

124
2 Escm

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Facultad de Ingeniería



**SECADO DE GRANOS DE CAFE MEDIANTE
RADIACION TERMICA INFRARROJA**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO
P R E S E N T A :
SIMON SANCHEZ FRANCO

Director de Tesis: Dr. Jaime Cervantes de Gortari

México, D. F.

1985



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 está 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

" SECADO DE GRANOS DE CAFE MEDIANTE RADIACION TER- MICA INFRARROJA "

INTRODUCCION	Pag. 1
------------------------	-----------

CAPITULO 2

SECADO DE GRANOS DE CAFE

2.1 Generalidades del grano de café	4
2.2 Descripción de los métodos de producción del grano de café comercial	4
2.3 Aspectos generales del secado	7
2.4 Métodos convencionales de secado	8

CAPITULO 3

SECADO INFRARROJO DE CAFE

3.1 Generalidades y antecedentes sobre la aplicación de la radiación térmica infrarroja en el proce- samiento térmico de los alimentos	12
3.2 Antecedentes sobre secado de granos de café mediante radiación térmica infrarroja	20
3.3 Propuesta de nuevos experimentos	24

CAPITULO 4

DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL APARATO DE LABORATORIO PARA SECAR GRANOS DE CAFE MEDIANTE RADIACION TERMICA IN- FRARROJA.

4.1	Objetivos del aparato secador	26
4.2	Metodología de su diseño	26
4.3	Detalles de su construcción	42

CAPITULO 5

RESULTADOS EXPERIMENTALES.

5.1	Precedimiento de experimentación	48
5.2	Resultados obtenidos	51

CAPITULO 6

	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	83
--	------------------------------------------------	-----------

APENDICES.

APENDICE 1

	Generalidades del grano de café	86
--	-------------------------------------------	----

APENDICE 2

	Tecnología del grano de café	93
--	----------------------------------------	----

APENDICE 3

	Generadores de radiación infrarroja	98
--	-----------------------------------------------	----

APENDICE 4

AA.0	Medición de temperatura	103
AA.1	Detección y medición de radiación térmica	107
AA.2	Medición del contenido de humedad en alimentos	109
AA.3	Medición de flujos	110

APENDICE 5

**A5.1 Calibración de rotámetros para medición de
flujos de gas LP 112**

A5.2 Calibración de un radiómetro de termopila . . 114

APENDICE 6

A6.1 Memoria de cálculos numéricos 125

A6.2 Cálculo de tuberías 129

REFERENCIAS 132

INTRODUCCION.

En los últimos años, los investigadores han dedicado esfuerzos importantes en la búsqueda y utilización de fuentes alternas de energía, en el mejor aprovechamiento de las fuentes convencionales y en la producción de más y mejores productos.

Dentro de este contexto de trabajo se ubican los investigadores de la rama alimenticia, quienes realizan una variedad de actividades entre las que destacan las siguientes: búsqueda y utilización de métodos alternativos de procesamiento de productos alimenticios, tendientes a mejorar tanto la calidad del producto (valor nutritivo) como el aprovechamiento de la energía, y de fuentes alternas de energía para procesar estos productos.

Uno de los métodos que en algunos países se ha utilizado mucho en el procesamiento térmico de algunos alimentos es el de la radiación térmica infrarroja. Esto se debe principalmente a las características propias de este tipo de radiación y los efectos que produce sobre los alimentos húmedos, y a la capacidad de tratamiento térmico de algunos de ellos a temperaturas altas; es decir, sin la degradación de sus propiedades por efecto de la temperatura.

El café bebida por excelencia en todo el mundo, es uno de los productos que permiten ser procesados térmicamente, durante el secado, a temperaturas relativamente altas sin alteración apreciable en su aroma y sabor.

Trabajos preliminares reportados en las referencias (8,7a y 8a) sobre secado de granos de café mediante radiación térmica infrarroja muestran resultados muy interesantes, tales como:

- Notable reducción en el tiempo de secado, sin alteración de sus propiedades.
- Variación creciente de la emitancia del grano a medida que decrece la humedad del mismo.

Este trabajo trata sobre un estudio experimental más amplio sobre secado de granos de café (dinámica del secado y medición de la emitancia del grano) mediante radiación térmica infrarroja, y su presentación se inicia en el capítulo 2 donde se describen brevemente las características generales y los métodos convencionales de beneficio del grano de café, y las características generales del proceso de secado.

En el capítulo 3 se hace una revisión de los antecedentes sobre la aplicación de la radiación térmica infrarroja en el tratamiento térmico de los alimentos, con particular énfasis en el secado del grano de café, y también se mencionan los argumentos que justifican este trabajo.

El capítulo 4 describe en detalle el procedimiento de diseño y construcción del aparato secador de laboratorio que se utiliza en estos experimentos.

Los capítulos 5 y 6 describen el procedimiento de experimentación, los experimentos realizados y los resultados obtenidos, y las conclusiones y recomendaciones del trabajo, respectivamente.

mente.

Al final, se incluyen 6 apéndices los cuales muestran la descripción de algunos métodos de medición, memorias de cálculo y los métodos utilizados para calibrar algunos instrumentos de medición empleados en el aparato secador.

CAPITULO 2

SECADO DE GRANOS DE CAPE.

En este capítulo se mencionan brevemente tanto las generalidades como las diferentes técnicas de procesamiento del grano de café. Asimismo, se describen de manera amplia algunos aspectos generales del secado de alimentos y los principales métodos convencionales de secado del grano.

2.1 Generalidades del grano de café.

Existen entre los granos de café marcadas diferencias las cuales son resultado tanto de su origen botánico como, entre otros factores, de su núcleo ecológico y sus técnicas de cultivo. Estas diferencias se resumen, desde el punto de vista macroscópico, en el tamaño, la forma y el color, y desde el punto de vista microscópico, en su estructura interna y en la concentración de sus elementos constituyentes. En el apéndice 1 se describen ampliamente estas generalidades.

2.2 Descripción de los métodos de producción del grano de café comercial.

Para obtener el grano de café comercial es necesario efectuar una serie de operaciones sobre el fruto maduro de café, posteriores a la cosecha de éste. Estas tienen por objeto despojar al fruto de sus envolturas (pulpa, mucilago, pergamino y película), reducir su contenido de agua desde un 65-75% hasta un 10-13% y, finalmente, mejorar su presentación. En la actualidad, para tal objeto se utilizan en forma individual o combinada los dos métodos siguientes:

a) Vía húmeda.

Este método está constituido por:

-- Eliminación de pulpa y mucilago.

La eliminación de estas envolturas se realiza por me dios mecánicos, que pueden ser sólo o combinados con algún proceso químico o bioquímico, y en presencia de un medio acuoso, generalmente agua.

- Secado de granos de café pergamino.

En esta etapa, el contenido de agua de los granos de café se reduce desde un 50-60% hasta un 10-13%.

- Eliminación del pergamino y la película.

Finalmente, en esta etapa, se separa el pergamino y la película del grano de café por medios mecánicos, únicamente.

b) Vía seca.

Este método está constituido por:

- Secado de los frutos maduros de café.

En esta etapa se reduce el contenido de agua de los frutos de café desde un 60-75% hasta un 10-13%.

- Eliminación de la cáscara del grano de café.

En esta etapa se separa la cáscara (pulpa, mucilago, pergamino y película) del grano de café. Esta actividad se realiza por medios mecánicos.

Entre estos dos métodos existen operaciones en común, al terminar las correspondientes a cada uno de ellos; tales como, la limpieza, la tría o calibrado, el mezclado y homogenizado, de las que resultan los lotes de grano de café listos para ser almacenados o comercializados. Si se requiere más información sobre los métodos mencionados e inclusive sobre el rendimiento del grano de café desde su cosecha hasta su comercialización, ver apéndice 2.

Por otra parte, es importante mencionar que en la etapa de procesamiento al que se somete el fruto de café para obtener

el grano de café comercial, se obtienen subproductos, en general de desecho, a los cuales se les ha encontrado diversas e interesantes aplicaciones; tales como,

á) producción de gas metano a partir de la pulpa de café.

Cuando se utiliza la vía húmeda para procesar el fruto de café, se obtiene un subproducto llamado pulpa de café el cual al degradarse bioquímicamente (fermentación) en presencia de otros materiales (estiércol y desechos agrícolas) produce gas con un alto contenido de metano. Experiencias sobre este particular se han realizado con bastante éxito en la India y la República Centroafricana², y actualmente en CENICAPE^{2a} (Centro Nacional de Investigación de Café), Colombia, e ICAITI² (Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología Industrial)-Guatemala.

ii) material fertilizante.

Este se obtiene al alternar en una zanja, capas de pulpa de café y cáscaras de café con capas de tierra y otros desechos vegetales. Esta masa se mantiene húmeda, de tal manera que al cabo de un año su descomposición esta tan avanzada que ya es posible utilizarla como fertilizante.

iii) varios.

- La pulpa de café se ha utilizado con éxito regular en la tenería, en la preparación de alcohol metílico, en la preparación de alimento para animales y como combustible directo.
- En países como la India, Yémen y Bolivia, la pulpa de café se ha utilizado para preparar una infusión medicinal.
- Finalmente, la cascarilla seca (pergamino) se ha uti-

lizado como combustible secundario para secar el grano de café.

2.3 Aspectos generales del secado.

En la industria alimentaria, la conservación de alimentos tiene gran importancia debido a que, al mismo tiempo en que tiene por objeto evitar la contaminación y/o crecimiento de microbios en el producto, tambien debe conservar e inclusive mejorar el color, la textura, el sabor y el valor nutritivo del mismo.

El secado o deshidratación es quizás uno de los métodos más antiguos que se utilizan en la conservación de alimentos, y tiene por objeto remover el agua contenida en el producto. En general, el nivel de humedad o contenido de agua requerido para prevenir el crecimiento de microbios es menor al 10%, mientras que para prevenir el deterioro bioquímico es mucho menor al 5%. Las principales ventajas que ofrecen los productos deshidratados son:

- a) pueden almacenarse a condiciones ambientales controladas por largos periodos de tiempo,
- b) ahorro considerable de espacio de almacenamiento, transporte y empackado, y
- c) productos de muy buena calidad.

En particular, el proceso de secado de los granos de café tiene por objeto reducir su contenido de agua hasta un 12% aproximadamente, para que de esta manera se evite el crecimiento de microbios y el deterioro bioquímico durante su almacenamiento, transporte y empackado; ya que Morris y Wood¹ han demostrado que cuando el grano de café contiene menos del 10% de humedad, el proceso de torrefacción produce café aromático y sabroso; asimismo, se sabe que la vida del escolite (Stephanoderes) es imposible en granos con contenido de hume-

dad inferior a 12.5%. Se sabe, también, que el secado produce una contracción volumétrica en el grano de un 12. o 13%.

2.4 Métodos convencionales de secado.

En la actualidad para secar el grano de café se utilizan los dos métodos siguientes:

a) Secado natural.

Este método consiste, básicamente, en exponer los granos de café (pergamino o en fruto) a la acción directa de los rayos solares. Esto se realiza extendiendo los granos de café sobre una superficie generalmente horizontal. Existen una gran cantidad de variantes respecto al tipo de superficie, protección y manejo del grano, y esto es resultado, principalmente, del tamaño de la producción y de las condiciones climatológicas. La duración del secado depende, principalmente, de la climatología (temperatura diurna, intensidad de insolación y humedad del aire), la ventilación y la naturaleza de la superficie sobre la que se extiende el grano. A continuación se describe brevemente el proceso de secado natural de café tratado por vía húmeda y por vía seca.

Café tratado por vía húmeda: Este proceso se inicia con la exposición de una cama delgada de granos de café pergamino (50-60% de contenido de humedad), los cuales se remueven con frecuencia para eliminar rápidamente el agua superficial, pues de lo contrario se puede desencadenar una fermentación nociva para el grano. Este fenómeno es típico de los cafés muy húmedos extendidos en capas gruesas y que no son removidos (R. Wilboux)². A medida que el grano se deshidrata, el espesor de la cama puede aumentarse y alcanzar en las últimas horas una carga de

10 a 15 kg/m de café, que equivale a una cama con espesor de 3 a 4 cm. Cuando el café llega a su punto óptimo de secado, se recoge en un gran montón que se cubre con un toldo o una hoja de polietileno hasta el momento de su transporte a los silos de almacenamiento.

El secado debe ser progresivo con el fin de dejar el revestimiento protector del grano de café intacto durante todo el tiempo de su exposición al aire, y su acción debe extenderse a las partes internas del grano, ya que, si éstas están deshidratadas insuficientemente, entonces, ceden agua a las partes superficiales y esta migración hídrica puede provocar fenómenos diatásicos (aparición de manchas decoloradas), abigarramiento, etc., desagradables a la vista. El tiempo de secado del café pergamino en países de intensa insolación y con aire relativamente seco es de 6 a 8 días. En regiones menos favorables es de 10 a 15 días.

Café tratado por vía seca: El secado se inicia al extender una cama delgada de frutos maduros de café (60-75% - de contenido de humedad), posteriormente se remueve varias veces al día, y a medida que el contenido de humedad va decreciendo, se va aumentando progresivamente el espesor de la cama, sin superar los 5 cm al final del proceso. Se debe tener cuidado de proteger el grano de café a las lluvias y rocío nocturno, y de introducirlo al recinto de almacenamiento, sólo si está muy seco cuando está sin decorticar. Cuando esto se hace, se debe proceder inmediatamente a la decorticación para evitar riesgos de alteración por humedecimiento, resultado de condiciones impropias de almacenamiento.

b) Secado artificial.

El secado artificial del café pergamino y del fruto maduro, siendo más rápido el del primero y más lento el del segundo, debido al contenido de humedad de cada uno de ellos, es indispensable, principalmente, en regiones con climas muy lluviosos, y cuando el volumen de la cosecha a tratar hace necesaria la aceleración de las operaciones.

La técnica más antigua es la del suelo radiante de horno clásico compuesto, básicamente, de un hogar y de una superficie plana sobre la que se extiende el café, la cual es calentada por un haz de tubos por los que circulan los gases calientes producto de la combustión. El secado debe quedar bajo atenta y constante vigilancia, debido a la irregularidad del calentamiento y el riesgo de intensificación súbita del fuego.

Desde principios de siglo, se han utilizado muy ampliamente los secadores mecánicos (Gurdiola y Okrassa) cuyo órgano principal es un tambor cilíndrico de palastro perforado animado por un movimiento de rotación lento (2 rpm) alrededor de un eje tubular. El tambor está dividido en compartimientos, para equilibrio del aparato, y el tubo axial comunica con una red de tuberías que atraviezan los compartimientos, y posteriormente se abre en una camisa exterior. El aire caliente, producido en una caldera, circula por los tubos y de esta manera calienta la masa de café la cual va perdiendo agua lentamente. La temperatura de la masa no debe sobrepasar los 90°C y descender a 65-70°C en las últimas horas. La duración de este proceso es de 20 a 30 horas en promedio, ya que, éste depende fuertemente del contenido inicial de agua y la temperatura a la que se desarrolla el proceso.

En Brasil, las grandes haciendas realizan el café tratado por vía seca en forma alternada, es decir, se utiliza el secado solar y el secado artificial simultáneamente. Este proceso de secado se aproxima más al secado natural el cual es el preferido por los consumidores. Bajo este principio, en dicho país, funciona un aparato llamado secador Torres.

En los últimos años se ha estado desarrollando una nueva técnica para secar o secar y tostar el grano de café pergamino en una sola operación, ésta recibe el nombre de "secado de granos de café en cama fluidizada^{la}", y consiste, básicamente, en forzar un flujo de aire caliente sobre una cama de granos de café. El resultado más importante es la distribución más uniforme del calor en los granos; esto se debe al continuo movimiento a que se ven sometidos. Experimentos realizados en un prototipo de secador de granos, que utiliza esta técnica, y que utiliza aire calentado eléctricamente, para secar 2 Kg de café Kona de 53 al 12% de contenido de humedad, utilizó un tiempo de 2.75 horas. Entre este tiempo de secado y los tiempos de secado utilizados en los métodos mencionados anteriormente, existe una gran diferencia, que puede ser de 17 horas a una semana lo cual depende del método. También, al comparar las características del grano de café secado con este método y el secado comercialmente, los resultados fueron altamente satisfactorios.

CAPITULO 3

SECADO INFRARROJO DE CAPE.

En este capítulo se hace una revisión de los antecedentes sobre la aplicación de la radiación térmica infrarroja en el tratamiento térmico de los alimentos y, con particular énfasis en el secado de granos de café. Asimismo, casi al final del capítulo, se mencionan los argumentos que justifican la realización de este trabajo.

3.1 Generalidades y antecedentes sobre la aplicación de la radiación térmica infrarroja en el procesamiento térmico de alimentos.

Los productos alimenticios que se someten a tratamiento térmico son en general cuerpos con capilaridades coloidales, y están constituidos por proteínas, almidones, grasas, celulosas, azúcares y agua, entre otros. Es importante hacer notar que el agua es uno de los componentes más abundantes en estos productos, y es el que disminuye a medida que progresa el tratamiento térmico de los mismos.

El procesamiento térmico de alimentos por medio de radiación térmica infrarroja es un fenómeno bioquímico y de transferencia de calor y masa bastante complejo, debido a que involucra no sólo las propiedades ópticas y termofísicas, sino también las propiedades biológicas y fisico-químicas de los alimentos las cuales cuando menos deben de conservarse, para de esta manera mantener la calidad y el valor nutritivo de éstos.

Trabajos reportados sobre este particular⁷ muestran que es característico de la radiación térmica infrarroja de onda corta el penetrar a determinada profundidad dentro de los materiales húmedos, lo cual es resultado de los componentes que los

constituyen, del grado de concentración de cada uno de ellos y de su estado de agregación. Para el caso de los productos alimenticios, se ha determinado que las proteínas, almidones, grasas, celulosas y algunos otros componentes son más o menos permeables a la radiación térmica infrarroja. Asimismo, se ha determinado que en estos productos la profundidad de penetración de los rayos infrarrojos depende, en general, fuertemente del contenido de agua y de la longitud de onda de la radiación. Por ejemplo, experimentos realizados por E.R. Sezal⁷ muestran el efecto de éstos factores sobre la transmitancia de la pasta de tomate cuando esta se somete a tratamiento por radiación térmica infrarroja (tabla 3.1).

Tabla 3.1. Transmitancia de la pasta de tomate a la radiación térmica infrarroja.

