para el estudio de
todos los aspectos de la transferencia de calor por radiación. La
unidad es lo suficientemente simple para el uso de estudiantes, -
así como, suficientemente sofisticado para trabajos más avanzados
e inclusive la investigación.

El sistema Scott modelo 9053 incluye algunas fuentes de calor
y radiación luminosa, varios tipos de instrumentación, algunos -
dispositivos y controles, todos ellos para usarse en un grupo de
experimentos diseñados para dar una idea clara de los fenómenos -
de radiación y obtener mediciones de temperatura. Los componentes
más importantes están montados permanentemente sobre la mesa, la
cual es móvil. El equipo puede operarse en cualquier lugar que se
cuenta con una alimentación de corriente alterna y 115 volts, y -
una conexión para aire comprimido.

El sistema cuenta con un horno y otras tres fuentes de calor radiante que pueden regularse continuamente desde la temperatura ambiente hasta temperaturas cuyas $\lambda_{m\lambda}$ se encuentran en la banda visible del espectro. Las tres fuentes de calor son de diferente forma geométrica: una de tipo de punto pequeño, una fuente plana (que es la que utilizamos), y un radiador cilíndrico largo. Además, se incluye una lámpara incandescente para medir en la banda visible del espectro.

El tablero de control del aparato consiste de un autotransformador, un voltímetro, un amperímetro y los interruptores apropiados.

El propósito de los experimentos realizados fue determinar la emitancia de la cama de café, cuya muestra se presenta en la Figura 5.1, relativa a un emisor cercano a cuerpo negro.

En este caso, la emitancia será diferente de la absorptancia - debido a que la cama de café nunca se encontrará en equilibrio - térmico.

Los experimentos se realizaron en café tipo arábica, y se vió a través de los experimentos que el café se secó a temperaturas - más altas a diferencia del método convencional, sin interferir de gran manera en el sabor final del café.

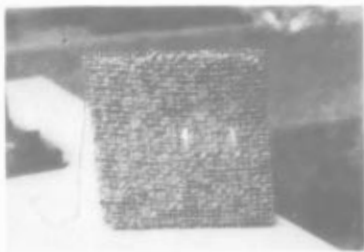


FIGURA 5.1



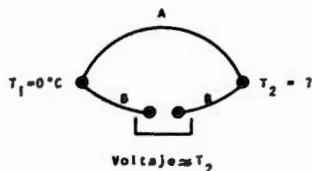
FIGURA 5.2

La emitancia de la superficie depende de las condiciones de la misma, por lo que los experimentos se realizaron en una camada tal que contenga al café en desorden, así simula como se tendría en el proceso real. Este experimento compara a la muestra de café con forma de placa cuadrada respecto a una placa emisora cercana a cuerpo negro de iguales dimensiones.

La preparación de la placa emisora cercana a un cuerpo negro consistió en aplicar un revestimiento de olin fresco a ambas superficies de una placa rayada (quemando estopa con petróleo) y - ponerla inmediatamente frente a la fuente de calor. Luego se colocó la cara de la termopila a una distancia de 4 pulgadas del - emisor (placa negra).

El procedimiento que se siguió para efectuar las pruebas fue el siguiente: se calentó la fuente de calor que se muestra en la Figura 5.2 con un voltaje de entrada de 54 volts y una corriente de 1.5 amperes (35% en el reostato, el cual controla la entrada) constantes a lo largo de toda la prueba.

Posteriormente se dejó que la placa negra llegue al equilibrio térmico, se midió la temperatura de la superficie con un termopar de cromel-alumel referido a 0°C, con lo que contamos con un termo conteniendo agua con hielo del cual sale un termómetro para verificar que efectivamente esté a 0°C, para conectar el termopar debidamente referido se hizo uso del siguiente diagrama:



T_2 = Temperatura que queremos medir
 A y B son diferentes materiales

Asimismo, se leyó el valor del voltaje de la termopila (también referida a 0°C). Para determinar los voltajes respectivos del termopar (existen tablas para efectuar la conversión de voltaje a temperatura para las diferentes combinaciones de metales del termopar) y termopila se cuenta con un multímetro digital que permita obtener hasta milésimas de millivolt. El montaje de la placa negra se puede ver en la Figura 5.3 con todo el equipo utilizado en el experimento.

A continuación, se quitó la placa negra e insertamos la muestra de café cuidando de que la cara de la termopila permaneciera a 4 pulgadas de ella, como se muestra en la Figura 5.4. Al mismo tiempo, se pesó la muestra en la balanza de precisión que se encuentra al fondo de la Figura 5.3.

A partir de aquí, se mantuvo la muestra para su secado frente a la fuente de calor. Para determinar la temperatura de la superficie de la camada se introdujeron termopares de fierro-constanta



FIGURA 5.3

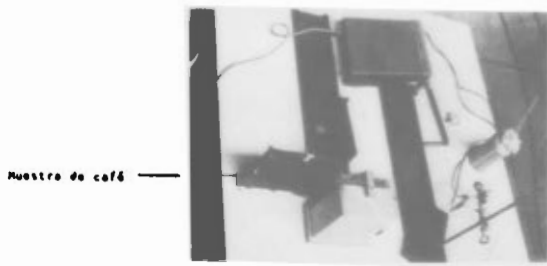


FIGURA 5.4

no a los granos como se indica en la Figura 5.5, estos termopares fueron sumamente delgados con el fin de tener mayor sensibilidad.

El experimento se hizo de una manera intermitente, por ser lo que se tendría en la realidad para una mayor eficiencia de secado, de ahí que cada media hora se tomaron lecturas del termopar, termopila y peso de la muestra antes de voltear de una cara a otra - nuestra camada de café. Primero, se medía la temperatura del grano, luego se procedía a voltear la placa de café para que la termopila captara la energía radiante que estaba emitiendo la misma, esto se hizo cerrando con una placa móvil como se ve en la Figura 5.6 para evitar que al quedar descubierta la fuente de calor su - energía radiante llegara directamente a la termopila.

Ya, totalmente tapada la fuente de calor se procedía a voltear la muestra, sacándola y metiéndola de nuevo horizontalmente como se muestra en la Figura 5.7.

Colocada otra vez la muestra, se volvía a abrir la placa móvil y se tomaba la lectura de la termopila máxima, midiendo a la vez el tiempo (con un cronómetro) que se tardaba en voltear la muestra para ajustar el valor correspondiente de la termopila a la temperatura medida anteriormente, ya que el café inmediatamente se empieza a enfriar cuando no está recibiendo energía radiante. Esto se puede ver en la Figura 5.8.

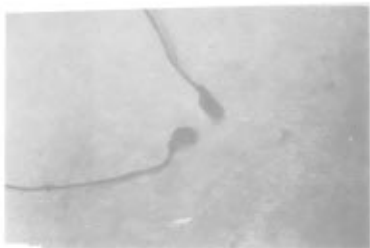


FIGURA 5.1



FIGURA 5.2



FIGURA 5.3

El tiempo que se tardaba en voltear la muestra de la fuente - hacia la cara de la termopila era de 10 a 15 segundos, tiempo en el cual ya habfa sufrido un enfriamiento la muestra, por lo que - se vió que al poner la muestra frente a la cara de la termopila, ésta tenfa durante los primeros 30 segundos un decaimiento lineal debido al enfriamiento de la muestra con una rapidez de 0.020 mV cada 5 segundos (0.004mV/s), de ahí que en cada medición de la - termopila se le sumara 0.060 mV aproximadamente a cada una de - ellas.

Posteriormente, se procedfa nuevamente a sacar la muestra y - pesarla para volver a ponerla en esa misma posición otra media hora, y así sucesivamente se hizo toda esta operación hasta que el café dió un peso constante.

El experimento se realizó durante dos días, en lapsos de 8 horas cada día.

También se necesitaba conocer la temperatura ambiente para lo cual se utilizaba un psicrómetro de bulbo, el cual sirve para conocer la temperatura de bulbo húmedo y la temperatura de bulbo seco que es la que se necesitaba, para hacer las mediciones se concretaba uno a girar el psicrómetro, esto se efectuaba inmediatamente después de haber tomado lectura del peso de café cada media hora.

El cálculo de la emitancia del café a partir de los datos experimentales hallados es de acuerdo a la ley de Prevost que dice que:

$$E = \sigma \epsilon A_r (T_{\text{placa}}^4 - T_{\text{amb}}^4) \sim V_T \quad \dots\dots\dots(5.1)$$

donde:

V_T = voltaje de la termopila

ϵ = emitancia de la placa

T_{placa} = temperatura de la placa

T_{amb} = temperatura del ambiente

Al comparar la placa de café con la placa rayada negra seleccionada como estándar de iguales áreas se tiene:

$$\frac{V_c}{V_{p.n.}} \approx \frac{E_c}{E_{p.n.}} = \frac{\epsilon_c (T_c^4 - T_{\text{amb}}^4)}{\epsilon_{p.n.} (T_{p.n.}^4 - T_{\text{amb}}^4)} \quad \dots\dots\dots(5.2)$$

donde:

$V_{p.n.}$ = voltaje de la termopila correspondiente a la placa rayada negra

V_c = voltaje de la termopila correspondiente a la placa de café bajo prueba

$\epsilon_{p.n.} \approx 0.95$ para la placa negra

ϵ_c = emitancia de la placa bajo prueba de café.

Entonces, para hallar la emitancia ϵ_c se tiene:

$$\epsilon_c = \frac{V_c}{V_{p.n.}} \epsilon_{p.n.} \frac{(T_{p.n.}^4 - T_{\text{amb}}^4)}{(T_c^4 - T_{\text{amb}}^4)} \quad \dots\dots\dots(5.3)$$

5.4 RESULTADOS EXPERIMENTALES

Debido a que se pasaba el café con toda la atmósfera a todos los datos tomados se les deba de restar el peso de ella que fue de 75.3 gr.

Los datos de referencia, o sea, los de la placa negra fueron:

$$V_{p.n.} = 2.942 \text{ mV}$$

$$T_{p.n.} = 71.25^{\circ}\text{C} = 344.25^{\circ}\text{K} (2.907 \text{ mV})$$

cuyos datos son constantes a través de todos los resultados.

El peso inicial de la muestra fue de $P_0 = 439.1$ gr. que restando los 75.3 gr nos queda $m_0 = 363.8$ gr.

A continuación, se ilustrarán los datos tomados el día jueves 28 de junio de 1979 tal como fueron leídos.

NO.	HORA	T _{bs} °C	T _{bm} °C	TERMOFAN mV	TERMOPILA mV	PESO gr
1	9:20	19	14.5	2.36	0.327	431
2	9:55	19.5	14.5	2.91	0.468	419.2
3	10:30	19.5	15	3.00	0.583	411.4
4	11:00	20	15.1	3.052	0.593	402.8
5	11:30	20.3	15.3	3.070	0.626	396
6	12:05	20.6	15.6	3.093	0.645	386.8
7	12:35	21	16	3.150	0.665	377.2
8	13:05	21.5	16	3.162	0.732	371.1
9	13:40	21.7	16	3.195	0.794	361.6
10	14:10	21.7	15.8	3.170	0.783	355.9
11	14:45	21.4	16	3.220	0.815	348.2
12	15:20	21.3	16	3.345	0.870	339.2
13	15:50	22	15.6	3.450	0.922	334.8
14	16:20	20.5	16.5	3.490	0.965	328
15	16:50	20.5	17	3.284	0.951	324
16	17:20	20	17	3.430	1.070	319.1

Y los datos tomados el día 12 de julio de 1979, continuación
de los anteriores fueron:

no.	HORA	T _{as} °C	T _{bn} °C	TERMOPIR mV	TERMOPILA mV	PESO gr
17	9:07	19	14.5	3.615	0.754	314
18	9:43	19.5	14.5	3.701	0.876	307.1
19	10:20	20.2	15.2	3.680	1.059	300.5
20	10:56	21	15.3	3.860	1.169	294.3
21	11:30	21.4	15.3	4.340	1.338	287.9
22	12:05	21.6	15.4	4.355	1.374	281.9
23	12:40	21.5	15	4.458	1.987	277.1
24	13:13	21.6	15.1	3.905	1.463	272.4
25	13:45	21.7	15.5	3.940	1.676	268.4
26	14:20	22	16	3.940	1.809	264.5
27	14:53	21.9	15	4.430	1.941	261.5
28	15:27	21.9	14.9	5.121	2.171	258.9
29	16:00	22	15.3	4.836	2.164	255.9
30	16:33	22.2	15.1	4.923	2.231	254.3
31	17:05	22.7	16	4.715	2.338	254.2

Igualmente en este día se tomaron datos de como variaba la temperatura en función del tiempo minuto a minuto durante la segunda media hora de los experimentos, cuyos datos fueron:

TIEMPO	mV TERMOPAR
9:13	1.692
9:14	2.059
9:15	2.350
9:16	2.556
9:17	2.734
9:18	2.867
9:19	2.977
9:20	3.069
9:21	3.140
9:22	3.199
9:23	3.251
9:24	3.302
9:25	3.341
9:26	3.379
9:27	3.412
9:28	3.439
9:29	3.464
9:30	3.489
9:31	3.510
9:32	3.533
9:33	3.542
9:34	3.550
9:35	3.568
9:36	3.592
9:37	3.610
9:38	3.615
9:39	3.643
9:40	3.662
9:41	3.684
9:42	3.701

Haciendo las conversiones de los termopares, hallando la emittancia del café y definiendo a:

$$x_{bh} = \frac{Z}{m_{cs} + Z} \times 100 \%$$

$$x_{bs} = \frac{Z}{m_{cs}} \times 100 \%$$

donde:

x_{bh} = humedad en base húmeda en %.

x_{bs} = humedad en base seca en %.

Z = diferencia de peso = $m_{\text{actual}} - m_{cs}$

m_{cs} = masa del café seco.

Se presentan los resultados de los experimentos realizados -
utilizando la x_{bh} para ver la pérdida de humedad del café en su -
proceso de secado.

Tabla con los resultados finales de la prueba realizada con una única muestra los días 28 de junio y 12 de julio (ésta como continuación).

No.	Tiempo hr	Tba °K	Temp. Grano °K	V Termopila mV	Peso gr	Z Dif. peso gr	r	X base húmeda Z	t min	T grano °C
1	0.5	292	318.8	0.387	355.7	176.8	0.276	49.70	0	33
2	1	292.5	329.2	0.528	343.9	165	0.258	47.97	1	40
3	1.5	292.5	330.8	0.643	336.1	157.2	0.299	46.77	2	45.6
4	2	293	331.8	0.653	327.5	148.6	0.295	45.37	3	49.4
5	2.5	293.3	332.2	0.686	320.7	141.8	0.307	44.21	4	53
6	3	293.6	332.6	0.705	311.5	132.6	0.313	42.56	5	55.2
7	3.5	294	333.6	0.725	301.9	123	0.313	40.74	6	57.2
8	4	294.5	333.83	0.792	295.8	116.9	0.340	39.51	7	59.2
9	4.5	294.7	334.5	0.804	286.3	107.4	0.338	37.51	8	60.5
10	5	294.7	334	0.843	280.6	101.7	0.360	36.24	9	61.4
11	5.5	294.4	335	0.875	272.9	94	0.362	34.44	10	62.6
12	6	294.3	337.3	0.930	263.9	85	0.360	32.20	11	63.6
13	6.5	295	339.3	0.982	259.5	80.6	0.364	31.05	12	64.2
14	7	293.5	340	1.025	252.7	73.8	0.368	29.20	13	65
15	7.5	293.5	336.3	1.011	248.7	69.8	0.423	28.06	14	65.6
16	8	293	339	1.090	243.8	64.9	0.401	26.62	15	66.16
17	8.5	292	342.2	0.816	238.7	59.8	0.276	25.05	16	66.5
18	9	292.5	344	0.936	231.8	52.9	0.304	22.82	17	67
19	9.5	293.2	343.6	1.119	225.2	46.3	0.366	20.55	18	67.4
20	10	294	347	1.229	219	40.1	0.37	18.31	19	67.84
21	10.5	294.4	355.83	1.388	212.6	33.7	0.343	15.85	20	68
22	11	294.6	356	1.434	206.6	27.7	0.352	13.40	21	68.16
23	11.5	294.5	358	1.567	201.8	22.9	0.370	11.34	22	68.5
24	12	294.6	347.6	1.523	197.1	18.2	0.453	9.23	23	68.85
25	12.5	294.7	348.4	1.736	193.1	14.2	0.506	7.35	24	69.2
26	13	295	349.4	1.869	189.2	10.3	0.532	5.44	25	69.3
27	13.5	294.9	357.33	2.001	186.2	7.3	0.478	3.92	26	69.8
28	14	294.9	370.33	2.231	183.6	4.7	0.414	2.55	27	70.2
29	14.5	295	365	2.224	180.6	1.7	0.456	0.94	28	70.7
30	15	295.2	366.6	2.291	178.9	0	0.455	0	29	71
31	15.5	295.7	362.74	2.398	178.9	0	0.511	0		

Tref = 344.25°K

NOTAS: Vref (placa negra) = 2.942 mV, Datos del 1-16 fueron tomados el 28 de junio
 Mx (masa vol. se o) = 178.9 gr, Datos del 17-31 fueron tomados el 12 de julio
 Mo = 363.8 gr, Zo = 184.9 gr, Xcho = 50.822

Para visualizar más estos resultados, los presentaremos en forma gráfica, siendo nuestra variable independiente más importante el tiempo.