ω	λ	e	τ
Efecto del espesor de la muestra.			
0.85	1.075	0.5	55.8
0.85	1.075	1.0	44.2
0.85	1.075	2.0	26.4
Efecto de la longitud de onda.			
0.85	1.075	0.5	55.8
0.85	1.190	0.5	46.7
0.85	1.35	0.5	38.5
0.85	3.4	0.5	30.8
Efecto del contenido de humedad.			
0.85	1.075	0.5	55.8
0.70	1.075	0.5	91.4
0.60	1.075	0.5	95.0

ω -humedad en %; λ -longitud de onda en μm ; e y τ -espesor y transmitancia en mm y %.

Puesto que el agua es uno de los componentes más importantes en los productos alimenticios, merece importancia especial la descripción de su comportamiento con respecto a la radiación térmica infrarroja. La figura 3.2, de Ashkinase⁷, muestra el comportamiento de la transmitancia del agua en diferentes espesores, con respecto a la radiación térmica infrarroja.

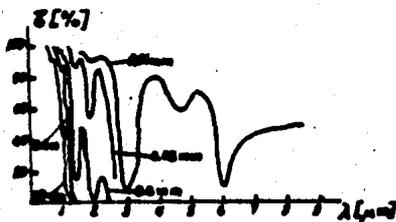


Fig. 3.2 Efecto de la longitud de onda sobre la transmitancia del agua con espesores diferentes.

Esta figura muestra claramente que la transmitancia del agua con espesores diferentes en general disminuye al aumentar la longitud de onda de radiación.

Este comportamiento del agua respecto a la radiación térmica infrarroja explica el porqué la transmitancia tanto de la pasta de tomate, vista en párrafos anteriores, como en algunos

otros productos alimenticios decrece cuando su contenido de agua aumenta y viceversa. La tabla 3.3 muestra la profundidad de penetración, en valores aproximados, de los rayos infrarrojos dentro de diversos materiales, algunos de ellos productos alimenticios.

Tabla 3.3

Material	Profundidad de penetración*	$\lambda_{\text{máx.}}$	Autor
Fibra de celulosa	pocos mm.	1	W.Jubitz
Granos de trigo	2 mm.	1	B.W.Damman
Harina de sal	2 mm.	1	W.Jubitz
Piel humana	10 mm.	1	"
Manzanas	4.1 mm.	1.16	Esselbergs,
	5.9 mm.	1.65	W.Mohr,
	7.4 mm.	2.35	J.Kemp
Cerámica quemada ligeramente	2.8 mm.		P.D.Lebedev
Empanada de centeno	7 mm.	1	"
Papa húmeda	6 mm.	1	"
Tejido de algodón	Sobre 4 hojas	"	"
Papel de cigarro	Sobre 8 hojas	"	"
Película fotográfica	" 5 "	"	"
Arena de cuarzo	5 mm.	"	"
Pasta de macarrón	2.2-2.5 mm.		I.S.Mel'nikova
Mermelada	Aprox. 1/3 de los rayos penetran	"	N.Belostotskii L.K.Janson

Continuación.

Hielo hecho de agua destilada	30 mm.	0.88	E.I.Guigo
Agar (50%)	15 mm.	2	"
Empanada de centeno	7 mm.	"	"
Biscocho seco	12 mm.	"	"
Papa seca	15-18 mm.	"	"
Empanada de trigo	11-12 mm.	1	O.I.Roslyakova A.S.Ginzburg
Pasta de trigo (W=44%)	4 mm.	"	"
Pasta de Ucrania	18-20 mm.	"	A.T.Lisovenko A.A.Mikhelev
Pasta de trigo grado 1	6 mm.	"	"
Vegetales y frutas húmedas	1 mm, =60-70% 10 mm, =12-18% 30 mm, = 0.5% considerando la energía radiante dispersada	0.6-1.1 " "	N.G.Selyukov, A.S.Ginzburg, V.V.Krasnikov
Biscocho seco	4 mm.	1	A.V.Likov, L.Ya.Auerman
Zanahoria	1.5 mm.		A.V.Likov, N.A.Bobkova
Pasta de tomate (W=70-85%)	1 mm.	1	E.R.Segal

*aproximadamente.

En fechas recientes, la aplicación de la radiación térmica infrarroja como método individual o combinado con algún otro u otros métodos (p.ej. métodos convectivos, métodos de alta frecuencia, secado por sublimación, etc.), ha adquirido una notable importancia en el tratamiento térmico de alimentos⁷ (p.ej. secado, calentamiento, tostado, horneado, etc.); tan es así

que, el campo de aplicación que este método ha alcanzado dentro de la rama alimenticia es tan amplio y tan variado que, por ejemplo, se puede hablar de: secado de granos (maíz, trigo, cebada, etc.), secado de semillas (coliflor, cebolla, zanahoria, haba forrajera, alfalfa, etc.), secado de frutas (manzanas, peras, ciruelas, duraznos, uvas y platanos), secado de vegetales (zanahorias, tomates, papas, espinacas, nabos, col y perejil), tratamiento térmico de harinas (maíz y trigo), secado de malta de cebada y centeno, secado de alimentos en pasta, secado de ácido tartárico, secado y tratamiento térmico de carne, secado y tratamiento térmico de pescado, tostado de granos de cocoa, tostado de almendra y cacahuete, tostado de ajonjolí, horneado de pan, etc. Esto es resultado principalmente de lo siguiente:

- a) la rapidez del proceso es mayor en comparación con los métodos convencionales de tratamiento (p.ej. métodos convectivos),
- b) el límite máximo de temperatura permisible en el producto durante el proceso, establecido por los métodos convencionales, se desplaza en dirección creciente sin dañar la calidad del producto, lo cual es resultado de la corta duración del proceso, y
- c) simultáneamente al proceso básico de tratamiento térmico, se realiza un proceso de desinfección en el producto, resultado tanto de la mayor densidad de energía térmica incidente en el producto como de la mayor capacidad de absorción de la radiación infrarroja de onda corta que tienen los productos infectados generalmente de color más oscuro que los productos en estado normal.

Además de las particularidades mencionadas, existen algunas otras que son características del proceso y del producto.

Como ejemplo se pueden mencionar las siguientes:

- El tratamiento infrarrojo de harina verde y fresca acelera su madurez, y además mejora las propiedades del pan horneado hecho con esta harina (p.ej. se encontró que tanto el volúmen del pan como la compresibilidad de la migaja y la porosidad del pan aumentaron, y las propiedades del pan horneado se conservaron por un largo periodo de tiempo (3 meses)). Asimismo, este tratamiento aplicado a la harina subestandar mejoró notablemente su calidad.
 - El secado infrarrojo de semillas duras, tales como : haba forrajera, alfalfa, etc., dió por resultado semillas con mayor capacidad de germinación. Este resultado se le atribuye al tratamiento térmico más intenso y más uniforme a que es sometido el material, a consecuencia de la capacidad de penetración de la radiación infrarroja de onda corta dentro del material y de la densidad de energía incidente en el producto, con lo cual se le modifica su estructura interna e incrementa así la permeabilidad de la cápsula de las semillas, que finalmente establece la capacidad de germinación de estas.
 - Al comparar el secado mediante radiación infrarroja con el método convectivo convencional, de productos en pasta, se observó:
 - menor consumo específico de energía,
 - menor personal utilizado,
 - y menor área de instalación.
- Por otro lado al combinar este método con el método convectivo se obtuvo un producto de mayor calidad, y además se observó una ligera reducción en la duración del proceso.
- En el tratamiento térmico y secado de pescado, las pérdidas

das se redujeron de un 30% a 20-22% con respecto al método convencional de tratamiento. Adicionalmente, se obtuvo un producto de calidad excelente (el color, el brillo de las escamas y forma del pescado se retienen), y el costo se redujo a un 70% del costo del tratamiento realizado en un horno encendido por aceite combustible.

- El tratamiento térmico infrarrojo en algunos granos (p. ej. maíz, cebada y centeno) se ha utilizado para mejorar algunas de sus propiedades, por ejemplo se puede mencionar que el proceso de torrefacción realizado mediante radiación infrarroja da por resultado un proceso más rápido y más barato, una producción más alta de almidón y un color más claro, estas dos últimas particularidades de gran importancia en la industria para la producción de alcohol o de cerveza clara, según sea el caso. Adicionalmente y de acuerdo con estos resultados, este método evita la destrucción de proteínas y en algunos casos aumenta el contenido de las mismas. Este logro es muy importante para la producción de productos de alimentación animal pero no para fines de brebaje.
- El tostado de ajonjolí mediante radiación infrarroja, da por resultado una mayor calidad, un color amarillo y un sabor más agradable, en comparación con los métodos convencionales.
- El tratamiento infrarrojo de frutas y vegetales muestra:
 - . una alta calidad en el producto,
 - . no se requiere un tratamiento previo y
 - . se requieren instalaciones de gran simplicidad.

Por lo anterior, es fácil observar y deducir que el tratamiento térmico de productos alimenticios mediante radiación

térmica infrarroja, constituye un método de una potencialidad extraordinaria para el tratamiento térmico de algunos de éstos, insustituible por algún otro, y el cual puede utilizarse como método único o como método complementario.

3.2 Antecedentes sobre secado de granos de café mediante radiación térmica infrarroja.

Hasta esta fecha, solamente la Facultad de Ingeniería, UNAM ha reportado un trabajo sobre secado de granos de café mediante radiación térmica infrarroja ^{8, 7, y 8}, siendo éste de tipo experimental. En este trabajo se determinaron tanto las propiedades radiantes de los granos como la curva de secado. Para ello, se utilizó como fuente de radiación infrarroja a una resistencia eléctrica la cual estaba colocada sobre una placa plana de transite (asbesto-cemento) de 0.2x0.2 m., y una muestra de granos de café de 365 gr. ($\omega=49.7\%$) la cual se introdujo en una malla de alambre. La posición relativa entre ambos se muestra en la figura 3.4.

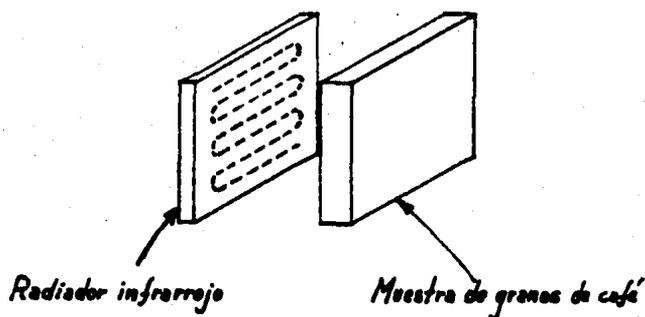


Figura 3.4

La medición de temperatura en los granos de café se realizó por medio de un termopar el cual se insertó en un grano colocado en la superficie de la muestra; la medición de humedad se hizo de manera indirecta, a través de la pérdida de peso de la muestra la cual se registraba en una báscula de precisión; la emitancia se determinó también de manera indirecta y para ello se utilizó un radiómetro de termopila.

Descripción de los experimentos: la muestra de café se colocó a una distancia de 0.02 m del generador de radiación infrarroja (fig. 3.4) durante 30 min., transcurrido este tiempo se medía la temperatura de los granos. Posteriormente, se obstruía el flujo de radiación hacia la muestra, haciendo uso de una compuerta, y enseguida la muestra se giraba 180°, de esta manera la superficie caliente de la muestra quedaba justamente frente a la termopila en la que se realizaba la medición del voltaje; finalmente, la muestra se colocaba sobre la báscula y se medía su peso, enseguida se colocaba la muestra de café frente al generador de radiación y se permitía el flujo de energía radiante hacia ésta. Este procedimiento se repitió cada media hora, y se dió por finalizado el proceso de secado cuando el peso de la muestra se mantuvo constante. La alimentación de energía eléctrica a la resistencia se mantuvo constante durante toda la prueba.

Resultados obtenidos: las figuras 3.5, 3.6, 3.7 y 3.8 muestran la variación con el tiempo de la emitancia y la temperatura de los granos de café situados en la superficie de la muestra, y de la humedad y de la masa total de la misma, respectivamente.

Los cálculos tanto de emitancia como de la humedad se realizaron de la manera siguiente:

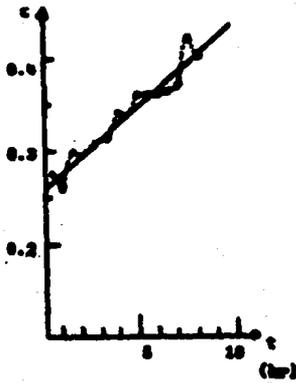


Fig. 25 Variación de la entonía en función del tiempo. (Datos tomados el día 20 de junio de 1979)

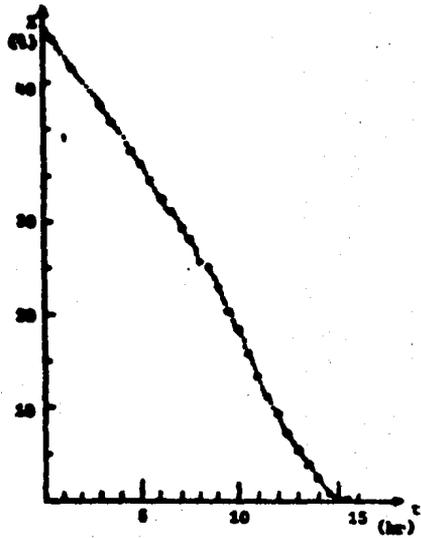


Fig. 26 Variación de la humedad en función del tiempo

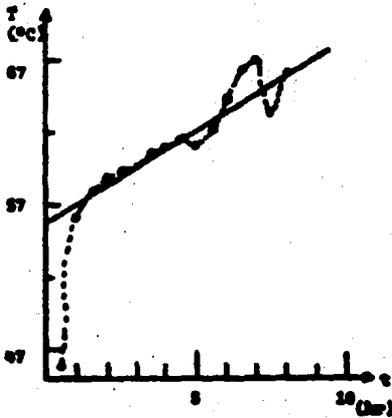


Fig. 27 Variación de la temperatura del grano tuestado cada media hora en función del tiempo. (Datos tomados el día 20 de junio de 1979)

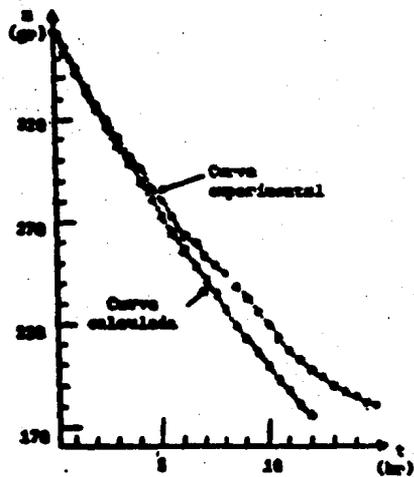


Fig. 28 Variación de la masa total de café

a) Emitancia.

Puesto que el voltaje del radiómetro es proporcional a la potencia emisiva del cuerpo emisor; es decir,

$$V_A \propto E = \sigma \epsilon A (T_c^4 - T_a^4) \quad (3.9)$$

entonces, realizando el cociente entre la potencia emisiva del café y la placa negra se obtiene,

$$\frac{E_c}{E_p} = \frac{\epsilon_c (T_c^4 - T_a^4)}{\epsilon_p (T_p^4 - T_a^4)} \quad (3.10)$$

y por lo tanto

$$\frac{V_c}{V_p} = \frac{\epsilon_c (T_c^4 - T_a^4)}{\epsilon_p (T_p^4 - T_a^4)} \quad (3.11)$$

Suponiendo que $\epsilon_p = 0.95$, de la ecuación (3.11) se obtiene

$$\epsilon_c = 0.95 \frac{V_c (T_p^4 - T_a^4)}{V_p (T_c^4 - T_a^4)} \quad (3.12)$$

b) Contenido de humedad.

$$W_h = \frac{W - W_s}{W_h} \times 100 \quad (3.13)$$

El uso de este método en el secado de granos de café muestra claramente dos aspectos importantes:

Un tiempo de secado de 11 hrs., aproximadamente.

Al comparar este tiempo de secado con el tiempo de secado utilizado por métodos tradicionales, se observa una notable reducción que va desde un 50% hasta un 70%. Desde luego, es importante mencionar que el tamaño de la muestra procesada por este método es muy pequeña en comparación con el tamaño de muestra procesada por métodos conven-

cionales.

El grano de café conserva sus propiedades.

El análisis organoléptico (realizado por medio de catación) realizado sobre esta muestra arroja resultados que comparan satisfactoriamente con el café comercial; por lo que, se concluye que las propiedades de los granos de café se conservan.

3.3 Propuesta de nuevos experimentos.

Siguiendo la misma línea de muestra de granos de café en cama estática es indudable que la conclusión definitiva sobre el uso de la radiación térmica infrarroja en el proceso de secado carece de suficiente información experimental. Esto se hace evidente por lo siguiente:

- a) En todos los procesos térmicos de alimentos, y dependiendo muy fuertemente del tipo de alimento y de la técnica de procesamiento utilizada, existe un conjunto de parámetros óptimos de tratamiento o parámetros de proceso. Por ejemplo: temperatura del producto, tiempo de duración del proceso, temperatura y velocidad del aire cuando se utilizan métodos convectivos, distribución espectral e intensidad de radiación cuando se utilizan métodos de radiación térmica, etc.
- b) El conocimiento de los parámetros óptimos de secado del grano de café utilizando radiación térmica infrarroja requieren de:
 - i) Una variedad de condiciones. Por ejemplo: diferentes distribuciones espectrales de radiación (diferentes temperaturas del radiador), diferentes intensidades de radiación pero con la misma distribución espectral, diferentes espesores de cama de granos de café, diferentes contenidos de humedad

inicial en la muestra, etc.

ii) Pruebas organolépticas.

iii) Análisis químico de los elementos constituyentes del grano.

Por otro lado, es por todos conocido el problema que en materia energética vive el mundo, por lo que siempre es bien vista la utilización de fuentes de energía diferentes a las convencionales.

El procesamiento térmico de alimentos y en particular el secado de granos de café, también debería hacer suya esta idea. Como se recordará, una de las utilidades que se le da a uno de los subproductos del procesamiento del grano de café mediante la técnica húmeda, es la producción de gas biológico (biogas, con un 50% de gas metano), por reacción anaeróbica, a partir de la pulpa de café, por lo que, sería muy interesante incluir en los experimentos de secado de estos granos por medio de radiación térmica infrarroja, el uso de gas combustible como fuente de energía; es decir, utilizar generadores de radiación térmica infrarroja que trabajan con gas combustible.

Por todo lo anterior, se ha considerado conveniente realizar otros experimentos más complejos, los cuales proporcionen información adicional sobre la aplicación de este método en el secado de granos de café, para de esta manera disponer de más argumentos que permitan hablar sobre la factibilidad de su uso.

CAPITULO 4

DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL APARATO DE LABORATORIO PARA SECAR GRANOS DE CAFE MEDIANTE RADIACION TERMICA INFRARROJA.

En este capítulo se describen en detalle los objetivos de este aparato, la metodología de su diseño y los detalles de su construcción.

4.1 Objetivos del aparato secador.

- a) Determinar la posibilidad del uso de la radiación térmica infrarroja en el proceso de secado de granos de café.
- b) Determinar experimentalmente la emitancia del grano de café, y su evolución en el progreso del secado.

4.2 Metodología de su diseño.

4.2.0 Concepción del aparato.

Para lograr los objetivos mencionados se propuso experimentar con muestras de granos de café contenidos en una cama vertical estática, y con las siguientes restricciones:

- Contenidos de humedad diferentes (40,60 y 80%, referidos a la base seca).
- Espesores de cama diferentes (0.0254, 0.0381 y 0.0508 m).
- Temperaturas e intensidades de radiación diferentes.

Adicionalmente, es importante mencionar el interés existente sobre la posible mejora en precisión de la medición de la emitancia del grano de café, y el uso de radiadores infrarrojos de gas como fuentes de energía.

La consideración detallada de lo anterior y de algunos otros factores (p.e. detalles de construcción, disponibilidad de equipo, etc.) permiten seleccionar el siguiente aparato (figura 4.1) para secar los granos de café.

Algunas de las características importantes de este aparato son las siguientes:

- La muestra de granos de café puede ser de diferente forma y tamaño, y se puede radiar por uno o por ambos lados.
- Permite disponer de diferentes temperaturas en el radiador, con sólo regular los flujos de aire y gas.
- Los radiadores infrarrojos se pueden alejar o acercar hacia la muestra.
- Tanto la introducción de algún aparato de medición como la observación y realización del experimento se pueden hacer con facilidad.

4.2.1 Métodos para la medición de humedad y emitancia del grano de café.

- El método seleccionado para la medición de humedad de los granos, es una variante del método termogravimétrico (apéndice 4, sección A4.2), el cual es muy fácil de aplicar y de muy buena exactitud. Este método utiliza como elemento básico una báscula la cual se instala

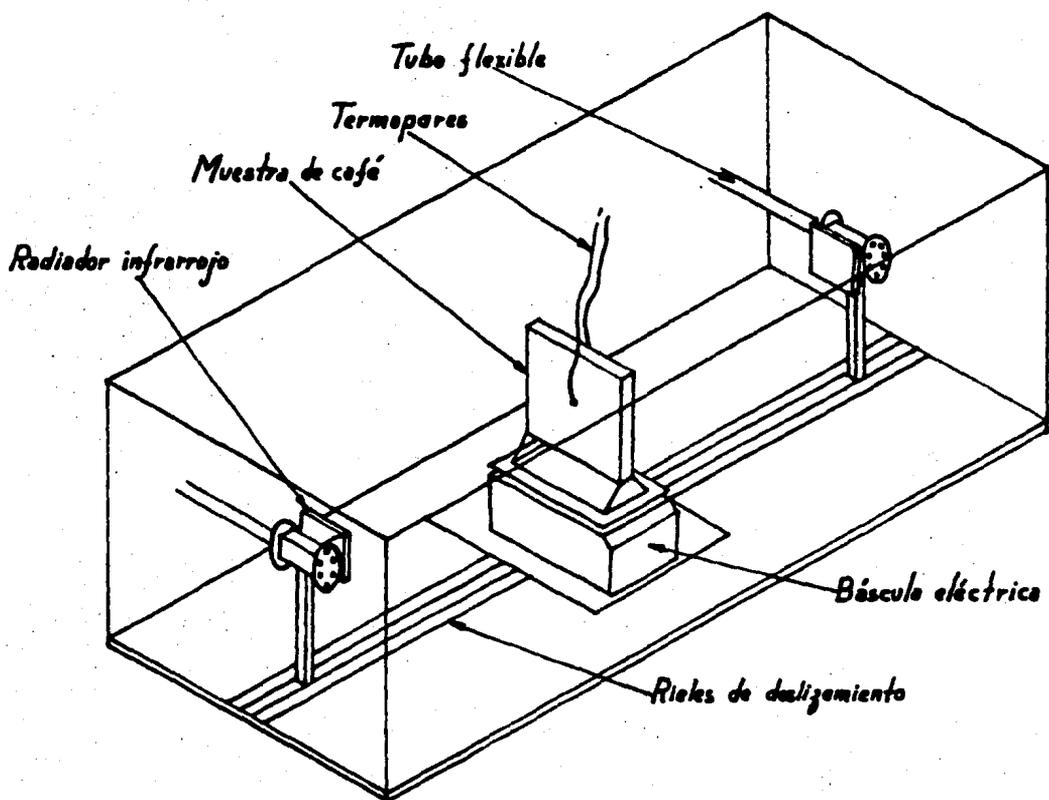


Figura 4.1
Aparato de laboratorio para secar granos de café.

directamente en el aparato secador, y la humedad se determina por la diferencia de peso de la muestra.

- El dispositivo a utilizar en la medición de la emitancia de los granos, es un radiómetro de termopila (apéndice 4, sección A4.1) el cual se ha calibrado para realizar mediciones en el rango infrarrojo (apéndice 5, sección A5.2).

4.2.2 Selección de los radiadores infrarrojos.

El criterio de selección de los radiadores se fundamenta en dos aspectos básicos:

- a) Los radiadores infrarrojos deben de utilizar gas combustible para su operación.
- b) La cantidad de energía radiante incidente sobre la muestra de granos de café debe ser 745 w/m . Este dato se tomó de la referencia⁸ , debido a que en estos experimentos se pretenden utilizar tanto tiempos de secado como muestras de café de tamaño muy similares a los utilizados en experimentos ya mencionados.

En la actualidad, en el mercado existen diferentes tipos de radiadores infrarrojos (apéndice 3), pero en particular el mercado nacional ofrece dos tipos de radiadores infrarrojos que funcionan con gas combustible (tabla 4.2).

Estos radiadores tienen la característica de trabajar de

manera satisfactoria con gas propano o con gas L.P., y además con una mezcla aire-gas combustible al 100%.

Tabla 4.2 Tipos de radiadores infrarrojos que funcionan con gas combustible, marca ECLIPSE.

Tipo	126 IG-A	66 IG-A	Presión de mezcla.
Dimensiones	0.3048 0.1524	0.1524 0.1524	
Capacidad	1934.46	967.23	1.016
Temperatura	1033.15	1033.15	
Capacidad	2872.38	1436.19	2.794
Temperatura	1074.82	1074.82	
Capacidad	3575.82	1787.91	4.004
Temperatura	1102.60	1102.60	
Capacidad	4220.64	2110.32	5.334
Temperatura	1130.37	1130.37	
Capacidad	4924.08	2462.04	6.604
Temperatura	1158.15	1158.15	
Capacidad	5510.28	2755.14	7.112
Temperatura	1172.04	1172.04	
Capacidad	5627.52	2813.76	8.128
Temperatura	1185.93	1185.93	
Capacidad	5862.00	2931.00	8.382
Temperatura	1199.82	1199.82	

* Dimensiones en m, Capacidad en w, temperatura en K, y presión de mezcla en cca.

** Usando gas natural (gravedad específica 0.6) y orificio ajustable totalmente abierto.

Al observar la tabla 4.2 resulta evidente que el radiador más apropiado es el 66 IG-A, debido a que, si se toma como base su capacidad mínima de operación (41644.7 w/m^2) ésta supera por mucho los 745 w/m^2 de energía incidente sobre la muestra, por lo tanto, el radiador infrarrojo seleccionado es el 66 IG-A.

El fabricante recomienda utilizar como dispositivo mezclador, para usar en estos radiadores, un inyector atmosférico de alta presión, y en particular el siguiente:

inyector atmosférico de alta presión, marca ECLIPSE.

Modelo Capacidad para gas propano

H-50 0.708 m³/hr.

4.2.3 Dimensionamiento del secador de granos de café.

El criterio en el que se fundamenta el dimensionamiento del presente secador es el siguiente:

- a) Se consideran únicamente los fenómenos de transporte de calor por radiación.
- b) La cantidad de energía radiante incidente sobre la muestra de granos de café debe ser de 745 w/m².
- c) Debido a que, los fenómenos de transporte de calor por radiación son importantes en sistemas con temperaturas altas (p.ej. superiores a los 473.15 o 573.15 K), y que todos los cuerpos que forman el secador, a excepción de los radiadores infrarrojos y la muestra de granos de café, durante el proceso de secado alcanzan temperaturas ligeramente superiores a la atmosférica, entonces, se considera que los únicos cuerpos que intercambian calor por radiación son la muestra de granos y los radiadores infrarrojos. Además de la consideración anterior se tienen las siguientes:

- Análisis en estado permanente.
- El aire atmosférico es transparente a la radiación infrarroja.
- Los cuerpos que intercambian calor se consideran como

cuerpos grises, opacos y que emiten y reflejan la radiación en forma difusa.

Considerando el conjunto de simplificaciones del inciso (c), y haciendo uso de la teoría de radiación se obtiene:

$$Q_{nc} = \frac{\sigma (T_r^+ - T_c^+)}{\frac{1-E_r}{A_r E_r} + \frac{1}{A_r F_{nc}} + \frac{1-E_c}{A_c E_c}} \quad (4.3)$$

donde: r - radiador infrarrojo.

c - muestra de granos de café.

Q_{nc} - flujo de calor entre r y c .

T_r - temperatura del radiador.

T_c - temperatura promedio del grano.

E_r - emitancia promedio del radiador.

E_c - emitancia promedio del grano.

A_r - área del radiador.

A_c - área de la muestra de granos de café.

F_{nc} - factor de forma difuso entre el radiador y la muestra de granos de café.

Puesto que A_r y A_c son casi iguales, entonces, se considera que $A_r = A_c = 0.0225$ m, y por lo tanto la ecuación (4.3) se puede escribir de la manera siguiente:

$$Q_{nc} = \frac{Q_{r-c}}{A_c} = \frac{\sigma (T_r^+ - T_c^+)}{\frac{1-E_r}{E_r} + \frac{1}{F_{nc}} + \frac{1-E_c}{E_c}} \quad (4.4)$$

En la ecuación (4.4) se observa que:

a) Q_{nc} , T_c y E_c son datos tomados de la referencia

b) T_r es un dato proporcionado por el fabricante.

c) ϵ_r es un valor desconocido, y por lo tanto debe de estimarse. El criterio a seguir para el cálculo de su valor es el siguiente: puesto que la cara del radiador es una placa plana porosa de cerámica sobre la cual se encuentra una rejilla de alambre de Inconel (níquel 80%, cobre 14% y hierro 6%), entonces, realmente la superficie emisora del radiador es una superficie compuesta por la cerámica, la rejilla de alambre y la llama de combustión. Sin embargo, debido a que la llama tiene una longitud muy pequeña (0.002-0.003 m) y es muy poco luminosa, entonces, la emitancia de la superficie radiante del radiador se le puede calcular en forma aproximada de la manera siguiente:

$$\epsilon_r = 0.43 \epsilon_{ce} + 0.57 \epsilon_a \quad (4.5)$$

donde: ϵ_{ce} - emitancia de la cerámica.

ϵ_a - emitancia de la rejilla de alambre.

d) El factor de forma F_{r-c} es el único parámetro desconocido en la ecuación (4.4), y además es el que relaciona las propiedades geométricas y la posición relativa de los cuerpos que intercambian calor por radiación.

El factor de forma entre el radiador y la muestra de café, cuyas dimensiones y posición relativa se muestran en la figura 4.7, esta determinado por la siguiente ecuación:

$$F_{rc} = \frac{2}{\pi x^2} \left\{ \int_0^x \left[\frac{(1+x^2)}{1+2x^2} \right]^{1/2} + 2x\sqrt{1+x^2} \tan^{-1} \left(\frac{x}{\sqrt{1+x^2}} \right) - 2x \tan^{-1} x \right\} \quad (4.5)$$

$$x = \frac{a}{D}$$

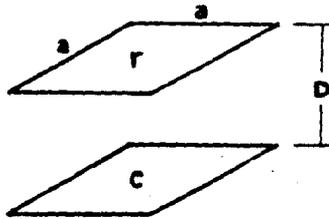


Figura 4.7

Como resultado de lo descrito en párrafos anteriores, se concluye que el único parámetro desconocido es la distancia D entre el radiador infrarrojo y la muestra de café.

Sustituyendo la ecuación (4.6) en la ecuación (4.4), y además sustituyendo los valores de cada uno de los parámetros en la ecuación resultante, se obtiene:

$$\frac{1}{F_{r-c}} = 93.541 \quad (4.8)$$

De esta ecuación, mediante un proceso iterativo, se obtiene que:

$$D = 0.76 \text{ m}$$

NOTA: la sustitución, el cálculo numérico de algunos parámetros y de la distancia D se describen en detalle en el apéndice 6, sección A6.1.

Esta distancia D permite dimensionar totalmente el secador

de granos de café (figuras 4.9 y 4.10).

4.2.4 Diseño y cálculo de la instalación de gas combustible.

El presente diseño se fundamenta en lo siguiente:

a) Tipo de gas combustible.

En la sección 4.2.2 se mencionó que, los radiadores infrarrojos seleccionados pueden trabajar con cualquier tipo de gas. Por esta razón, debido a que es más fácil conseguir gas L.P. que cualquier otro, se elige a éste para su operación.

b) Flujo de gas L.P. y presión de trabajo.

En general, el cálculo de las instalaciones que trabajan con gas L.P. se hace sobre la base de que, se trata únicamente de gas propano, pues como se sabe, el gas L.P. es una mezcla de gases hidrocarbonados (propano y butano, entre otros).

Según el fabricante:

- 1) Un radiador infrarrojo 66 IG-A funcionando a máxima capacidad consume $0.113 \text{ m}^3/\text{hr}$ de gas L.P. a condiciones estandar; por lo tanto, si se trata de dos radiadores, el consumo total de gas es

$$V = 0.226 \text{ m}^3/\text{hr}$$

- ii) La presión de trabajo de los inyectores atmosféricos de alta presión seleccionados es:

$$P = 1.76 \text{ kg/cm}^2$$

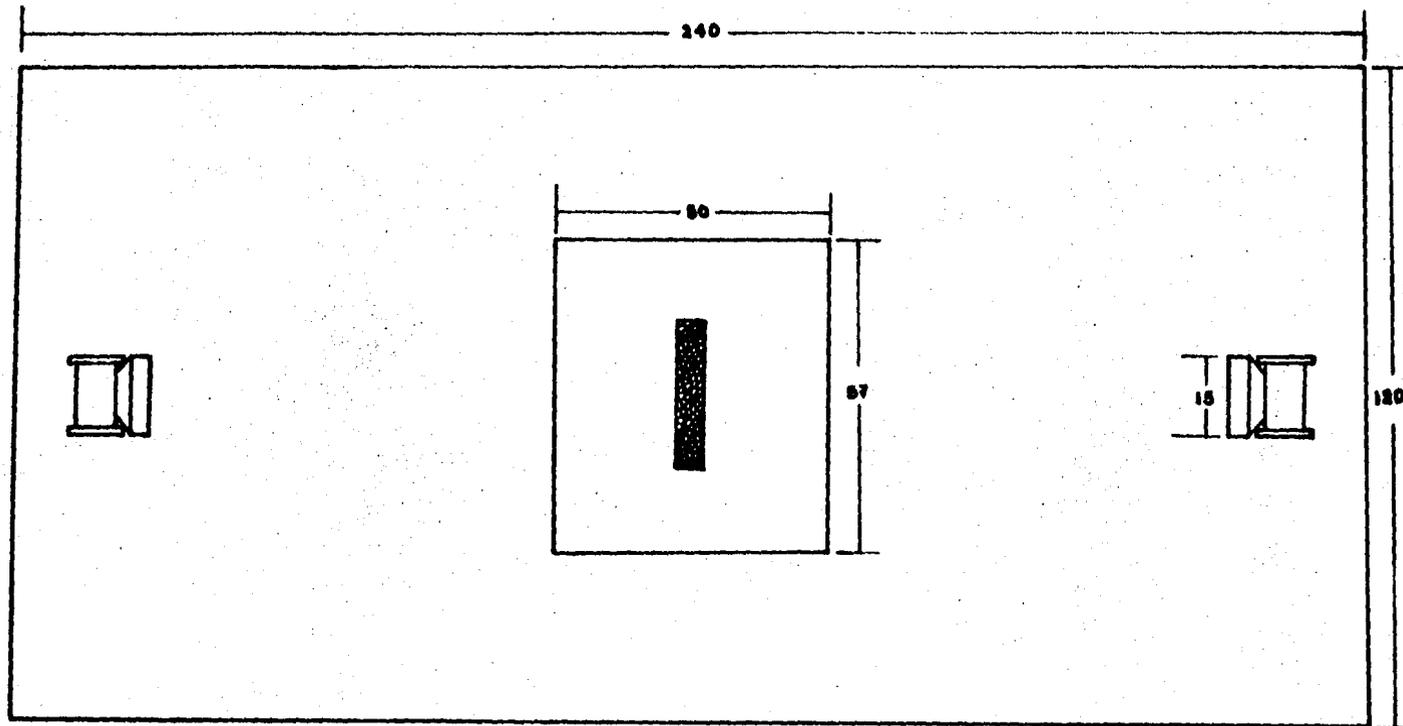
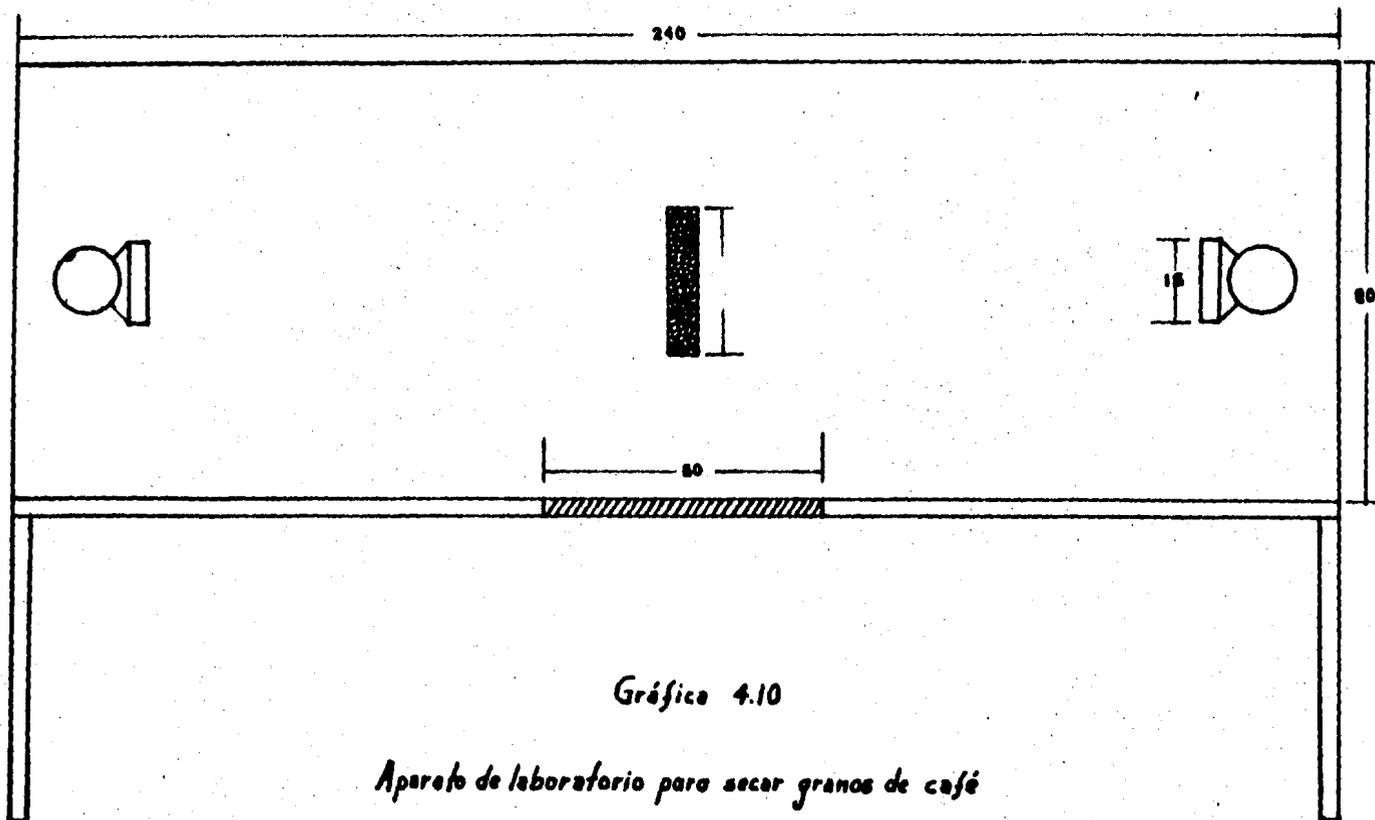