En primer lugar tenemos la variación de la temperatura del grano minuto a minuto en la Figura 5.9, la cual únicamente nos indica como es el aumento de temperatura tan súbito en los primeros instantes en que el café es expuesto a la radiación térmica infrarroja lo que no sucede en la convección térmica. Además, si el proceso fuera continuo la variación de temperatura en función del tiempo sería una ley exponencial, pero debido a que es intermitente lo que mejor se ajusta es una recta de acuerdo a los datos experimentales presentados.

En la Figura 5.10 se muestra la variación de la temperatura del grano en función del tiempo cada media hora (1/2 hora una cara y otra 1/2 hora la otra cara), que como hemos dicho esta curva se puede tomar como un promedio de la temperatura de los granos de café en el proceso intermitente.

Debido a que en la primera parte de los experimentos los resultados son más regulares y semejan a una recta, ajustaremos una recta a ellos de temperatura contra tiempo:

t hr	T $^{\circ}\text{C}$	t^2	tT
1.5	57.8	2.25	86.7
2	58.8	4	117.6
2.5	59.2	6.25	148
3	59.6	9	178.8
3.5	60.6	12.25	212.1
4	60.83	16	243.32
4.5	61.5	20.25	276.75
5	61	25	305
5.5	62	30.25	341
6	64.3	36	385.8
6.5	66.3	42.25	430.95
7	67	49	469
7.5	63.3	56.25	474.75
8	66	64	528
$\Sigma 66.5$	868.23	372.75	4197.77

$$na_0 + \sum t_i a_1 = \sum T_i$$

$$\sum t_i a_0 + \sum t_i^2 a_1 = \sum t_i T_i$$

$$n = 14$$

$$T = a_0 + a_1 t$$

$$66.5(14a_0 + 66.5a_1 = 868.23)$$

$$14(66.5a_0 + 372.75a_1 = 4197.77)$$

$$931a_0 + 4422.25a_1 = 57\,737.295$$

$$-931a_0 + 5218.5a_1 = -58\,768.78$$

$$-796.25a_1 = -1031.485$$

$$a_1 = 1.29543$$

$$14a_0 + 86.146 = 868.23$$

$$a_0 = \frac{868.23 - 86.146}{14}$$

$$a_0 = 55.8631$$

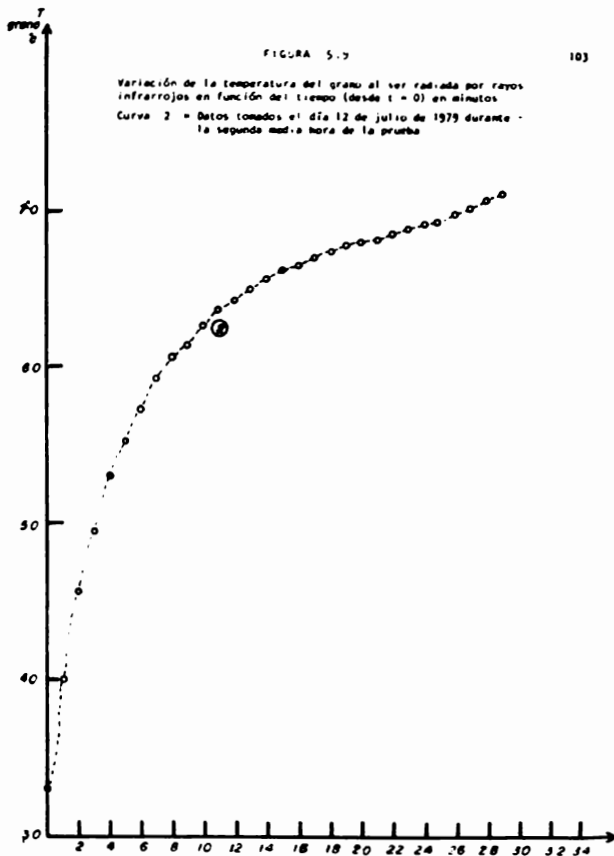
$$T = 55.8631 + 1.29543t$$

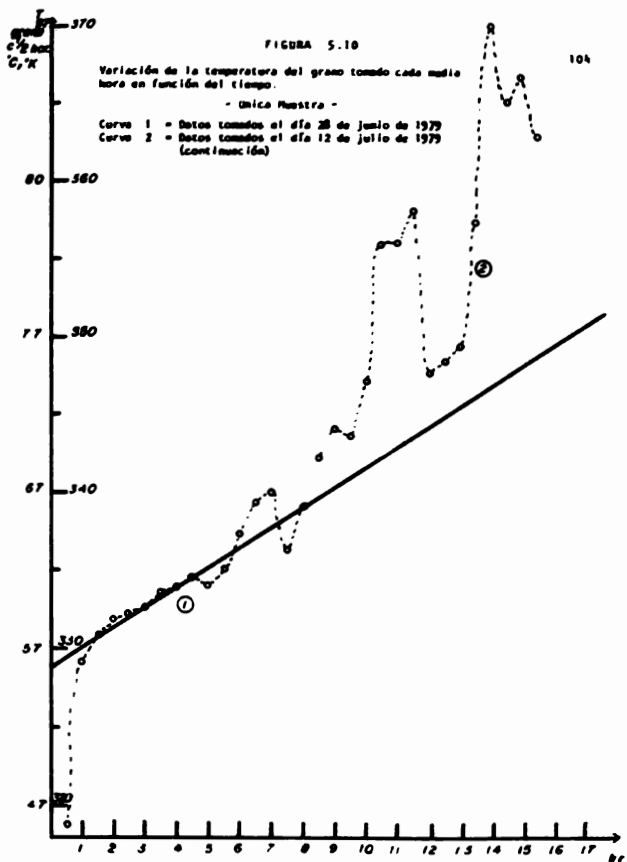
FIGURA 5.3

103

Variación de la temperatura del grano al ser radiada por rayos infrarrojos en función del tiempo (desde $t = 0$) en minutos

Curva 2 = Datos tomados el día 12 de julio de 1979 durante la segunda media hora de la prueba





Los cambios bruscos en la segunda curva pueden deberse a que como los granos están a temperaturas mayores, habrá algunas veces que se enfríen más al volterlos cuando no están expuestos a la radiación infrarroja.

Iguemente que en la temperatura, se ve una clara linealidad en los resultados experimentales de la emitancia contra el tiempo en la curva 1, la causa de la irregularidad de la curva 2 es - por lo antes dicho en la temperatura, ya que al calcular la emitancia es función directa de la temperatura del grano.

Asimismo, se puede ajustar otra recta en estos resultados como sigue:

t hr	r	t ²	rt
0.5	0.276	0.25	0.138
1	0.258	1	0.258
1.5	0.299	2.25	0.4485
2	0.295	4	0.59
2.5	0.307	6.25	0.7675
3	0.313	9	0.939
3.5	0.313	12.25	1.0955
4	0.340	16	1.36
4.5	0.338	20.25	1.521
5	0.360	25	1.8
5.5	0.362	30.25	1.991
6	0.360	36	2.16
6.5	0.364	42.25	2.366
7	0.368	49	2.576
7.5	0.423	56.25	3.1725
8	0.401	64	3.208
$\Sigma 68$	5.377	374	24.391

$$n = 16$$

$$na_0 + \Sigma t_1 a_1 = \Sigma r_i$$

$$\Sigma t_1 a_0 + \Sigma t_1^2 a_1 = \Sigma t_1 r_i$$

$$68(16a_0 + 68a_1 = 5.377)$$

$$16(68a_0 + 374a_1 = 24.391)$$

$$1088a_0 + 4624a_1 = 365.636$$

$$-1088a_0 + 5984a_1 = -390.256$$

$$-1360a_1 = -24.62$$

$$a_1 = 0.018103$$

$$16a_0 + 1.2310 = 5.377$$

$$a_0 = \frac{5.377 - 1.2310}{16} = 0.26$$

$$r = 0.26 + 0.018103t$$

Por lo que la Figura 5.11 queda como se muestra.