Figura 4.9
Aparato de laboratorio para secar granos de café.

Visto en planta
Acot. en cm.



Vista lateral
Acot. en cm.

c) Diseño y cálculo de: tuberías, reguladores de presión y rotámetros.

- Tuberías.

En el cálculo de tuberías para alta presión en instalaciones de gas, la Secretaría de Industria y Comercio no impone restricción alguna sobre la caída de presión del gas entre el regulador de presión y los aparatos de consumo ; por esta razón, el diámetro de la tubería no es un parámetro de mucha importancia en comparación con la resistencia de la misma.

Considerando lo anterior y además la facilidad de instalación que tiene el tubo de cobre rígido tipo L, se elige el siguiente diámetro, que es el mínimo comercial.

Tubo de cobre rígido tipo L, $D' = 1.27 \text{ cm} = 1/2 \text{ in.}$

Verificación de la caída de presión.

En general, la pérdida de presión en conductos cerrados se determina por medio de la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$\Delta P = f \frac{L}{D'} \frac{V^2}{2g} \quad (4.11)$$

donde: ΔP - pérdida de presión

f - factor de fricción

L - longitud del tubo

D' - diámetro del tubo

V - velocidad del flujo

g - aceleración de la gravedad.

Realizando algunas operaciones algebraicas, que involucran los pesos especificos del gas a diferentes presiones de interés e introduciendo el factor $f = 0.0226$, recomendado en tuberias con diámetro menor a 8 cm², en la ecuación (4.11) se obtiene:

$$P_1^2 - P_2^2 = 0.03707 \frac{sL G_o^2}{D^2} \quad (4.12)$$

donde: P_1, P_2 - presiones en la sección 1 y 2 [kg/cm²]
 G_o - gasto volumétrico [m³/hr]
 D - diámetro del tubo [m]
 s - gravedad especifica del gas
 L - longitud del tubo. [m]

Sustituyendo en la ecuación (4.12) los valores de G_o , D , s y L (figura 4.13), se obtiene que:

$$P_1^2 - P_2^2 = 0.2643 \times 10^{-4}$$

y por lo tanto, la pérdida de presión es:

$$P_1 - P_2 = 0.000088$$

NOTA: el desarrollo algebraico realizado sobre la ecuación (4.11), que conduce a la ecuación (4.12), y la memoria de cálculo se describen en detalle en el apéndice 6, sección A6.2.

- Regulador de presión.

El criterio para seleccionar este dispositivo es el siguiente:

- . Presión a la entrada
- . Presión a la salida
- . Gasto volumétrico

Por lo anterior, el regulador de presión seleccionado es el siguiente:

Regulador de presión modelo 67, marca FISHER.

Presión máxima a la entrada

Rango de presión a la salida

Capacidad 14.10 m³/hr

- Rotámetros.

Debido a que, se requiere controlar la temperatura de los radiadores infrarrojos, se debe tener un control preciso del flujo de gas, entonces, se tiene que usar algún dispositivo para tal objeto. Existen diferentes aparatos medidores de flujo; sin embargo, el que se considera más adecuado, a consecuencia de la precisión de flujos pequeños, es el rotámetro (ver apéndice 4, sección A4.3).

El criterio de selección de este rotámetro es el siguiente:

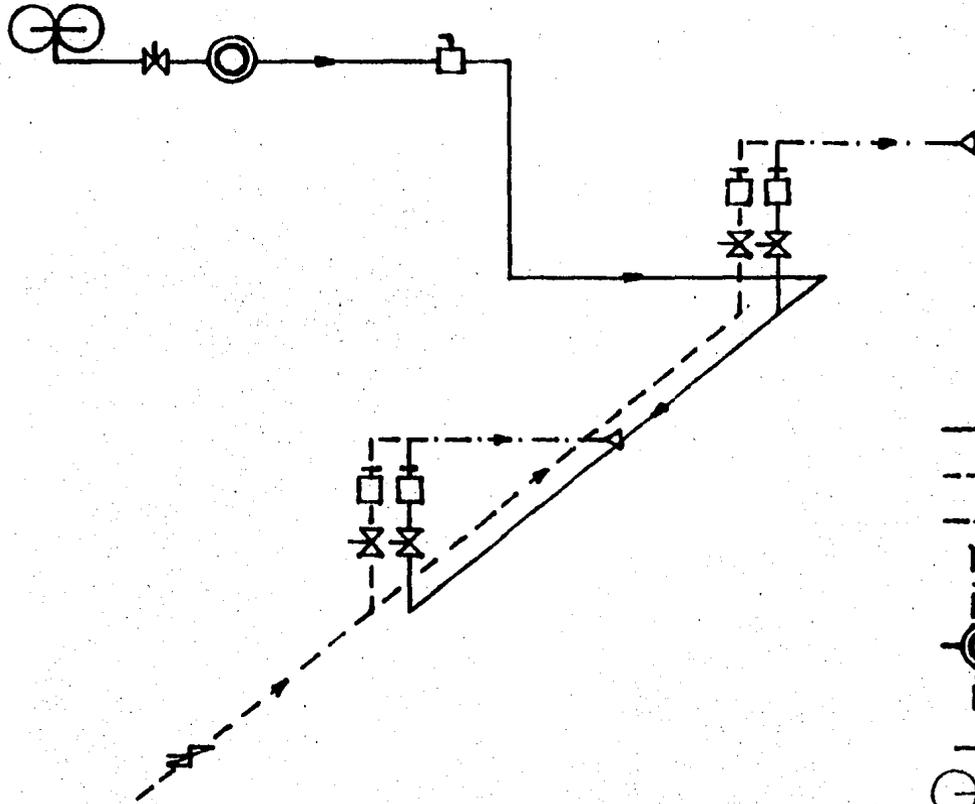
- . Presión mínima de operación
- . Capacidad mínima de operación

d) Diagrama de la instalación de gas L.P.

Este diagrama se muestra en la figura 4.13

Figura 4-13

Instalación de gas L.P. y aire comprimido



Simbología

- Línea de gas LP
- - - Línea de aire comprimido
- · - · Línea de mezcla aire-gas
- ⊗ Válvula de aguja
- ⊠ Llave de paso
- ⊙ Regulador de alta presión
- ⊡ Rotámetro
- ⊖ Radiador infrarrojo
- ⊗ Tanque portátil

4.3 Detalles de construcción.

Durante la construcción del secador de granos de café se presentaron algunos detalles que, debido a su importancia en el funcionamiento del mismo, a continuación se describen:

- Esta actividad se inició con la construcción de la mesa de trabajo; posteriormente, se realizó la construcción de la instalación de gas L.P., y el acoplamiento de los radiadores infrarrojos en ésta. A continuación, se revisaron y sellaron las fugas, y se dió principio al arranque del sistema. Justo en esta actividad se observó que los inyectores atmosféricos de alta presión funcionaban insatisfactoriamente, debido a que proporcionaban una mezcla aire-gas combustible con una gran insuficiencia de aire y, por lo tanto, nunca se formaba la llama de combustión sobre la superficie de la cerámica. A consecuencia de esto, se pidió asesoría al fabricante, y éste recomendó cambiar el tamaño del orificio del inyector, a través del cual sale el chorro de gas. Este cambio se realizó e inmediatamente se pusieron a funcionar los radiadores, resultando una vez más una mezcla con gran insuficiencia de aire. Debido a que, el cambio de orificio y el uso de diferentes presiones a la entrada del inyector, no solucionaba el problema de insuficiencia de aire en la mezcla, entonces, se propuso el uso de aire comprimido. Puesto que, al usar aire comprimido, la mezcla aire-gas se puede hacer de diferentes maneras y con diferentes dispositivos, se decidió no desechar los inyectores; por esta razón, después de probar diferentes lugares en el radiador y en el inyector, para alimentar el

aire, se optó por modificar sustancialmente al inyector y, en consecuencia, su principio de funcionamiento. Este cambio consistió en:

- . Eliminar el obturador de aire y el manómetro (figura 4.14).
- . Utilizar la misma ranura por donde entraba el aire atmosférico a consecuencia del arrastre originado por el chorro de gas, para introducir el aire comprimido. Para ello, se realizó la construcción de un cono de base circular, y se acopló al inyector de tal manera que la circunferencia mayor se puso en contacto con éste y la circunferencia menor se puso en contacto con la línea de alimentación de aire comprimido (figura 4.15).

Con esta modificación, el funcionamiento de los radiadores fué altamente satisfactorio y, por lo tanto, el problema de insuficiencia de aire se dió por terminado. Posteriormente, se procedió a calibrar el funcionamiento de los radiadores; es decir, determinar las presiones de trabajo (en aire, gas y mezcla), los gastos volumétricos (aire y gas) y las temperaturas de operación en los radiadores infrarrojos; el resultado fué el siguiente:

Gasto vol. en m³/hr.

Temperatura en K.

Gasto volumétrico		Temperaturas	
Aire	Gas	R.I.	R.D.
0.2212	0.017	963	963
0.9244	0.0498	1009	1009
1.1043	0.0226	1060	1060

NOTA: la temperatura de los radiadores infrarrojos se midió con un termopar tipo J (ver apéndice 4, sección A4.0) de vaina de acero el cual se colocaba, haciendo contacto, sobre la cerámica del radiador

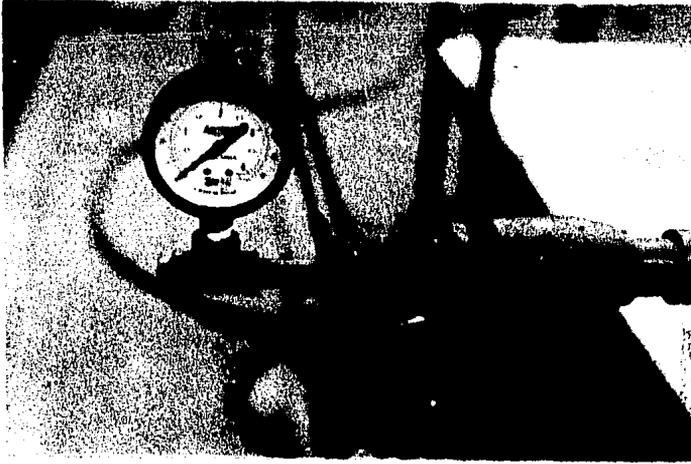


Figura 4.14 Inyector con manómetro y obturador de aire.

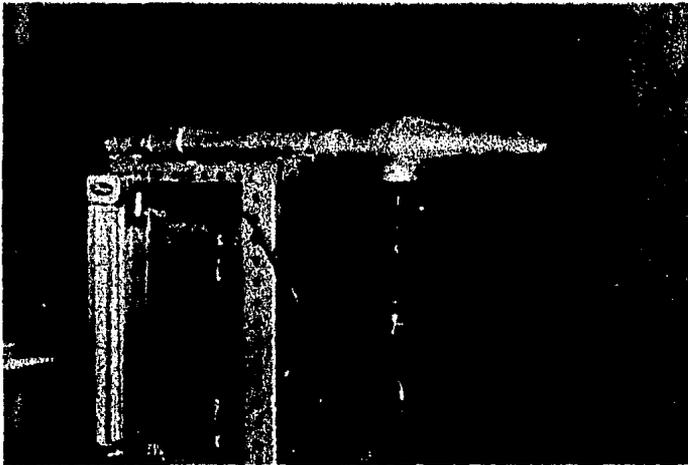


Figura 4.15 Inyector con alimentación de aire comprimido.

durante un tiempo mayor al transitorio.

- Como resultado del elevado costo de los rotámetros y la insuficiencia del presupuesto para este trabajo, no fué posible adquirir en su totalidad rotámetros ya calibrados para medir flujos de aire y de gas L.P. Por esta razón, se tuvo que realizar la calibración de un rotámetro para medir flujos de aire, y de instrumentar un método de calibración para medir flujos de gas L.P. En el apéndice 5, sección A5.1 se describen en detalle estos procedimientos.
- Debido a que en estos experimentos se pretende mejorar en precisión los valores de emitancia obtenidos en la referencia ¹³, entonces, se optó por construir y calibrar un radiómetro con mayor sensibilidad, en comparación al utilizado en la referencia mencionada. Para ello se utilizó como elemento sensor de la radiación térmica a una termopila (figura 4.16) la cual fué proporcionada por el Instituto de Geofísica, UNAM, cuyos materiales no fué posible conocer. Puesto que esta termopila no disponía de una inercia térmica considerable, ni de un obstáculo tal que impidiera la acción directa de las corrientes convéctivas, lo cual daba por resultado una respuesta en la termopila, aleatoria e inconsistente, entonces, se le acondicionó para corregir estas fallas (figura 4.17). Después de realizar esto, se observó que aún se presentaba un poco de inconsistencia en la respuesta de la termopila, resultado de contactos eléctricos no muy firmes y a la falta de una conexión a tierra. Corregidos estos detalles (figura 4.18), finalmente se obtuvo un radiómetro de termopila consistente en su respuesta. Posteriormente,

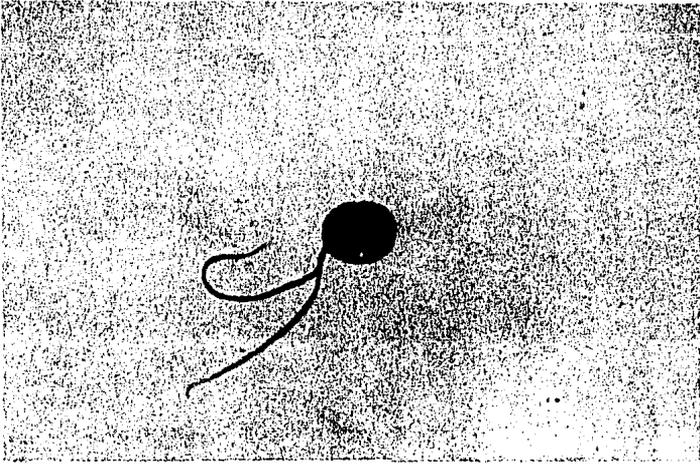


Figura 4.16 Termopila.



Figuras 4.17 y 4.18 Radiómetro con y sin tierra eléctrica, respectivamente.

se procedió a calibrarlo para la medición de emitancia en el rango infrarrojo. El método de calibración y su procedimiento se describen ampliamente en el apéndice 5, sección A5.2.

CAPITULO 5

RESULTADOS EXPERIMENTALES.

En este capítulo se describen en detalle el procedimiento de experimentación, los resultados obtenidos y el equipo utilizado.

5.1 Procedimiento de experimentación.

- Preparación de la muestra.

Puesto que el grano de café que se utilizó en los experimentos era grano seco, a consecuencia de la falta de disponibilidad (temporal) de granos húmedos que se obtienen en los lugares de beneficio de éste, entonces, era necesario rehumedecerlo. La humedificación de los granos se realizó introduciéndolos en un recipiente con agua en estado líquido, durante algún tiempo. El contenido de humedad requerido se determinó por medio del peso de la muestra. Esta humedad era aproximada debido a que se consideraba al grano de café seco con un 0% de contenido de humedad. Una vez obtenido el grano con la humedad requerida se procedió a preparar cinco granos de café con un termopar en cada uno de ellos. Este procedimiento consiste en insertar con mucho cuidado el termopar en el interior del grano, y además colocar una gota muy pequeña de pegamento para asegurar un contacto muy firme entre ellos durante todo el proceso de secado, figura 5.1.

Posteriormente, los granos de café húmedos se introdujeron en el contenedor de granos, y se colocaron con mucho cuidado y en la posición adecuada los granos con termopares: un par de ellos, uno muy cerca del otro, en la superficie

y en la parte central de una cara del contenedor, de manera similar otro par en la cara opuesta, y el último a la mitad del espesor y al centro de la muestra, figura 5.2.

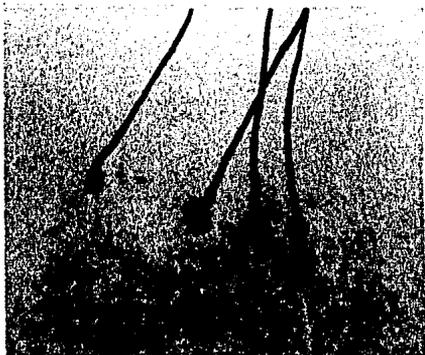


Figura 5.1

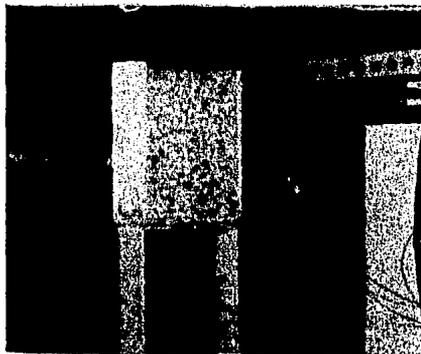


Figura 5.2

Arranque de los radiadores infrarrojos.

Esta actividad se inicia al permitir el flujo de aire y gas LP, por medio de válvulas de aguja, hacia los radiadores; posteriormente, el encendido de la mezcla se realiza con la ayuda de una llama. Para lograr la temperatura y característica de la llama requeridos en el radiador, es necesario, en el arranque, regular constantemente los flujos de aire y gas, para mantenerlos dentro de un valor prestablecido. El transitorio del sistema tiene una duración de 7 minutos aproximadamente.

- Acoplamiento del equipo y accesorios.

- Descripción de los experimentos.

Después de realizar lo anterior, el proceso de secado del grano se inicia en el momento en que la muestra de granos de café se coloca sobre la báscula e inmediatamente se permite el flujo de energía radiante hacia la misma; en este

instante se mide el peso de la muestra, y además el Sistema de Adquisición de Datos de Temperatura (SADT) mide y registra la temperatura de tres granos de café, localizados uno en cada cara y el otro en el centro de la muestra. Posteriormente, se miden las condiciones del aire atmosférico (por medio de un psicrómetro y un termómetro de alcohol) y la temperatura de los radiadores (por medio de un termopar de vaina, tipo J), y se regulan los flujos de aire y gas. Transcurridos los primeros 15 min., se repite la medición del peso de la muestra y el registro de temperaturas de los granos por parte del SADT. Posteriormente, se suspende el flujo de energía radiante, por medio de una compuerta, hacia una cara de la muestra, y se introduce el radiómetro para realizar la medición de la emitancia del grano de café en esa cara. Puesto que en el mismo instante en que se suspende el flujo de radiación, la temperatura de los granos localizados en esa cara, empieza a decrecer, lo cual da lugar a un sistema dinámico de medición, entonces, se optó por considerar un intervalo de medición de 3 min., durante el cual se median cada 10 seg., la temperatura de los granos y el voltaje del radiómetro, en forma alternada. La medición del voltaje se realizó por medio de un multímetro digital, y la temperatura del grano de café por medio de un termómetro digital, a través de termopares. Una vez transcurridos los 3 min., de medición, el radiómetro se retira y se permite nuevamente el flujo de energía radiante hacia la cara de la muestra. A continuación, se registran las condiciones del aire atmosférico y se regulan los flujos de aire y gas. Esta secuencia de actividades se repite cada 15 min., pero con la diferencia de que la

medición de emitancia de los granos de café se hace en una sola cara y en forma alternada. Además, la temperatura de los radiadores se mide cada 30 min. El proceso de secado se da por terminado cuando en dos mediciones sucesivas el peso de la muestra se mantiene constante. Figuras 5.3 y 5.4.

5.2 Resultados obtenidos.

En estos experimentos se consideraron 4 variables de control: temperatura del radiador, intensidad de radiación, y espesor y contenido de humedad de la muestra de granos de café. Para observar el efecto de cada una de estas variables en el proceso de secado, se permitió la variación de cada una de estas (asignandoles 3 valores diferentes) mientras se mantenían constantes las restantes. Los experimentos realizados fueron 9, y sus resultados se muestran a continuación.

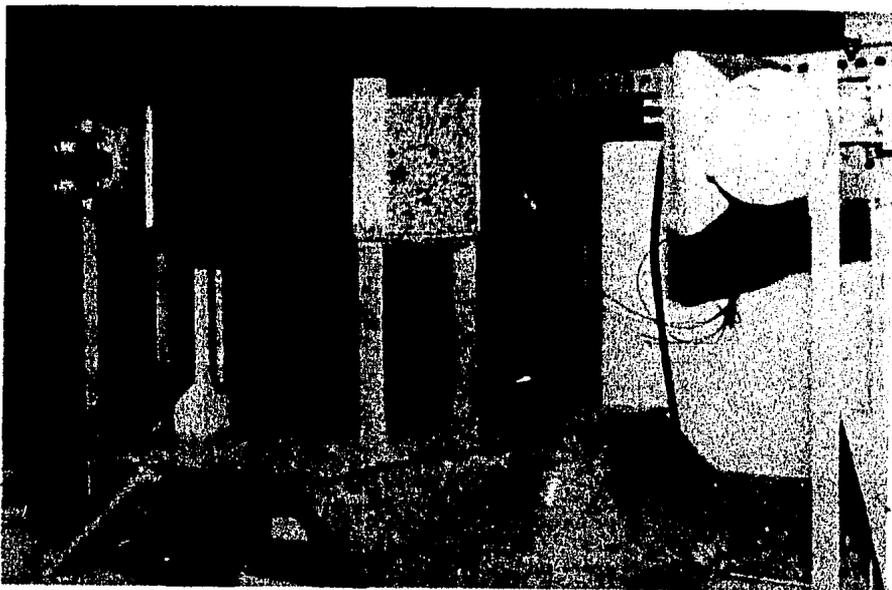


Figura 5.3 Muestra de granos de café secándose

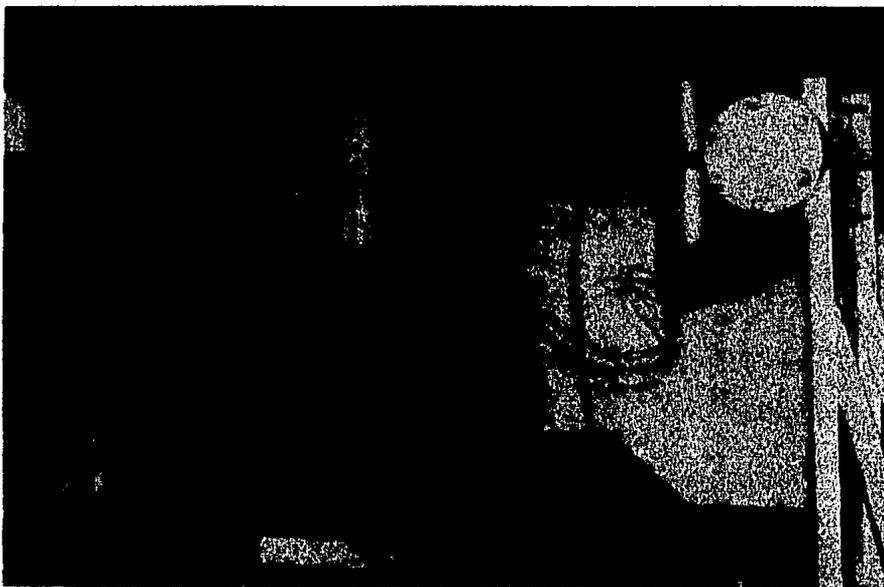


Figura 5.4 Medición de la emitancia de los granos

- Dinámica del secado o curvas de secado.

Las gráficas 5.5, 5.6, 5.7 y 5.8 muestran el efecto del contenido de humedad y espesor de la muestra, la intensidad de radiación y la temperatura del radiador, respectivamente, en el proceso de secado.

En todas ellas se observa lo siguiente:

- Tiempos de secado muy cortos, en comparación con los tiempos de secado utilizados por los métodos tradicionales (20-30 horas por métodos artificiales, y 6-15 días por métodos naturales). Estos tiempos comparan razonablemente bien con el encontrado en los experimentos reportados en las referencias 8, 7a y 8a, gráfica 5.9.
- Una vez iniciado el proceso, la rapidéz del secado al principio es más grande que al final, lo cual indica que es más fácil extraer el agua del grano con mayores contenidos de humedad que con menores. Este fenómeno se aprecia mejor en granos con un gran contenido inicial de humedad.

La gráfica 5.5 muestra en particular que a muestras de granos con mayores contenidos de humedad les corresponden mayores tiempos de secado, y que por lo menos en el rango explorado se observa una relación casi lineal entre el contenido inicial de humedad y el tiempo de secado, gráfica 5.10. En esta gráfica y en este rango se observa claramente que muestras con el doble de contenido de humedad no requieren del doble de tiempo de secado.

En la gráfica 5.6 se ilustra que a una muestra de granos de café con el doble de espesor le corresponde el doble

de tiempo de secado. Este fenómeno se observa mejor en la gráfica 5.10.

La gráfica 5.7 muestra que a mayores intensidades de radiación le corresponden menores tiempos de secado. Esta particularidad se precisa aún más en la gráfica 5.10, ya que en ésta se observa que el recíproco del tiempo de secado varía de manera aproximada con el recíproco del cuadrado de la distancia entre la muestra de granos de café y el radiador; es decir,

$$t_s' \propto \frac{1}{D^2} \quad (5.11)$$

donde: t_s - tiempo de secado,

D - distancia entre muestra y radiador.

De manera similar, la gráfica 5.8 muestra que a mayores temperaturas del radiador le corresponden menores tiempos de secado. También, este resultado se precisa aún más en la gráfica 5.10 en donde se observa que el recíproco del tiempo de secado varía de manera aproximada con la cuarta potencia de la temperatura del radiador; es decir,

$$t_s \propto T^4 \quad (5.12)$$

donde: T - temperatura del radiador.

Las relaciones (5.11) y (5.12) se obtienen al considerar que el flujo de calor radiante incidente sobre la muestra es directamente proporcional a la cuarta potencia de la temperatura del radiador e inversamente proporcional al

cuadrado de la distancia entre la muestra y el radiador; es decir,

$$q_r \propto \frac{I^+}{D^2} \quad (5.13)$$

donde: T - temperatura del radiador,

D - distancia entre la muestra y el radiador,

q_r - calor radiante incidente sobre la muestra,

y además, se considera que este flujo de calor es inversamente proporcional al tiempo de secado; es decir,

$$q_r \propto \frac{1}{t_s} \quad (5.14)$$

donde: t_s - tiempo de secado,

y por lo tanto, de las dos últimas relaciones se obtiene

$$t_s^{-1} \propto \frac{I^+}{D^2} \quad (5.15)$$

Es importante mencionar que:

- a) El contenido de humedad de los granos de café considerado en estos experimentos es el referido a la base seca; es decir,

$$W = \frac{W - W_s}{W_s} \times 100 \quad (5.16)$$

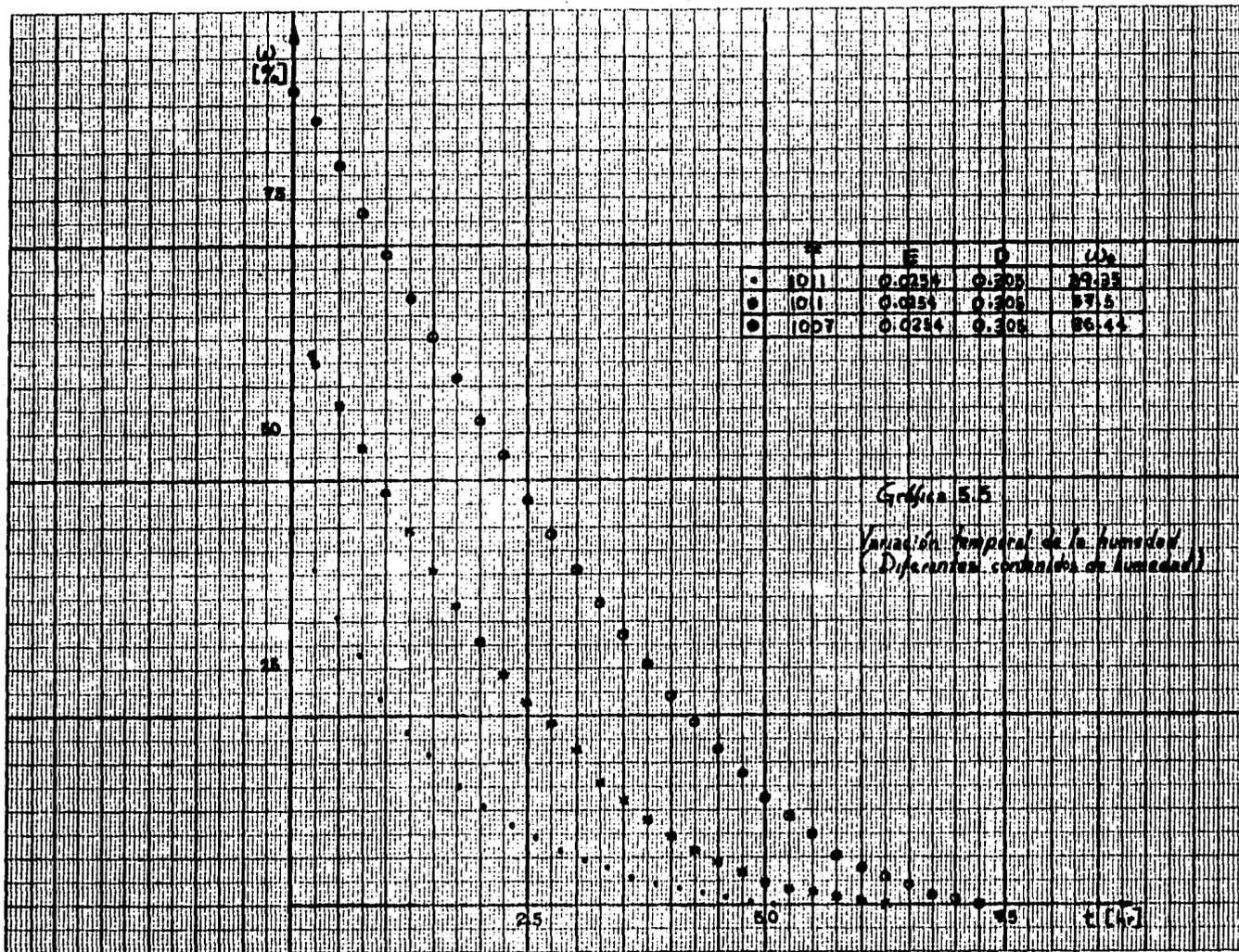
donde: W - contenido de humedad en base seca [%]

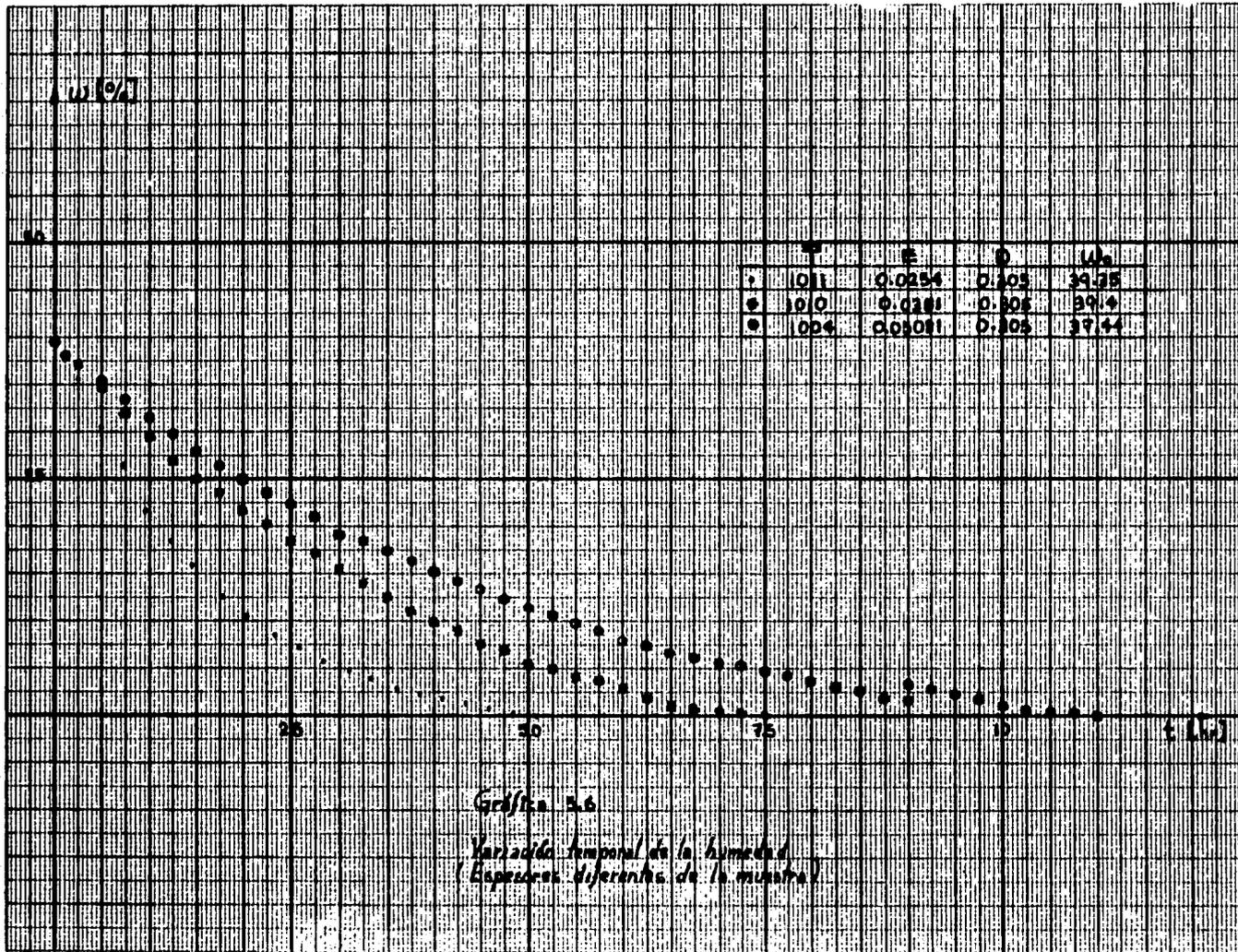
W - peso temporal de la muestra [gr]