Variación de la humedad (en base húmeda) en
función del tiempo

- Única Muestra -

Curva 1 = Datos tomados el día 28 de junio de
1979

Curva 2 = Datos tomados el día 12 de julio de
1979

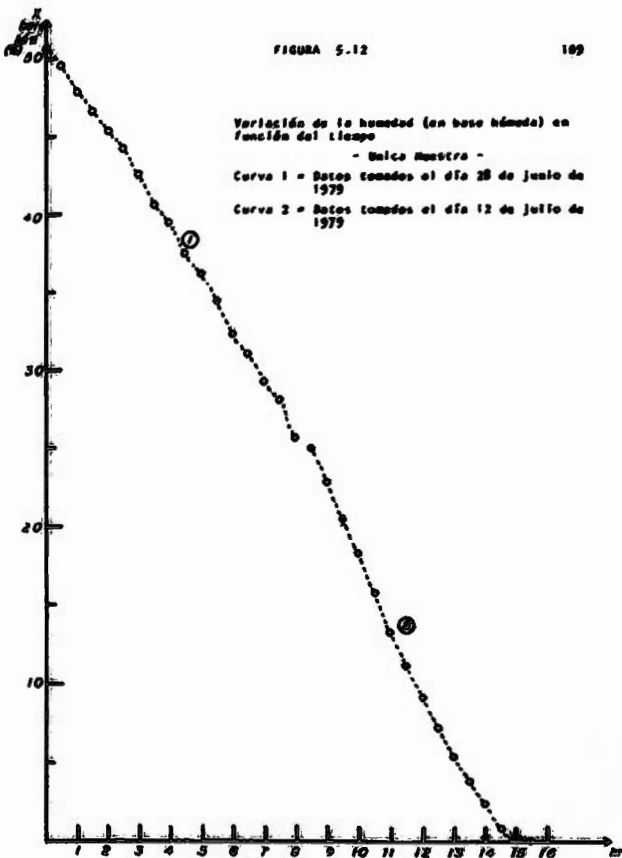
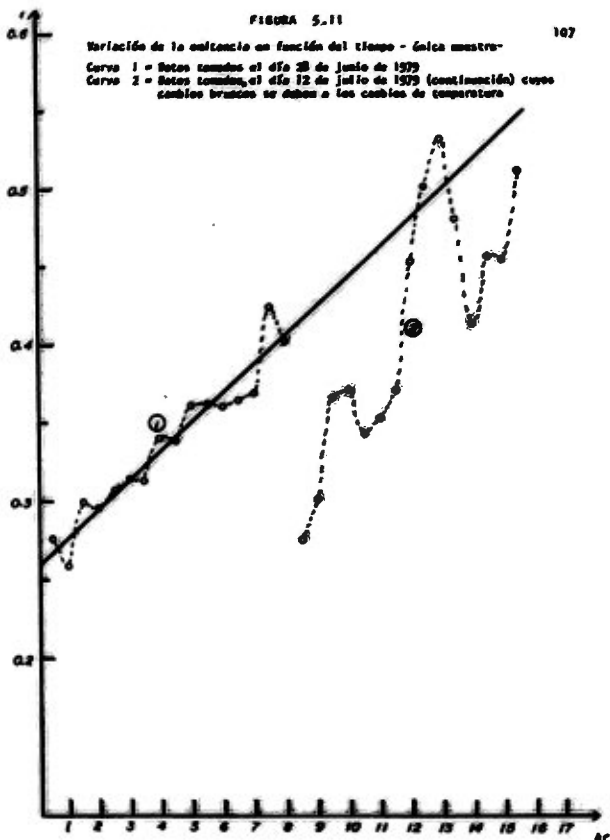


FIGURA 5.11

Variación de la entoncia en función del tiempo - Única muestra-

Curva 1 = Sotas tomadas el día 28 de junio de 1979

Curva 2 = Sotas tomadas el día 12 de julio de 1979 (continuación) cuyos cambios bruscos se deben a los cambios de temperatura



A continuación se presenta la llamada "curva de secado" como Figura 5.12 que nos da la variación de la humedad (en base húmeda) en función del tiempo, en donde en un tiempo de 15 horas se llegó al secado completo del café, lo que en métodos tradicionales se tarda de 20 a 30 horas o más, claro está, que sin afectar las propiedades del producto.

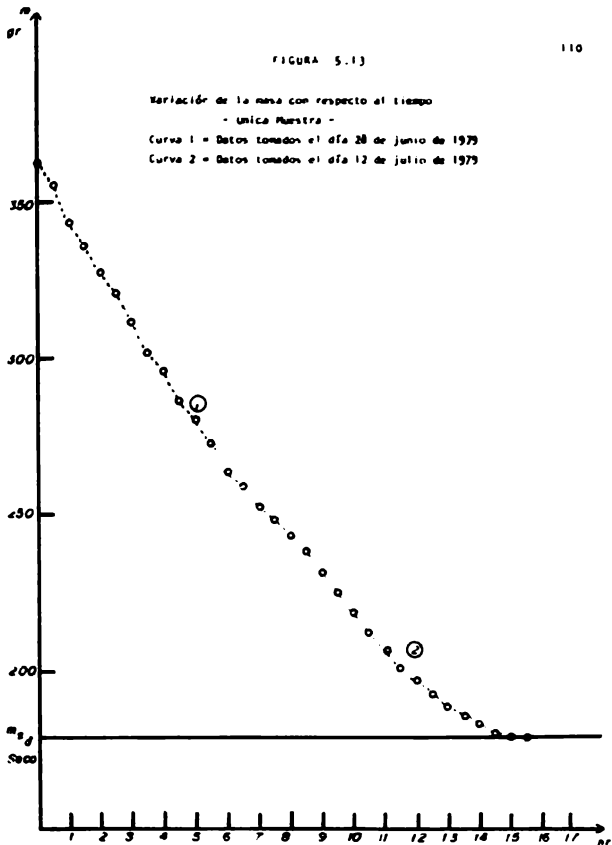
Vemos también que la curva no es muy marcada su tendencia a ser logarítmica.

Y por último se presenta como Figura 5.13, la variación de la masa con respecto al tiempo de la muestra de café (la cual tampoco se ve una tendencia logarítmica marcada) que utilizaremos posteriormente en la comprobación de los datos experimentales respecto a nuestro modelo matemático teórico, ya que este modelo nos podrá permitir regular la velocidad de secado que no debe ser demasiado grande porque modificaría notablemente las propiedades del café, de ahí su importancia.

Además, existe una relación directa entre la variación de masa y la variación de la humedad (en base húmeda).

FIGURA 5.13

110



EQUIPO USADO EN LOS EXPERIMENTOS

- 1) Un cronómetro.
- 2) Un psicrómetro de bulbo.
- 3) Un termómetro de 50°C.
- 4) Un pedazo de estopa.
- 5) Un termo con hielos y agua.
- 6) Una termopila.
- 7) Tres termopares fierro-constantano.
- 8) Un multímetro digital 3465A, Hewlet Packard con botones apretados en $\bar{V}$ y 10 m, cables en V y COM.
- 9) Una placa con oilfa y termopar adherido de cromel-alumel.
- 10) Un termopar de cromel-alumel.
- 11) Una balanza eléctrica Martner con una carga máxima de 2000 gr.
- 12) Un enrejado para introducir el café.
- 13) Un soporte universal.
- 14) El sistema Scott 9053 de radiación térmica.

CAPITULO 6

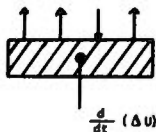
ANÁLISIS DE LOS DATOS EXPERIMENTALES

En este Capítulo se presenta el modelo semiempírico propuesto, que nos permite obtener la variación de la masa de café húmedo en función del tiempo durante el secado por radiación infrarroja, el cual pudo compararse con los resultados experimentales obtenidos de la misma variación. El desarrollo del modelo semiempírico en detalle se encuentra en el apéndice A, asimismo, el cálculo de los factores de forma necesitados y el coeficiente de transferencia de calor por convección se presentan en los apéndices B y C respectivamente.

6.1 BALANCE TERMICO DEL SECADO POR RADIACION INFRARROJA DE LA CACHA DE CAFE

Para determinar como varía la masa total de café (café seco + más humedad) a través del tiempo, recurrimos a los resultados experimentales obtenidos, los cuales llevaremos al balance de energía para representar en un modelo matemático el proceso de secado por radiación infrarroja.