W_s - peso del producto seco de la muestra [gr]

- b) Puesto que la intensidad de radiación en un punto depende de la distancia entre el cuerpo emisor y el punto en cues-

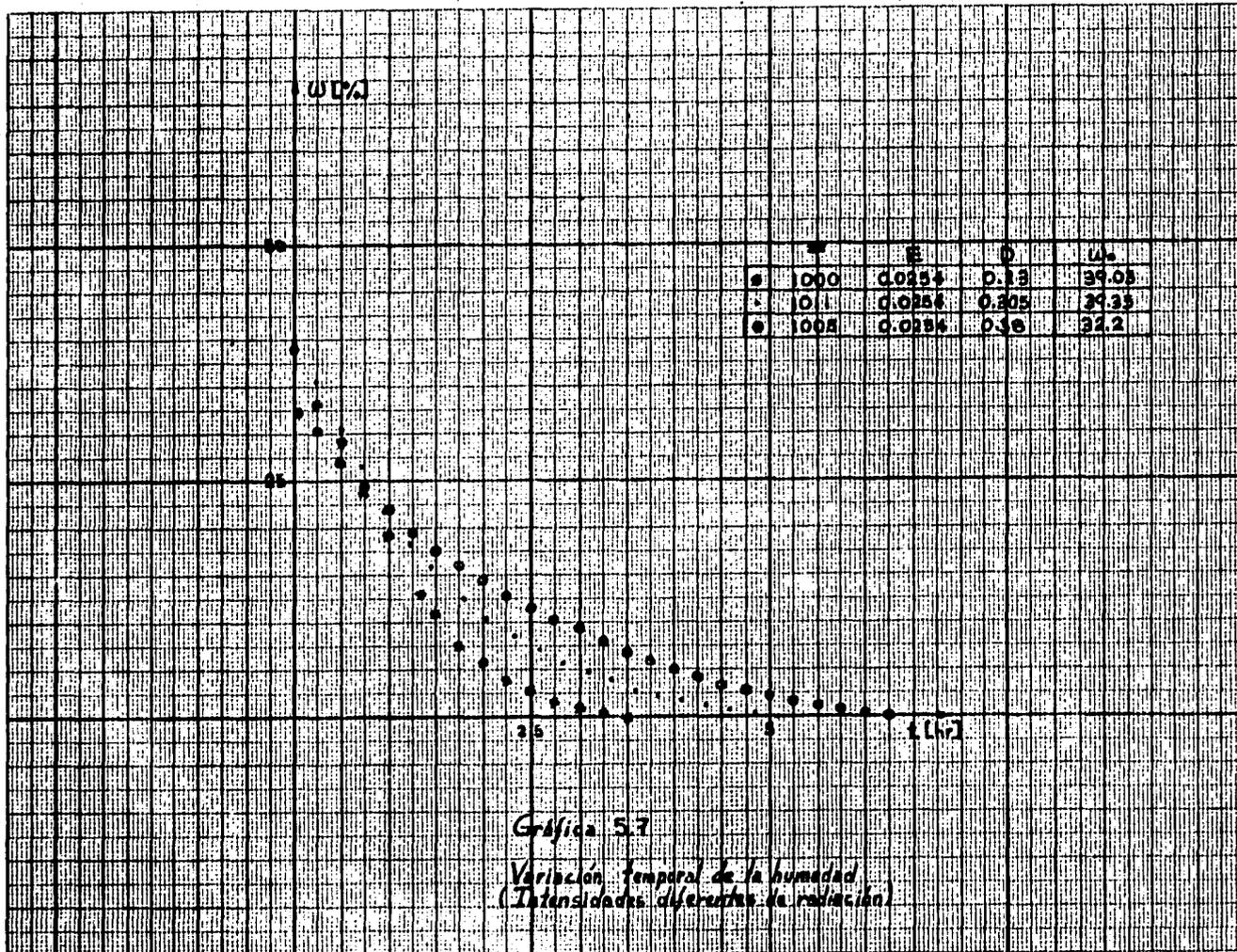
ción, en estos experimentos no se considera directamente a la intensidad sino a la distancia mencionada.





Gráfica 3.6

Variación temporal de la humedad
(Espesuras diferentes de la muestra)

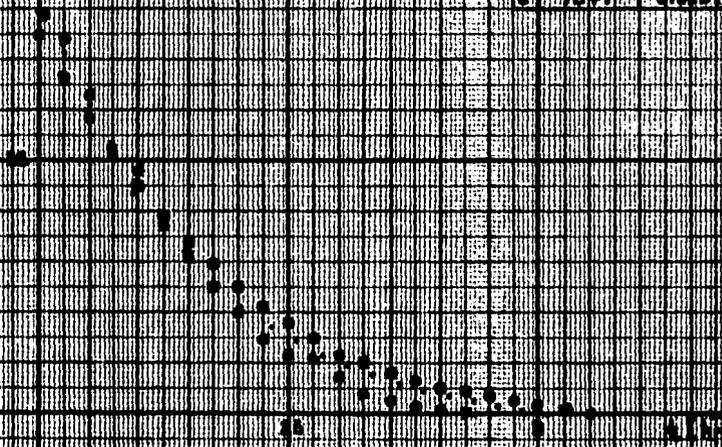


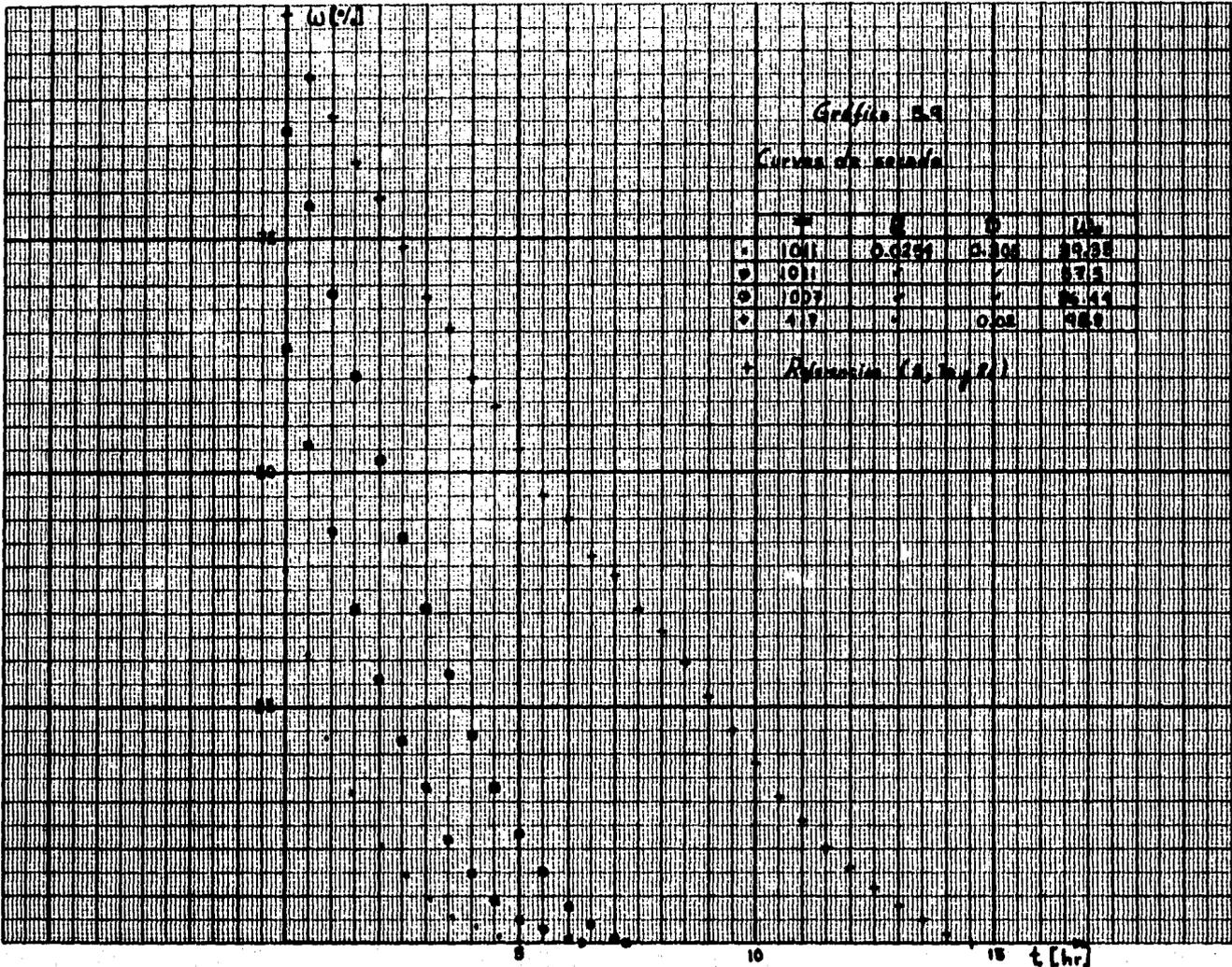
Gráfica 5.7

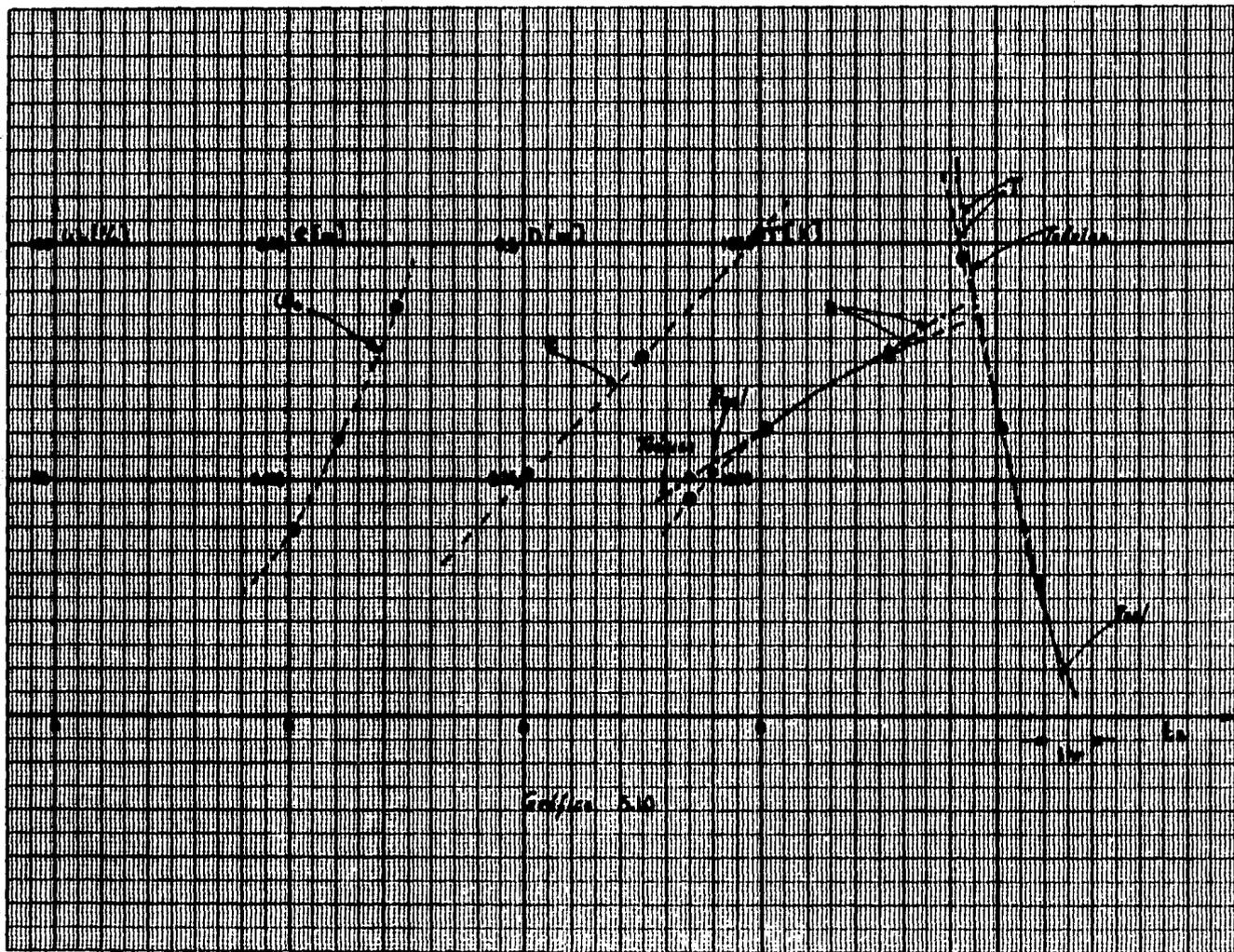
Variación temporal de la humedad
(Intensidades diferentes de radiación)

1015/1

	T	E	C	h
o	118	0.0104	0.04	3310
o	1011	0.0204	0.04	2790
o	1047	0.0104	0.04	4020







Las gráficas 5.17, 5.18, ..., 5.25 muestran, cada una de ellas, en la parte superior la variación de la emitancia del grano de café, y en las gráficas 5.26, 5.27, 5.28 y 5.29 se muestra también la variación de la emitancia con respecto al contenido de humedad del grano. Los resultados más importantes encontrados son los siguientes:

- El rango de variación de la emitancia del grano de café está situado entre 0.75% y 0.95%.
- La emitancia del grano decrece a medida que el contenido de humedad también decrece.

Estos resultados, en particular, merecen especial importancia debido a que difieren apreciablemente de los reportados en los experimentos ya mencionados, y esta diferencia radica en que, en primer lugar el rango de variación de 0.75% - 0.95% no compara con el de 0.25% - 0.55% encontrado, y en segundo lugar la tendencia decreciente de la emitancia a medida que progresa el secado, tampoco compara con la tendencia creciente de la emitancia, encontrada, gráfica 5.30.

Los argumentos a los que se recurren para explicar lo anterior son los siguientes:

- El radiómetro utilizado en los experimentos reportados por las referencias 8, 7a y 8a, no disponía de una adecuada calibración para la realización de este tipo de mediciones, y además el modelo matemático utilizado en el cálculo de la emitancia hace uso de la consideración de que la temperatura del aire ambiental y del radiómetro son iguales, cosa que según lo observado

en estos experimentos es totalmente falsa en la mayor parte del proceso de secado.

- Los valores de la emitancia y absorptancia reportados para los vegetales, en general, son mayores al 50%.
- Finalmente, considerando la relación

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (5.31)$$

y la ley de Kirchoff

$$\alpha = \epsilon \quad (5.32)$$

entonces, si la emitancia del grano de café decrece, implica que su absorptancia también decrece; es decir,

$$\epsilon \downarrow \rightarrow \alpha \downarrow$$

y por lo tanto, de la relación (5.31) se determina que $(\rho + \tau) \uparrow$, de lo cual se puede inferir de manera aproximada que $\tau \uparrow$ a medida que la humedad disminuye, resultado que es cualitativamente razonable según lo reportado en la tabla 3.1.

Las gráficas 5.17, 5.18, ..., 5.25 muestran cada una de ellas en la parte inferior la variación de la temperatura de los granos de café en función del tiempo. En éstas se observa claramente que el uso de altas intensidades y temperaturas de radiación da por resultado las altas temperaturas en los granos, lo cual incide directamente en la notable reducción del tiempo de secado y probablemente también en la calidad del producto. Esto último se debe a que convencionalmente la zona de torrefacción se sitúa en el rango de 185°C y 240°C, y en todos los experimentos

realizados en ningún momento se alcanzó una temperatura dentro de este rango ($T_{máx} = 140^{\circ}\text{C}$); además, aunque los cafetaleros recomiendan una temperatura máxima de secado de 90°C , cuando el tiempo de secado es de 20-30 horas, en estos experimentos cuando se alcanzaron temperaturas de 140°C el tiempo del proceso se redujo a 1.5 horas. Lo anterior es de gran interés debido a que en la tecnología de alimentos es muy importante tanto el parámetro característico del alimento como el tiempo de procesamiento. Es importante recordar que en este trabajo el análisis químico de los elementos del grano de café y su análisis organoléptico no fueron parte de sus objetivos.

Adicionalmente, se observa que a bajas intensidades y temperaturas de radiación la distribución de calor es más uniforme a través del espesor de la muestra. Esto es evidente de la constancia de la temperatura de los granos en el espesor mencionado.

Finalmente, la mayoría de las gráficas muestran la existencia de un rango muy corto de temperaturas en el cual emigra la mayor parte de agua contenida en los granos. Tal vez en estos casos se puede hablar de que, por lo menos en los granos no expuestos directamente a la radiación, el agua contenida en el grano a una temperatura de aproximadamente 55°C cambia de fase y emigra hacia el exterior en forma de vapor, gráfica 5.33.