Haciendo el balance de energía de nuestro proceso, tomando como nuestro volumen de control la muestra de café tenemos:



$\frac{d}{dt} (\Delta U)$ = energía que entra - energía que sale. $\frac{d}{dt}$ = derivada - con respecto al tiempo.

$$\frac{d}{dt} (\Delta U) = q_{r1} - q_{r2} - q_{\text{evap}} - q_c \quad \dots (6.1)$$

$$\frac{d}{dt} (\Delta U) = \frac{d}{dt} (c_p m T) = c_p \frac{d}{dt} (m T) = c_{pm} \frac{d}{dt} + c_p \frac{dm}{dt} \dots (6.2)$$

$\frac{d}{dt} (\Delta U)$ = calor que penetra al grano para modificar su energía interna.

$$q_{r1} = \sigma F_{1-2} A_r \epsilon_1 T_1^4 \quad \text{= energía radiante que incide sobre el grano de café.} \quad \dots (6.3)$$

$$q_{r2} = \sigma F_{1-2} A_r \epsilon^h \quad \text{= energía que emite el grano de café.} \quad (6.4)$$

$$q_c = h A_c (T - T_{\infty}) \quad \text{= calor que pierde el grano de café por la transf. de calor por convección al medio ambiente.} \quad \dots (6.5)$$

$$q_{\text{evap}} = \dot{m}_{fg} = -\frac{dm}{dt} h_{fg} \quad \text{= calor debido a la evaporación del agua -}$$

que está perdiendo el grano. El signo menos es debido a que $\frac{dm}{dt}$ es negativo. $\dots (6.6)$

$$m_{\text{total}} = m_{\text{café}} + m_{\text{agua; seco}} \quad \dots (6.7)$$

$$\frac{dm_{\text{total}}}{dt} = \frac{dm_{\text{agua}}}{dt} \quad \dots (6.8)$$

c_p = calor específico del grano de café el cual tomaremos un promedio debido a la pérdida de agua como sigue:

$$C_p \text{ agua} = 1 \text{ Kcal/Kg } ^\circ\text{C}$$

$$C_p \text{ grano} = 0.4 \text{ Kcal/Kg } ^\circ\text{C} \text{ (con } 1/10^3 \text{ \AA de agua)}$$

$$\text{café}$$

Si al principio tenemos aproximadamente un 50% de agua dentro del grano obtenemos:

$$C_p \text{ inicial} = 1 (0.5) + (0.4) (0.5) = 0.7 \text{ Kcal/Kg } ^\circ\text{C}$$

$$C_p \text{ final} = 0.4 \text{ Kcal/Kg } ^\circ\text{C}$$

tomando un promedio de estos 2 últimos:

$$\bar{C}_p = \frac{0.7+0.4}{2} = 0.55 \text{ Kcal/Kg } ^\circ\text{C}$$

y donde:

h = coeficiente de transferencia de calor por convección.

h_{fg} = entalpía de vaporización.

m = masa total del grano de café.

T = temperatura del grano de café promedio.

A_r = área de la fuente de energía radiante.

F_{1-2} = factor de forma entre el área que nos proporciona la energía radiante y el área expuesta a la radiación.

σ = constante de Stefan - Boltzmann = $5.7 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$.

t = tiempo.

ϵ = emitancia del grano de café.

A_c = área por la cual se transfiere calor por convección.

T_{∞} = temperatura del medio ambiente.

ϵ_1 = emitancia de la fuente de energía radiante.

T_1 = temperatura de la fuente de energía radiante.

$\frac{dm}{dt}$ = flujo de agua del café hacia el medio ambiente.

Si tenemos de los resultados experimentales que:

$$T = C_1 + C_2 t \text{ (temperatura media de los granos tomada cada media hora)} \quad \dots (6.9)$$

$$e = C_3 + C_4 t \text{ (emiscencia de los granos tomada cada media hora)} \quad (6.10)$$

de nuestro balance obtenemos:

$$C_p \frac{d}{dt} (mT) + \sigma F_{1-2} A_r (T^4 + h A_c (T - T_{\infty}) - \frac{dm}{dt} h_{fg} - q_{rl} = 0 \quad \dots (6.11)$$

que definiendo constantes llegamos a la ecuación diferencial de la forma:

$$(N + Mt) \frac{dm}{dt} + Nm = a_0 - a_1 t - a_2 t^2 - a_3 t^3 - a_4 t^4 - a_5 t^5 \quad \dots (6.12)$$

cuya solución tomando en cuenta las condiciones iniciales nos queda:

$$m = \left[\frac{1}{N + Mt} \right] \left[N m_0 + a_0 t - \frac{a_1 t^2}{2} - \frac{a_2 t^3}{3} - \frac{a_3 t^4}{4} - \frac{a_4 t^5}{5} - \frac{a_5 t^6}{6} \right] \quad \dots (6.13)$$

que nos da la variación de la masa total del café en función del tiempo y el flujo de agua hacia el medio ambiente será:

$$\frac{dm}{dt} = \left[\frac{1}{(N + Mt)^2} \right] \left[N(-a_1 t - a_2 t^2 - a_3 t^3 - a_4 t^4 - a_5 t^5 + a_0) + N(-N m_0 - \frac{1}{2} a_1 t^2 - \frac{2}{3} a_2 t^3 - \frac{3}{4} a_3 t^4 - \frac{4}{5} a_4 t^5 - \frac{5}{6} a_5 t^6) \right] \quad \dots (6.14)$$

Todo el desarrollo detallado de la ecuación del balance térmico, la definición de constantes y la solución de la ecuación diferencial obtenida se presentan en el apéndice A.

6.2 COMPROBACION DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES Y LA ECUACION TEORICA

De acuerdo al análisis hecho anteriormente, nos abocamos a -

llevar los resultados experimentales al modelo matemático planteado, así como el cálculo de todas las constantes utilizadas en él.

El C_p lo tomaremos igual a $0.55 \text{ Kcal/Kg}^\circ\text{C}$, que haciendo las conversiones:

$$C_p = 0.63968 \frac{\text{W hr}}{\text{Kg}^\circ\text{C}}$$

este valor lo tomaremos como promedio en todo el proceso ya que es función de la pérdida de agua de los granos de café únicamente.

La entalpía de vaporización h_{fg} , igualmente se tomará como constante en todo el proceso, aunque es función de la temperatura pero su variación es mínima, este valor lo tomaremos de tablas a 70°C y es igual a $647.635 \frac{\text{W hr}}{\text{kg}}$.

De los datos experimentales se tiene:

$$C_1 = 328.863 \text{ }^\circ\text{K} = 55.8631 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$C_2 = 1.29543 \frac{^\circ\text{K}}{\text{hr}} = 1.29543 \frac{^\circ\text{C}}{\text{hr}}$$

$$C_3 = 0.276$$

$$C_4 = 0.018103 \frac{1}{\text{hr}}$$

Como se vió, la temperatura ambiente a través de todo el proceso estuvo cercana a 20°C , la cual tomaremos uniforme a todo el cálculo ($T_{\infty} = 20^\circ\text{C}$).

Por lo tanto, se tiene que:

$$M = C_p C_2 = 0.63968 \times 1.29543 = 0.82866134 \frac{W}{Kg}$$

$$M = C_p C_1 - h_{fg} = (0.63968) (55.863) - 647.635 = -611.90047 \frac{W}{Kg}$$

Para hallar la constante de integración $m_0 = 0.3638 \text{ Kg}$.

La forma de hallar el factor de forma (F_{12}) entre la fuente - de calor y la muestra en los experimentos realizados se presenta en el apéndice B, el cual tiene un valor de $F_{12} = 0.773$.

El área de convección para este caso es $L \times L$ (donde L es igual a la longitud de cada lado de la alambrada donde se encuentra el café) y se considerará constante, ya que estrictamente no lo es - debido a la contracción volumétrica de los granos en el secado.

$$\text{Entonces } A_c = (0.16) (0.16) \text{ m}^2$$

$$\text{y } A_r = (0.16) (0.16) \text{ m}^2$$

El cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección se presenta en el apéndice C, cuyo valor es igual a -

$$h = 3.24 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

Sustituyendo todos estos valores en las constantes definidas anteriormente en este mismo capítulo (Apéndice A):

$$K = (5.7 \times 10^8) (0.773) (0.16)^2 = 0.1128 \times 10^8$$

$$D = 3.43$$

$$B = 0.2928$$

$$a_2 = 0.004080$$

$$a_3 = 2307.346 \times 10^8$$

$$a_4 = 5.9218 \times 10^8$$

$$a_5 = 0.00575 \times 10^8$$

$$a_1 = 0.40024$$

Ahora, encontraremos la q_{r1} , o sea, el calor radiante que incide sobre el grano de café:

La fuente se compone de dos partes, la resistencia eléctrica que corre a lo largo de ella y lo demás es "transite" (material de marca registrada de asbesto-cemento).