También, es importante mencionar que la emitancia del grano se determina con la siguiente relación, resultado de la calibración del radiómetro para este tipo de mediciones

$$\epsilon_c = \frac{\left(\frac{V_R - B}{R} + 0.6808 \sigma T_R^4 - 0.678 \sigma T_{\infty}^4 \right)}{\sigma (0.6623 T_c^4 - 0.0212 T_R^4 - 0.6411 T_{\infty}^4)} \quad (5.34)$$

donde: ϵ_c - emitancia del grano de café,

T_c - temperatura del grano [K],

T_R - " " radiómetro [K],

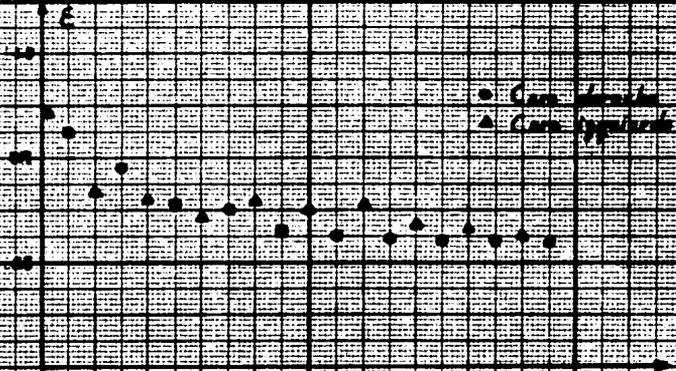
T_{∞} - " " medio ambiente [K],

V_R - voltaje del radiómetro [mV],

R y B - constantes de calibración del radiómetro,

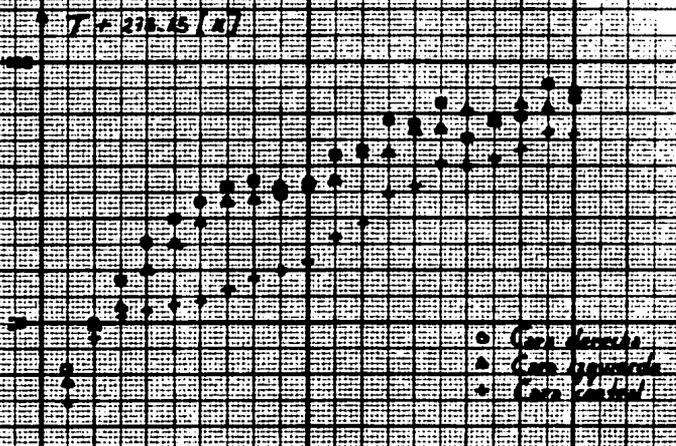
σ - constante de Stefan-Boltzmann. $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right]$

	$G = 5.60$		
$E = 0.0024$	$D = 0.205$	$N = 37.45$	
Red. de	144	4.32	1.36
Red. de	100	2.95	0.97
Resumen	σ	σ	σ



Gráfica 513

Epitaxia y evaporación del grupo de 10¹¹ centros al tiempo.



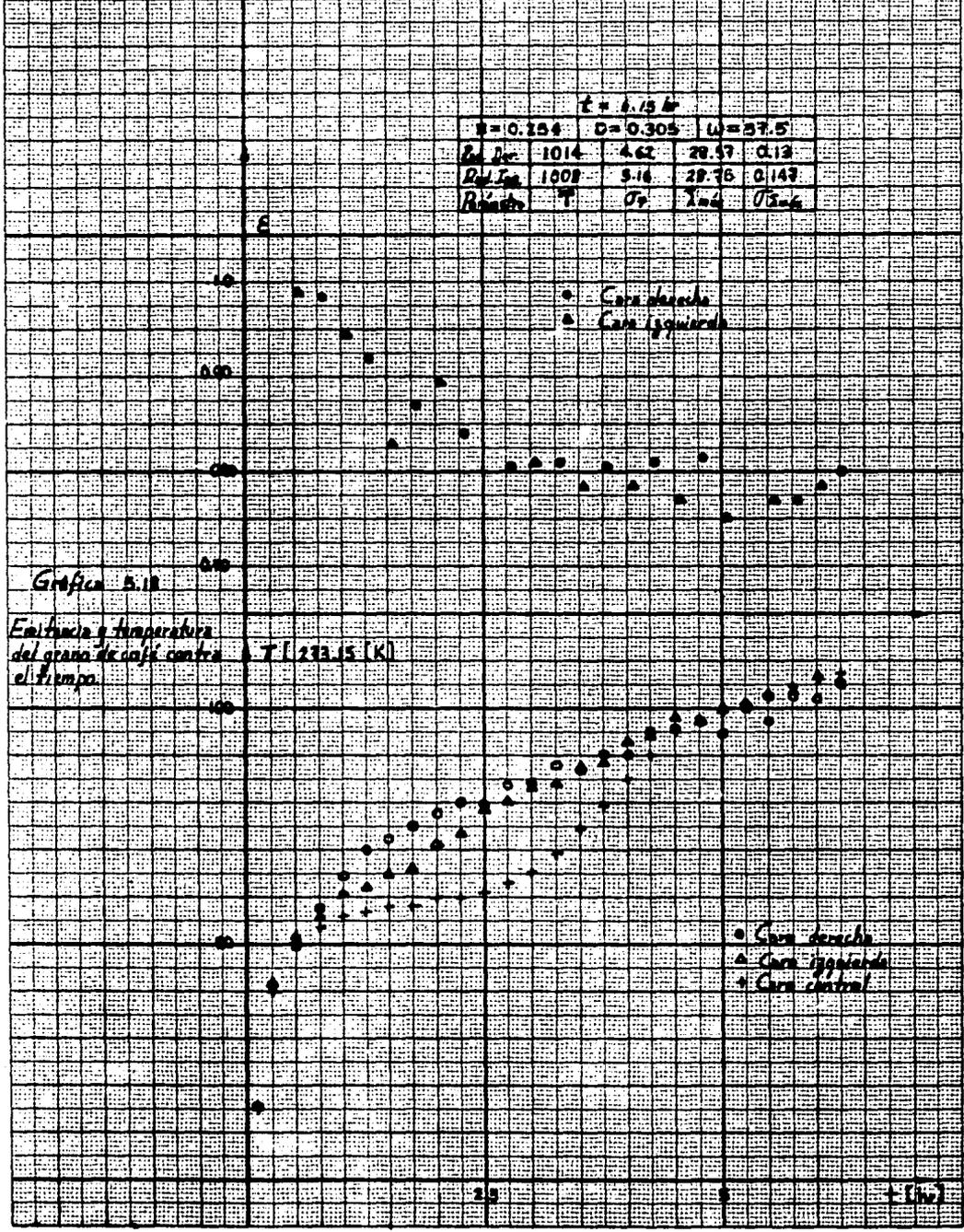
$T + 376.25 [K]$

- Caso de invierno
- △ Caso de primavera
- ◻ Caso de verano

[16]

$t = 6.15 \text{ hr}$

$\mu = 0.254$	$D = 0.305$	$W = 27.5$		
Ed. In.	1014	4.62	28.97	0.12
Del. In.	1008	5.16	28.76	0.147
Revoluto	T	σ_T	λ_{med}	$\sigma_{\lambda_{\text{med}}}$



Gráfica 5.18

Emisividad y temperatura del grano de café contra el tiempo.

• Cara derecha
 ▲ Cara izquierda
 × Cara central

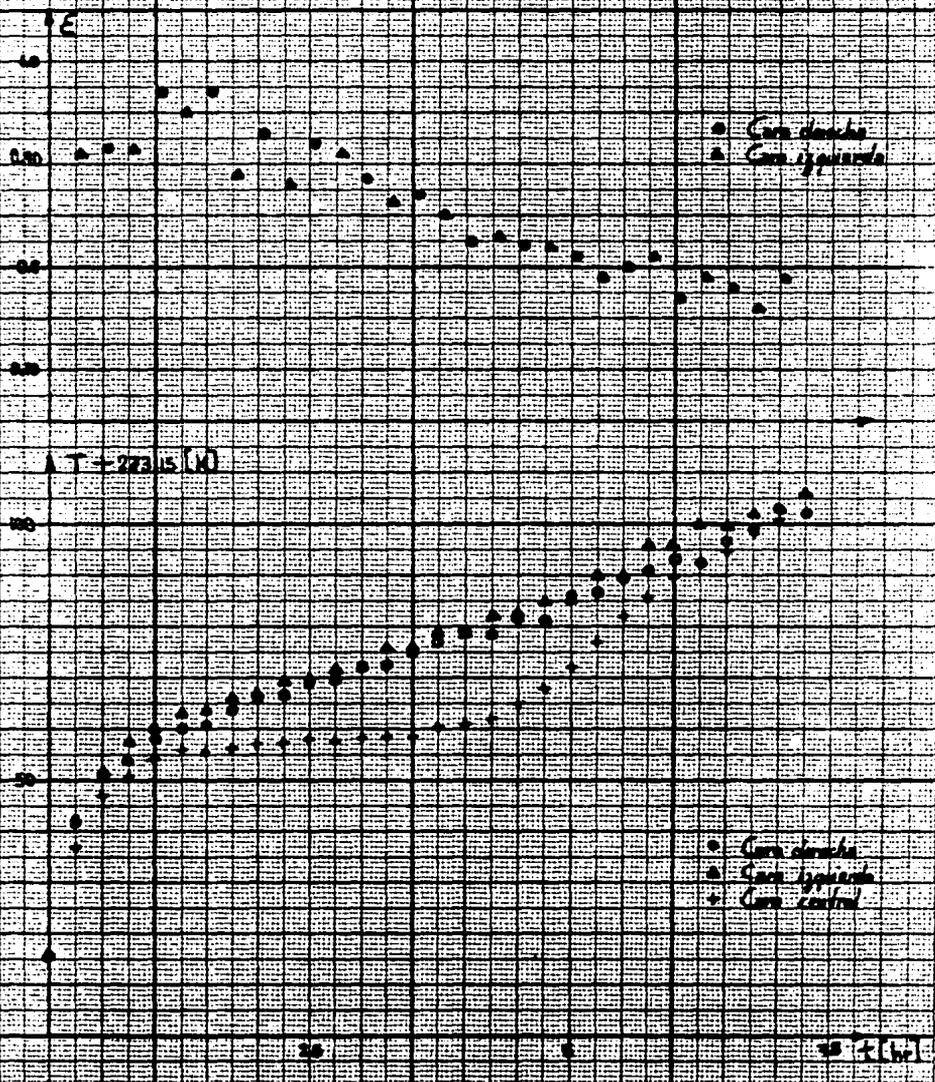
t [hr]

Emitancia y temperatura del
grano de cable contra el tiempo

Gráfica 5.19

$t = 7.15$ hr

$E = 0.0254$	$D = 0.306$	$\omega = 96.44$
$R_{el} \text{ Gr. } 1011$	8.843	28.67
$R_{el} \text{ Tr. } 1003$	5.025	28.92
$R_{el} \text{ Tr. } T$	$G =$	$T_{el} \text{ Tr. } 0.146$

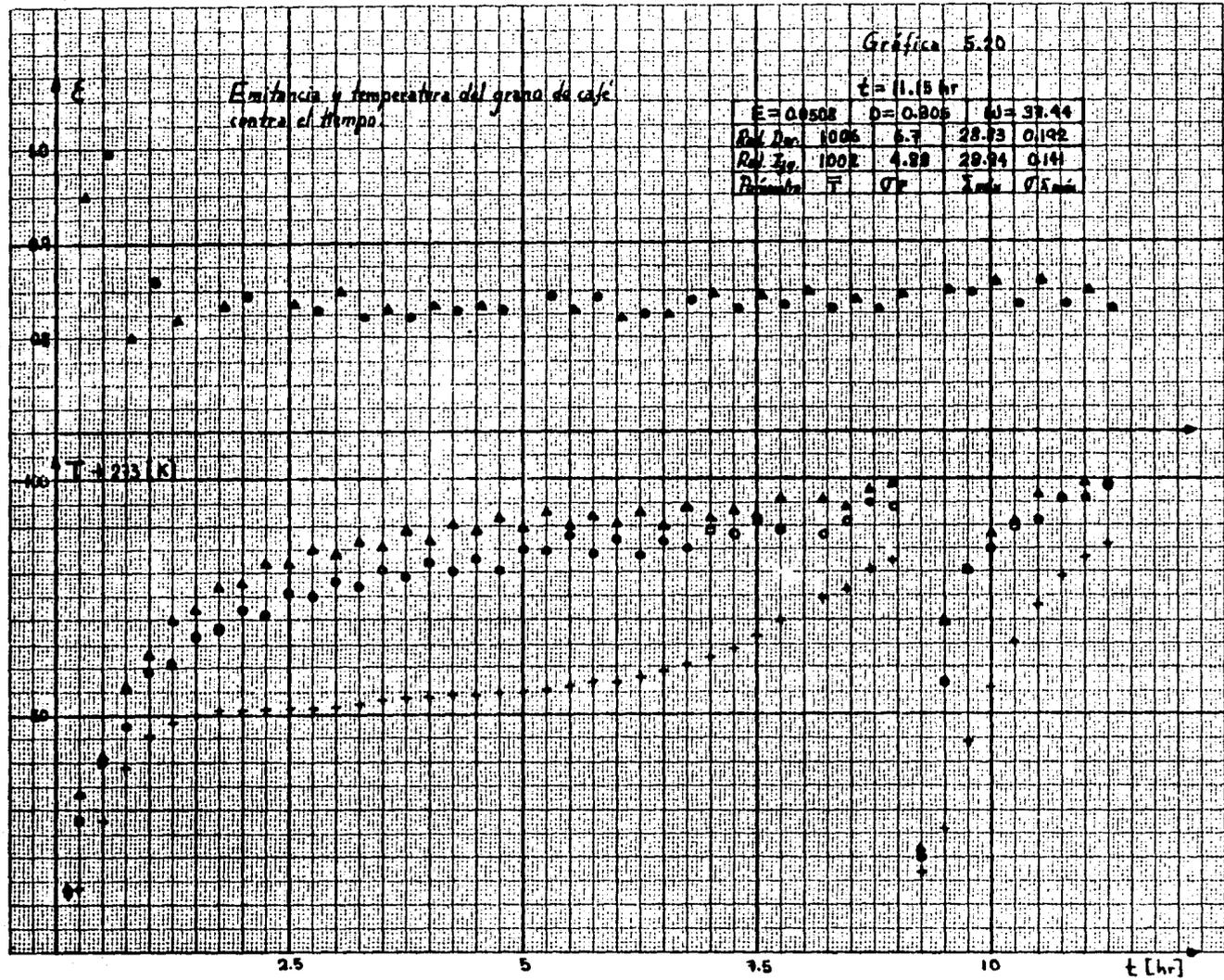


Gráfica 5.20

Emitancia y temperatura del grano de café
contra el tiempo.

$t = 11.15 \text{ hr}$

$E = 0.9508$	$D = 0.906$	$\omega = 39.44$
Rel. D. 100%	6.7	28.93
Rel. T. 100%	4.89	28.94
Rel. ω	\bar{T}	σ_T

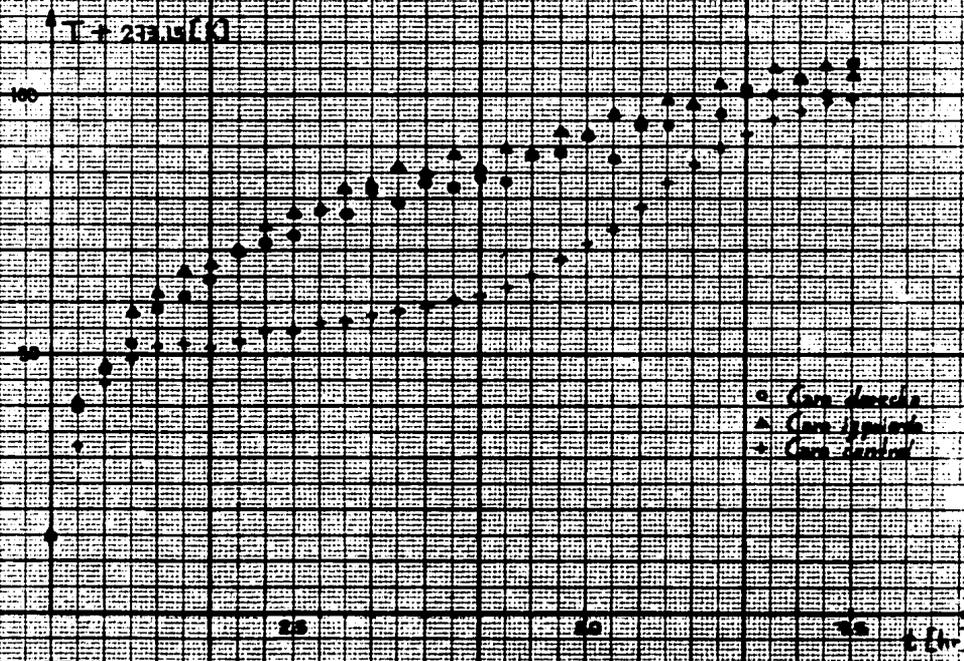
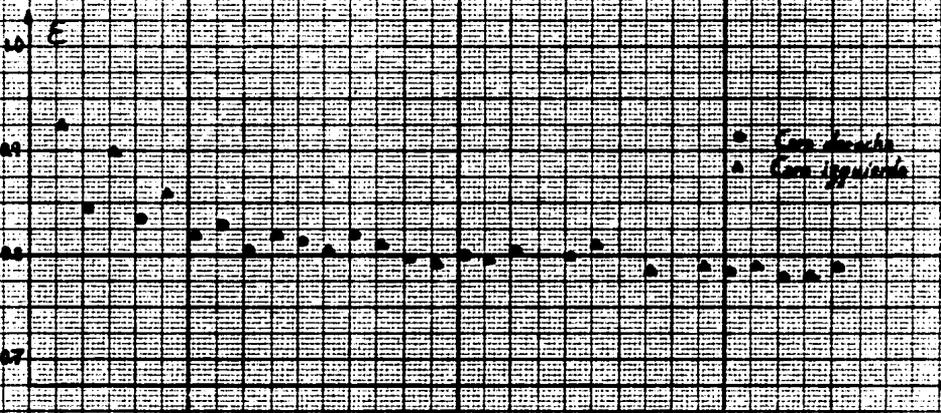