Entonces la emitancia de la fuente en promedio pesado es:

$$\epsilon_{\text{fuente}} = \frac{A_{\text{transite}} \epsilon_{\text{transite}} + A_{\text{resistencia}} \epsilon_{\text{resistencia}}}{A_{\text{total}}} \quad \dots (6.15)$$

Debido a falta de información en contenido de los componentes de la resistencia que son aluminio, cromo y fierro la

$$\epsilon_{\text{resist.}} = \frac{\epsilon_{\text{aluminio}} + \epsilon_{\text{cromo}} + \epsilon_{\text{fierro}}}{3}$$

La $\epsilon_{\text{aluminio}}$ y ϵ_{cromo} tomadas como material oxidado a una

$T = 260^{\circ}\text{C}$ y a $\lambda = 5.4 \mu$ de tablas.

La ϵ_{fierro} tomada como oxido 6 acero en placa rugosa a 37.8°C
y $\lambda = 9.3 \mu$ de tablas.

$$\epsilon_{\text{resist.}} = \frac{0.12 + 0.83 + 0.96}{3} = 0.6366$$

$\epsilon_{\text{transite}} = 0.66$ (tomada como el valor del asbesto-cemento ro
jo a temperatura solar y $\lambda = 0.6 \mu$)

De la Figura 5.2 de la fuente de calor, utilizamos -
las acotaciones respectivas:

Longitud de 1 tramo de resistencia = 13.5 cm.

Longitud de los tramos de transite = 14.2 cm.

Ancho del tramo de la resistencia = 4 mm.

Ancho de transite = 6 mm.

No. de tramos de resistencia = 16

No. de tramos de transite = 15

las dimensiones de la placa - fuente de calor son $15.4 \times 14.1 \text{ cm}^2$ -
por lo tanto:

$$A_{\text{resistencia}} = 16 (0.004) (0.135) = 0.00864 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{total}} = (0.141) (0.154) = 0.021714 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{transite}} = 0.021714 - 0.00864 = 0.013074 \text{ m}^2$$

$$\epsilon_{\text{fuente}} = \frac{(0.013074) (0.66) + (0.00864) (0.6366)}{0.021714} = 0.6507152$$

La temperatura de la fuente también se halló como un promedio entre las temperaturas de la resistencia y del tránsito cuyas lecturas del termopar de cromel - alumel fueron 6.45 mV y 5.35 mV - respectivamente, como se ve no hay mucha diferencia entre estas - lecturas por lo que puede ser aceptable el promedio aritmético entre ellas dando un valor de 5.9 mV que equivale a una temperatura de la fuente de 144°C.

Otro asunto a tomar en cuenta, es el cálculo del factor de forma de la fuente hacia las paredes adyacentes que se presenta también en el apéndice B, cuyo valor es $F_{13} = 0.038058$.

Debido a que es muy pequeño el factor de forma de la fuente a las paredes adyacentes a ella como se muestra en los cálculos respectivos, despreciaremos el efecto ocasionado por las paredes.

Si 2 = muestra de café y 1 = fuente

$$q_{r1} = F_{1-2} \epsilon_{fuente} \sigma T_{fuente}^4 A_{fuente}$$

$$q_{r1} = (0.773) (0.65) (5.7 \times 10^{-8}) (417)^4 (0.021714)$$

$$q_{r1} = 18.804 \text{ w}$$

entonces la constante

$$a_0 = 18.804 - 3.43 - 3.24 (0.16)^2 (55.9631 - 20) = 12.4$$

Por lo tanto, la variación de masa con respecto al tiempo como modelo matemático teórico:

$$m = m_0 - \frac{a_1}{2} t^2 - \frac{a_2}{3} t^3 - \frac{a_3}{4} t^4 - \frac{a_4}{5} t^5 - \frac{a_5}{6} t^6 + a_0 t$$

$H + Ht$

queda:

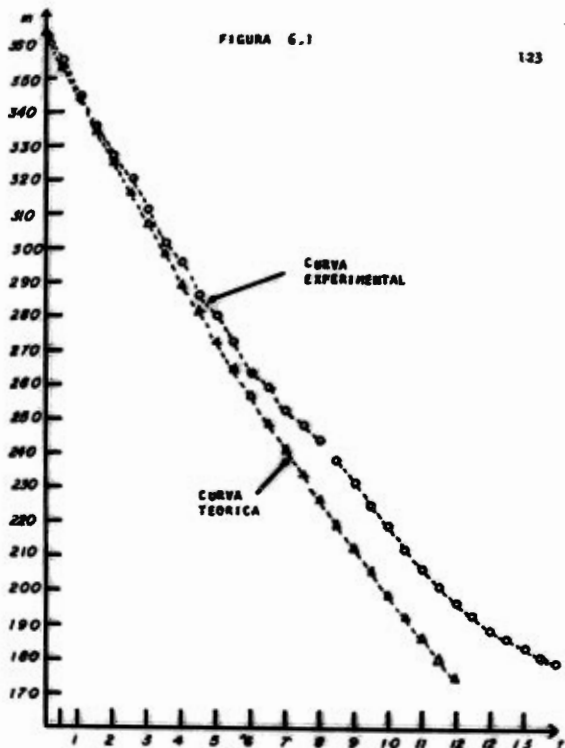
$$m = \left[-222.5728 - 0.20012t^2 - 0.00136t^3 - 576.83 \times 10^{-8}t^4 - 1.18436 \times 10^{-8}t^5 - 0.000958 \times 10^{-8}t^6 + 12.4t \right] \frac{1}{(-611.9 + 0.8286t)}$$

Sustituyendo en la ecuación los diferentes valores de tiempo:

t	m
0	0.3638
0.5	0.35392
1	0.34427
1.5	0.33477
2	0.32541
2.5	0.31622
3	0.30719
3.5	0.29833
4	0.28962
4.5	0.281091
5	0.27272
5.5	0.264526
6	0.25650
6.5	0.24865
7	0.24098
7.5	0.23349
8	0.22618
8.5	0.21905
9	0.21211
9.5	0.20536
10	0.19880
10.5	0.192443
11	0.186274
11.5	0.180304
12	0.17453

En la Figura 6.1 se muestran estos valores, y a su vez los valores de la curva experimental, al final existe una desviación de la teórica con respecto a la experimental de aproximadamente un -

10% (aceptable) debido a los diferentes parámetros tomados como - constantes explicados anteriormente y principalmente debido quizá a la forma de calcular el coeficiente de transferencia de calor - por convección donde existe los porcentajes más altos de cometer error. Así como también, el ajuste de las rectas de la emitancia y temperatura del grano, y el valor de la emitancia de la fuente.



Variación de la masa del café con respecto al tiempo durante el secado

CAPITULO 7

CONCLUSIONES

A lo largo del presente trabajo nos dimos cuenta de las ventajas que encierra el secado de café por radiación térmica infrarroja comparado con el secado convencional. Estas ventajas son en - primer lugar la no contaminación del café por los gases de combustión que es lo que ocurre algunas veces en el secado convencional al calentarse el aire con flama directa, esto se traduce en mejorar la calidad del producto. Otra ventaja, es la reducción del - tiempo de secado sin alterar las propiedades del café por la alta densidad de energía que incide sobre él. Una desventaja sería que el volumen a secar es más pequeño a diferencia de secar por convección y la instalación ocupa una mayor superficie.

De acuerdo a los experimentos podemos concluir que se necesitaría una energía de 735 w/m^2 incidente en el café, para llevar a cabo el proceso de secado en condiciones óptimas (cuidando principalmente la temperatura del café). El espesor de la camada fue de 1 pulgada, por lo que para secar café colocado sobre un área - de 5 m^2 se tendría una masa inicial del mismo de 71 Kg y se necesitaría 3675 w (12540 BTU/hr) de energía incidente en él; si damos un margen del factor de forma de hasta 0.33 (de los quemadores a la muestra), entonces la energía que suministrarían los - quemadores infrarrojos en el sistema de secado sería de 11136 w -

(38000 BTU/hr) que implicaría un gasto de combustible (gas LP) de $9 \text{ m}^3/\text{hr}$, y si el precio del m^3 de gas LP es \$4.23, el costo del secado en un lapso de 15 horas sería \$575.00.

El costo del sistema completo de quemadores infrarrojos sería de \$146,171.00 aproximadamente, usando 7 quemadores. Lo anterior nos permite darnos cuenta del factor económico dentro del proceso y el alto costo inicial que sería otra desventaja.

Además, por otro lado, de acuerdo al modelo matemático hallado que nos da la variación de la masa (café más humedad) en función del tiempo nos permite predecir la velocidad de secado del proceso, lo cual es de gran importancia.

Claro está, que el secar por radiación infrarroja cambiará las propiedades del café, pero su análisis físico-químico-biológico no fué objetivo del presente trabajo, ya que en este caso, lo único que interesa es el sabor final al momento de tomar una taza de café.

Así mismo, el secar café por radiación infrarroja no produce ningún daño a la salud humana, ya que las longitudes de onda de los rayos son "grandes" y no repercuten en lo más mínimo (sólo producen efectos térmicos).

Todo lo anterior, nos permitirá elegir la apropiada forma de llevar a cabo el proceso de secado de café para su beneficio pro-

plo.

Por los resultados arrojados durante este trabajo se recomienda utilizar un sistema de combustión como fuente de radiación infrarroja capaz de efectuar el secado de café en condiciones favorables y tomar muy en cuenta las ventajas que se ocasionan al elegir este camino, así mismo, investigar la posibilidad de producir gas metano con la pulpa de café que se deshecha para su aprovechamiento en los quemadores infrarrojos citados y continuar con la labor de implementar a nivel industrial esta nueva forma de secar el café aun desconocida por muchos.

APENDICE A

DESARROLLO Y SOLUCION DE LA ECUACION OBTENIDA DEL BALANCE TERMICO

La nomenclatura es la misma del Capítulo 6.

Del balance térmico habíamos obtenido:

$$C_p \frac{dT}{dt} (mT) + \sigma F_{1-2} A_r (T^4 + h A_c (T - T_{\infty}) - \frac{dm}{dt} h_{fg} - q_{r_1} = 0 \dots (A.1)$$

$$C_p m \frac{dT}{dt} + C_p T \frac{dm}{dt} + \sigma F_{1-2} A_r (T^4 + h A_c (T - T_{\infty}) - \frac{dm}{dt} h_{fg} - q_{r_1} = 0 \quad (A.2)$$

pasando los términos que involucren la masa al miembro izquierdo de la ecuación:

$$C_p m \frac{dT}{dt} (C_1 + C_2 t) + C_p (C_1 + C_2 t) \frac{dm}{dt} - h_{fg} \frac{dm}{dt} = q_{r_1} - \sigma F_{1-2} A_r (C_3 + C_4 t) \\ (C_1 + C_2 t)^4 - h A_c [(C_1 + C_2 t) - T_{\infty}] \dots (A.3)$$

desarrollando el binomio de $(C_1 + C_2 t)^4$ y haciendo el producto - por $(C_3 + C_4 t)$ definiremos a las siguientes constantes de la manera siguiente:

$$K = \sigma F_{1-2} A_r \dots (A.4)$$

$$D = C_1^4 C_3 K \dots (A.5)$$

$$B = K (4 C_1^3 C_2 C_3 + C_1^4 C_4) \dots (A.6)$$

$$a_2 = K (6c_1^2 c_2^2 c_3 + 4c_1^3 c_2 c_4) \quad \dots (A.7)$$

$$a_3 = K (4c_1 c_2^3 c_3 + 6c_1^2 c_2^2 c_4) \quad \dots (A.8)$$

$$a_4 = K (c_2^4 c_3 + 4c_1 c_2^3 c_4) \quad \dots (A.9)$$

$$a_5 = K c_2^4 c_4 \quad \dots (A.10)$$

así tenemos:

$$\begin{aligned} mC_p C_2 + C_p C_1 \frac{dm}{dt} + C_p C_2 t \frac{dm}{dt} - h_{fg} \frac{dm}{dt} = q_{r1} - D - Bt - a_2 t^2 - a_3 t^3 \\ - a_4 t^4 - a_5 t^5 - hA_c C_1 - hA_c C_2 t + hA_c T_{\infty} \quad \dots (A.11) \end{aligned}$$

agrupando términos volvemos a definir nuevas constantes como sigue:

$$a_0 = q_{r1} - D - hA_c C_1 + hA_c T_{\infty} \quad \dots (A.12)$$

$$a_1 = B + hA_c C_2 \quad \dots (A.13)$$

$$M = C_p C_2 \quad \dots (A.14)$$

$$N = C_p C_1 - h_{fg} \quad \dots (A.15)$$

por lo que nuestra ecuación diferencial queda:

$$Mm + N \frac{dm}{dt} + Mt \frac{dm}{dt} = -a_1 t - a_2 t^2 - a_3 t^3 - a_4 t^4 - a_5 t^5 + a_0 \quad \dots (A.16)$$

$$(N + Mt) \frac{dm}{dt} + Mm = -a_1 t - a_2 t^2 - a_3 t^3 - a_4 t^4 - a_5 t^5 + a_0 \quad \dots (A.17)$$

SOLUCION DE LA ECUACION DIFERENCIAL:

Haciendo un cambio de variable en Y:

$$\text{si } Y = (N + Mt) = \dots (A.18)$$

$$\frac{dY}{dt} = (N + Mt) \frac{dm}{dt} + Nm, \text{ que es el primer miembro de nuestra ecuación diferencial} \dots (A.19)$$

$$\therefore \frac{dY}{dt} = -a_1 t - a_2 t^2 - a_3 t^3 - a_4 t^4 - a_5 t^5 + a_0 \dots (A.20)$$

entonces integrando directamente tenemos:

$$Y = (N + Mt) = -\frac{a_1 t^2}{2} - \frac{a_2 t^3}{3} - \frac{a_3 t^4}{4} - \frac{a_4 t^5}{5} - \frac{a_5 t^6}{6} + a_0 t + \Omega \dots (A.21)$$

Ω = cte de integración

despejando m:

$$m = \frac{-\frac{a_1 t^2}{2} - \frac{a_2 t^3}{3} - \frac{a_3 t^4}{4} - \frac{a_4 t^5}{5} - \frac{a_5 t^6}{6} + a_0 t + \Omega}{(N + Mt)} \dots (A.22)$$

condición de frontera: si $t = 0$ $m = m_0$

de la ecuación $m_0 = \frac{\Omega}{N}$ $\therefore \Omega = Nm_0$

lo que da:

$$m = \left[m_0 - \frac{a_1}{2} t^2 - \frac{a_2}{3} t^3 - \frac{a_3}{4} t^4 - \frac{a_4}{5} t^5 - \frac{a_5}{6} t^6 + a_0 t \right] \left[\frac{1}{n + nt} \right] \quad (A)$$

variación de la masa a través del tiempo,

que derivando con respecto al tiempo nos da el flujo de agua hacia el medio ambiente en cualquier instante de tiempo:

$$\frac{dm}{dt} = \left[n(-a_1 t - a_2 t^2 - a_3 t^3 - a_4 t^4 - a_5 t^5 + a_0) + n \left(-m_0 - \frac{1}{2} a_1 t^2 - \frac{2}{3} a_2 t^3 - \frac{3}{4} a_3 t^4 - \frac{4}{5} a_4 t^5 - \frac{5}{6} a_5 t^6 \right) \right] \left[\frac{1}{(n + nt)^2} \right] \quad \dots (A.24)$$

APENDICE B

CALCULO DE FACTORES DE FORMA

La manera de hallar el factor de forma (F_{12}) entre la fuente - de calor y la muestra, es considerándolas como áreas iguales (aun que la fuente es un poco menor) y usando la ecuación:

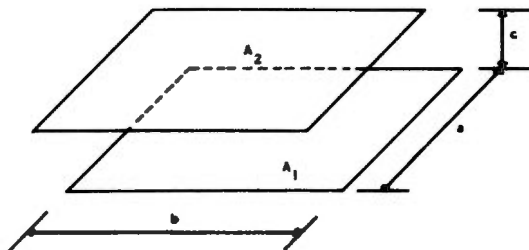


FIGURA B.1

definiendo $\eta = \frac{b}{c}$, $\xi = \frac{a}{c}$

$$F_{1-2} = \frac{2}{\pi \eta \xi} \left\{ \ln \left[\frac{(1+\eta^2)(1+\xi^2)}{1+\eta^2+\xi^2} \right]^{1/2} + \xi(1+\eta^2)^{1/2} \tan^{-1} \frac{\xi}{(1+\eta^2)^{1/2}} \right. \\ \left. + \eta(1+\xi^2)^{1/2} \tan^{-1} \frac{\eta}{(1+\xi^2)^{1/2}} - \xi \tan^{-1} \xi - \eta \tan^{-1} \eta \right\} \dots (B.1)$$

En este caso $a = b = 16 \text{ cm}$ y $c = 2 \text{ cm}$

$$\eta = \xi = \frac{16}{2} = 8$$

$$F_{1-2} = \frac{2}{\pi (8)(8)} \left\{ \ln \left[\frac{(1+64)(1+64)}{1+64+64} \right]^{1/2} + 8(1+64)^{1/2} \tan^{-1} \frac{8}{(1+64)^{1/2}} + 8(1+64)^{1/2} \tan^{-1} \frac{8}{(1+64)^{1/2}} - 8 \tan^{-1} 8 - 8 \tan^{-1} 8 \right\}$$

$$F_{1-2} = 0.773 \quad \begin{cases} 1 = & \text{fuente de calor} \\ 2 = & \text{placa conteniendo al café} \end{cases}$$

CALCULO DEL FACTOR DE FORMA DE LA FUENTE HACIA LA PARED ADYACENTE

$$A_1 = 0.16 \times 0.16 \text{ m}^2$$

$$A_3 = 0.16 \times 0.015 \text{ m}^2$$

$$a = 0.015 \text{ m}$$

$$b = 0.16 \text{ m}$$

$$c = 0.16 \text{ m}$$

$$\text{definiendo} \quad \eta = \frac{a}{b} = \frac{0.015}{0.16} = 0.09375 \quad \text{y} \quad \xi = \frac{c}{b} = \frac{0.16}{0.16} = 1$$

$$\begin{aligned}
 F_{1-3} = \frac{1}{180 \xi} & \left\{ \xi \tan^{-1} \frac{1}{\xi} + \eta \tan^{-1} \frac{1}{\eta} - (\eta^2 + \xi^2)^{1/2} \tan^{-1} \right. \\
 & \left. \xi \frac{1}{(\eta^2 + \xi^2)^{1/2}} + \frac{1}{4} \ln \left[\frac{(1 + \xi^2)(1 + \eta^2)}{1 + \eta^2 + \xi^2} \xi^2 \frac{1 + \xi^2 + \eta^2}{(1 + \xi^2)(\xi^2 + \eta^2)} \right. \right. \\
 & \left. \left. \eta^2 \frac{1 + \xi^2 + \eta^2}{(1 + \eta^2)(\xi^2 + \eta^2)} \right] \right\} \dots\dots (B.2) \\
 F_{1-3} = \frac{1}{180} & \left\{ \tan^{-1}(1) + (0.09375) \tan^{-1} \frac{1}{(0.09375)} - (0.09375^2 + 1)^{1/2} \right. \\
 & \tan^{-1} \frac{1}{(0.09375^2 + 1)^{1/2}} + \frac{1}{4} \ln \left[\frac{(2)(1 + 0.09375^2)}{2 + (0.09375)^2} (1) \right. \\
 & \left. \left. \frac{2 + (0.09375)^2}{(2)(1 + 0.09375)} (0.09375) \frac{2 + (0.09375)^2}{(1 + 0.09375^2)^2} \right] \right\}
 \end{aligned}$$

$$F_{1-3} = 0.03805783$$

Cuyas figuras correspondientes se muestran en las Figuras B.2 y B.3.

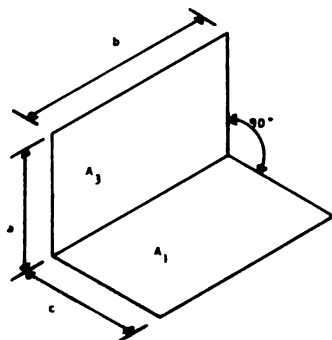


FIGURA B.2

que viste este arreglo en la fuente:

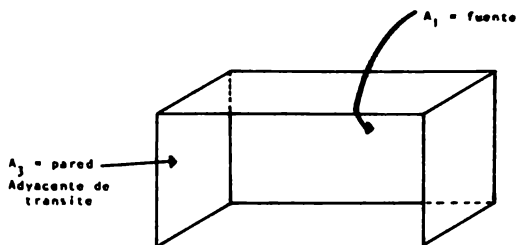


FIGURA B.3

APENDICE C

CALCULO DEL h EN LA MUESTRA DE CAFE DEL EXPERIMENTO REALIZADO

El cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección (h) se hizo de una manera burda debido a la falta de información adecuada a nuestra muestra, y fue tratando a la muestra de café como una placa plana y vertical sujeta a la convección libre (lo cual dista mucho de ser plana), para ello nos valemos de:

$$h = 0.360 \frac{k}{x} (Gr)^{1/4} \dots\dots (C.1)$$

donde:

K = conductividad térmica del aire.

x = distancia de la base a cualquier punto.

Gr = número de Grashof.

$$Gr = \frac{\rho L^3 \beta g \Delta T}{\mu^2} \dots\dots (C.2)$$

ρ = densidad del aire
 μ = viscosidad dinámica del aire
 β = coeficiente de expansión volumétrica del aire

K, ρ , μ y β evaluados a Tgrano + Taire de tablas.

El ΔT es la diferencia entre la temperatura de los granos y la del aire, se tomarán 2 valores un mínimo con $\Delta T = 1^\circ\text{C}$ y un máximo con $\Delta T = 94^\circ\text{C}$ (quizá exagerado).

El irse a los extremos es para visualizar como varía el coeficiente de transferencia de calor por convección debido a la delgadez de su cálculo.

Para una temperatura inicial del grano $T_i = 55^\circ\text{C}$:

$$h_i = 0.360 \frac{(2.624) \times 10^{-2}}{0.16} \left[\frac{1.197^2 \times 0.16^3 \times 3.22 \times 10^{-3} \times 9.81 \times 1}{(1.846 \times 10^{-5})^2} \right]^{1/4}$$

$$Gr_i = 5.44 \times 10^5$$

$$h_i = 1.6034 \text{ W/m}^2\text{C}$$

y para una temperatura final del grano $T_f = 95^\circ\text{C}$

$$h_f = 0.360 \frac{(3.365) \times 10^{-2}}{0.16} \left[\frac{0.8824^2 \times 0.16^3 \times 3.06 \times 10^{-3} \times 9.81 \times 94}{(2.286 \times 10^{-5})^2} \right]^{1/4}$$

$$Gr_f = 1.72 \times 10^7$$

$$h_f = 4.877 \text{ W/m}^2\text{C}$$

Sacando un promedio aritmético y considerándolo constante a través de todo el proceso aunque es función principalmente de la temperatura; el coeficiente de transferencia de calor por convección es:

$$h = \frac{h_i + h_f}{2} = \frac{1.6034 + 4.877}{2} = 3.24 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

REFERENCIAS

- 1.- El Café.
René Coste.
Técnicas agrícolas y producciones tropicales.
Ed. Blume.
- 2.- Producción Moderna de Café.
A.E. Harer.
C.E.C.S.A.
- 3.- Coffee Processing Technology (Vol. I y II).
Sivetz M. and Foote H.E.
The Avi Publishing Company, Inc. 1963.
- 4.- The Detection and Measurement of Infra-red Radiation.
R.A. Smith, F.E. Jones and R.P. Chasmer.
Oxford at the clarendon press. 1957.
- 5.- Transmisión del Calor por Radiación.
Frank Kreith.
C.E.C.S.A. 1965.
- 6.- Application of Infra-red Radiation in Food Processing.
A.S. Ginzburg.
Leonard Hill Books. 1969.
- 7.- Principles of Unit Operations.
Foust, Wenzel, Clump, Maus, and Andersen.
John Wiley & Sons, Inc. 1960.
- 8.- Transport Phenomena.
R. Byron Bird, Warren E. Stewart, and Edwin M. Lightfoot.
John Wiley & Sons, Inc. 1960.
- 9.- Radiation Heat Transfer.
E.M. Sparrow and R.D. Cess.
Brooks/Cole publishing company - Belmont, California. 1970.
- 10.- Engineering Calculations in Radiative Heat Transfer.
W.A. Gray and R. Muller.
Pergamon Press. 1974.
- 11.- Thermal Radiation Heat Transfer.
Siegel - Howell.
McGraw-Hill. Kogakusha, LTD. 1972.
- 12.- Transferencia de Calor.
José A. Manrique.
María, S.A. de C.V. 1976.

- 13.- Principios de Transferencia de Calor.
Frank Kreith.
Herrero Hermanos, Sucesores, S.A. 1970.
- 14.- Heat Transfer.
J.P. Holman.
McGraw-Hill, Kogakusha. 1972.
- 15.- Termodinámica.
V.M. Falres.
U.T.E.N.A. 1973.
- 16.- El Secado.
F. Kneule.
- 17.- Chemical Engineers' Handbook.
Perry and Chilton.
Editorial Advisory Board. 1973.