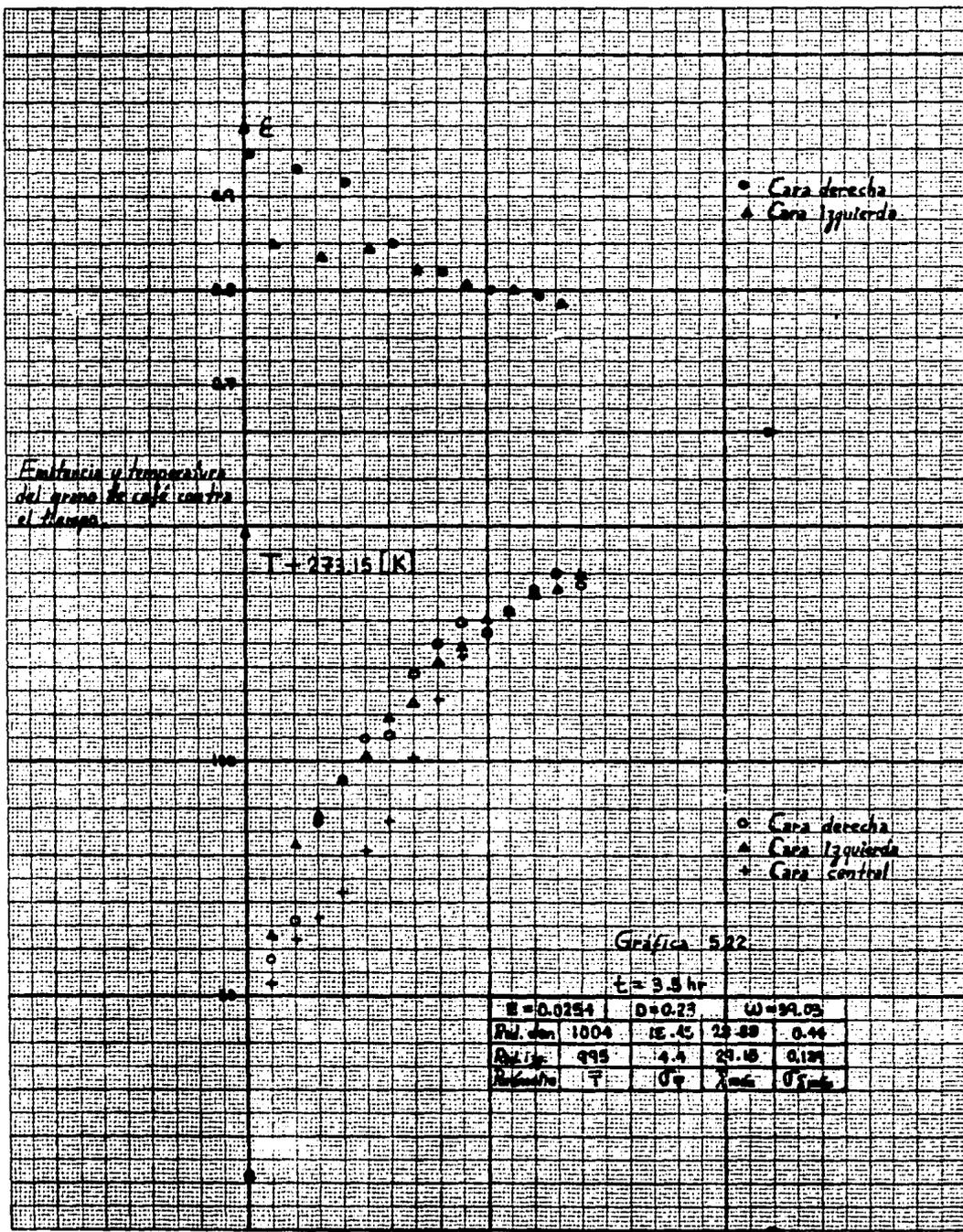
Emisión y temperatura del gas
de cell. contra el tiempo

Gráfico 5.21

$t = 7.5 \text{ hr}$

$\mu = 0.0381$	$D = 0.200$	$W = 39.4$
Rel. Br. 1012	5.6	28.26
Rel. Br. 1009	4.4	22.33
Rel. Br. T	G_2	3.44
		G_2





Gráfica 5.22

$t = 3.5 \text{ hr}$

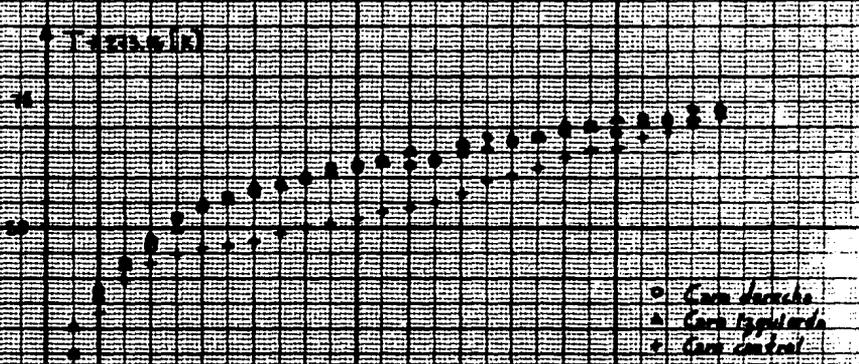
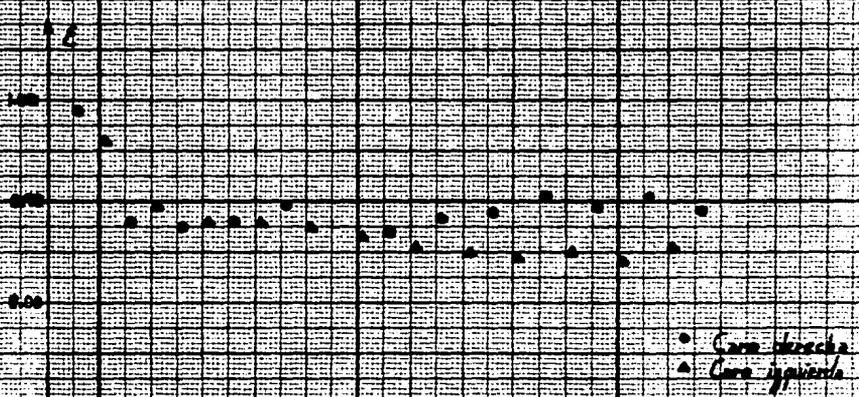
$\mu = 0.0254$	$D = 0.23$	$W = 99.03$
$P_{\text{rel. den}} = 1004$	12.45	23.83
$P_{\text{rel. h}} = 995$	4.4	23.15
$P_{\text{rel. h}} = \bar{T}$	0.7	2.66

Evolución e temperatura del grano
de soja cubierto al tiempo.

Gráfico 5.23

$t = 6.5 \text{ hr}$

$\epsilon = 0.0294$	$\phi = 0.20$	$\omega = 23.2$
Rel. Hum. 100%	8.30	20.70
Rel. Hum. 100%	8.00	20.90
Rel. Hum. T	Qv	Rel. Qv



2.5

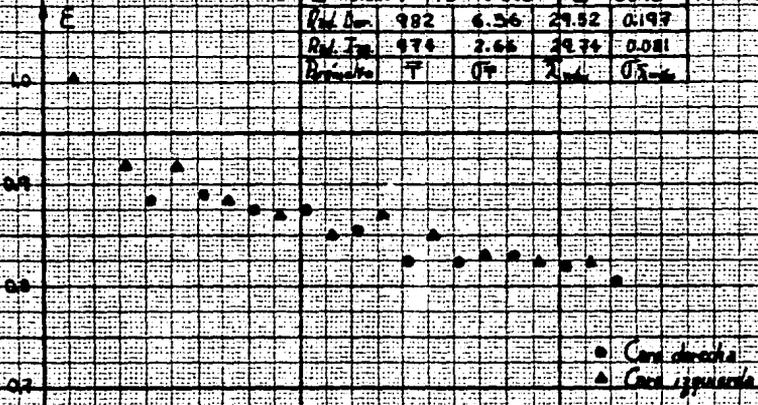
5

t [hr]

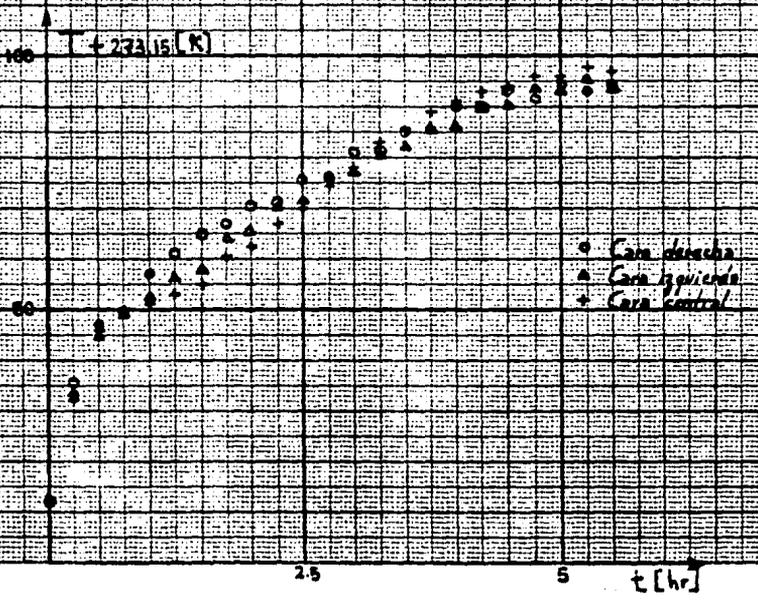
Gráfica 5.24

$t = 5.5 \text{ hr}$

$E = 0.0284$	$D = 0.305$	$\omega = 30.15$	
Rev. Dm	982	6.56	29.52
Rev. Tm	974	2.66	29.74
Revoluto	\bar{T}	$\bar{\sigma}$	λ_{med}
			$\bar{\sigma}_{\text{med}}$



Emitancia y temperatura del grano de café contra el tiempo.

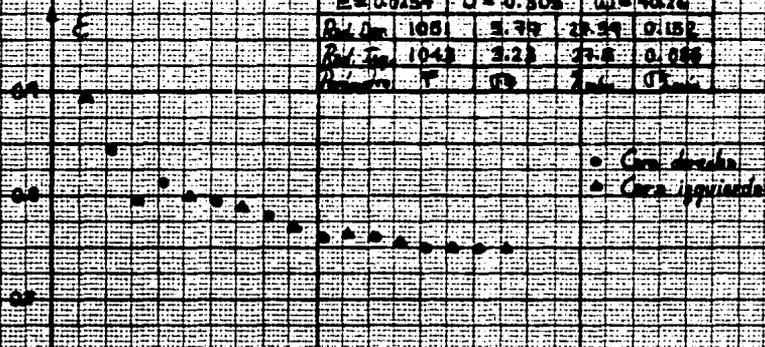


2.5 5 t [hr]

Gráfica 3.23

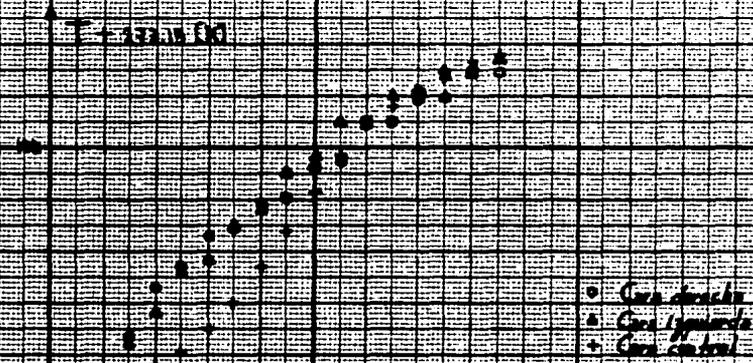
$t = 4.15 \text{ hr}$

$E = 0.0254$	$D = 0.305$	$\omega = 40.76$		
Rel. Dem.	1051	3.72	28.34	0.152
Rel. Top.	1043	3.23	27.8	0.088
Rel. Dem.	F	109	2.6	0.152



Entonces, la separación del grano de sal, cambia al tiempo.

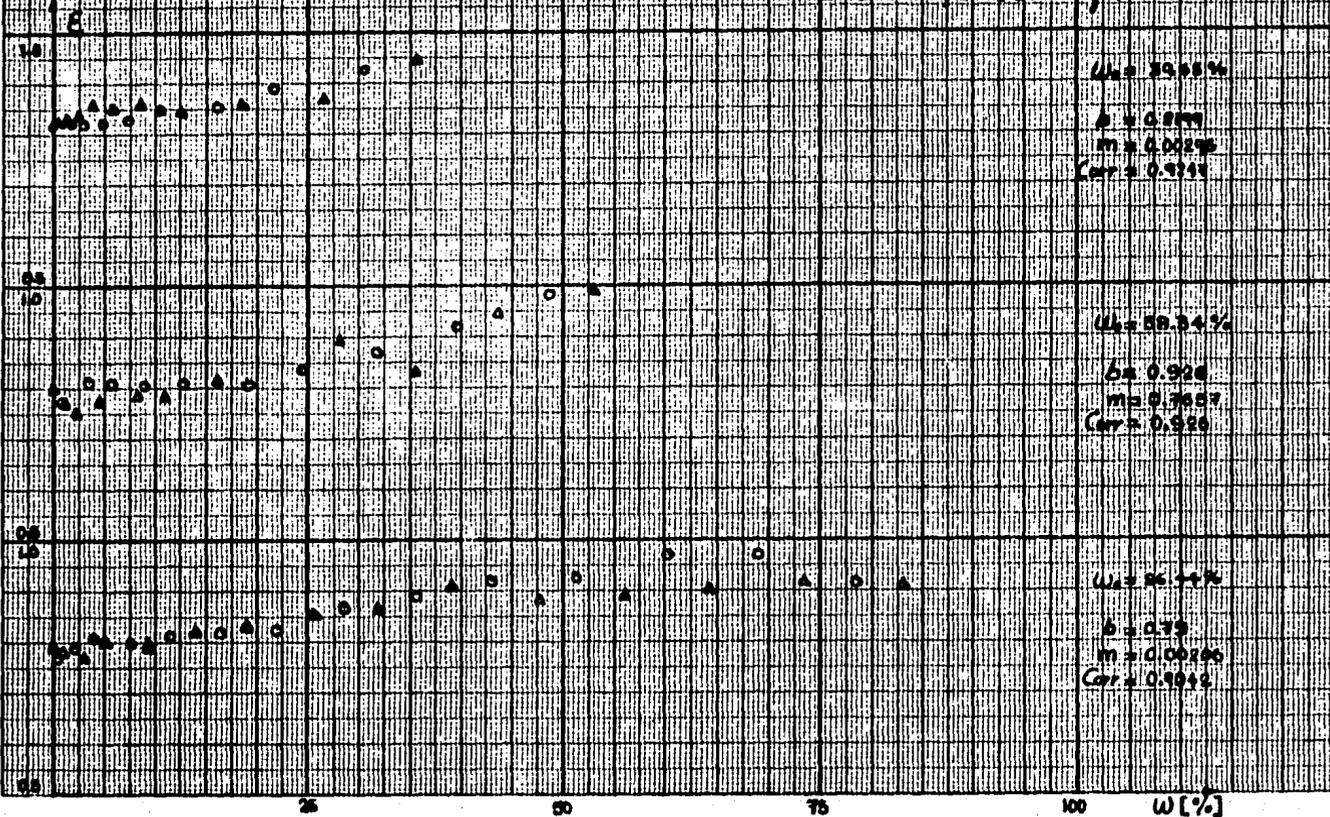
$E = 2.27 \cdot 10^{-6}$



Gráfica 3.26

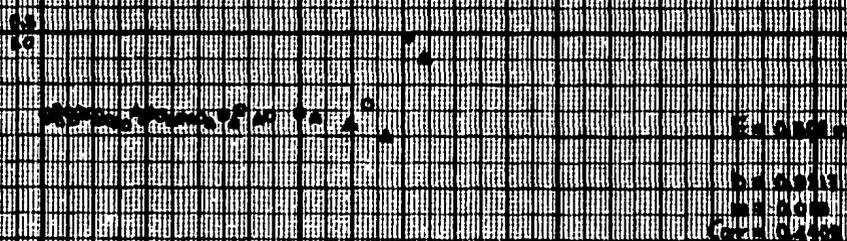
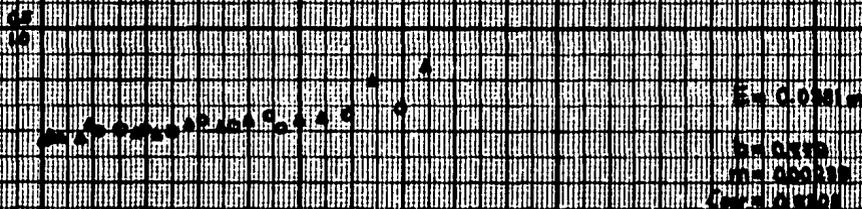
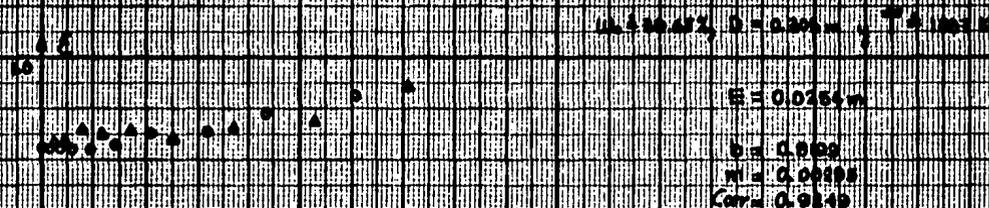
Erosión contra humedad del grano de café

$E = 0.0284m$, $D = 0.308m$ y $T_A = 100^\circ C$



Gráfica 2.27

Emulsión contra la humedad del grano de café



25

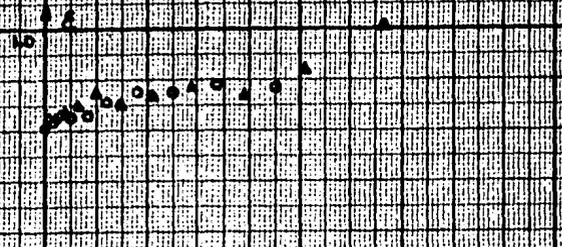
50

W%

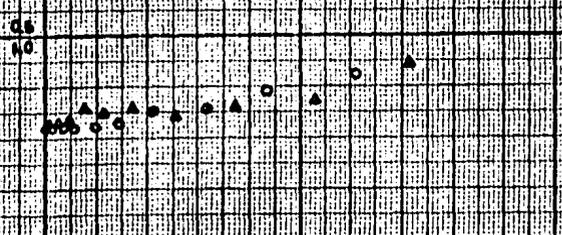
Gráfica 2.20

Equilibrio entre la humedad del grano de café

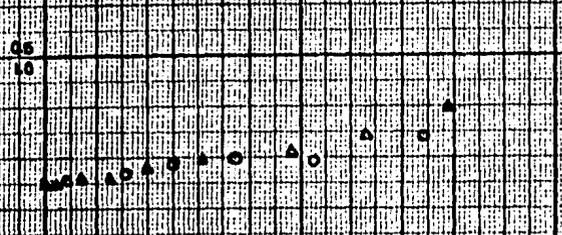
$E = 0.0245$, $D_s = 0.0001$, $U_0 = 37\%$



$T = 292.8 \text{ K}$
 $b = 0.8258$
 $m = 0.00329$
 $Corr = 0.8948$



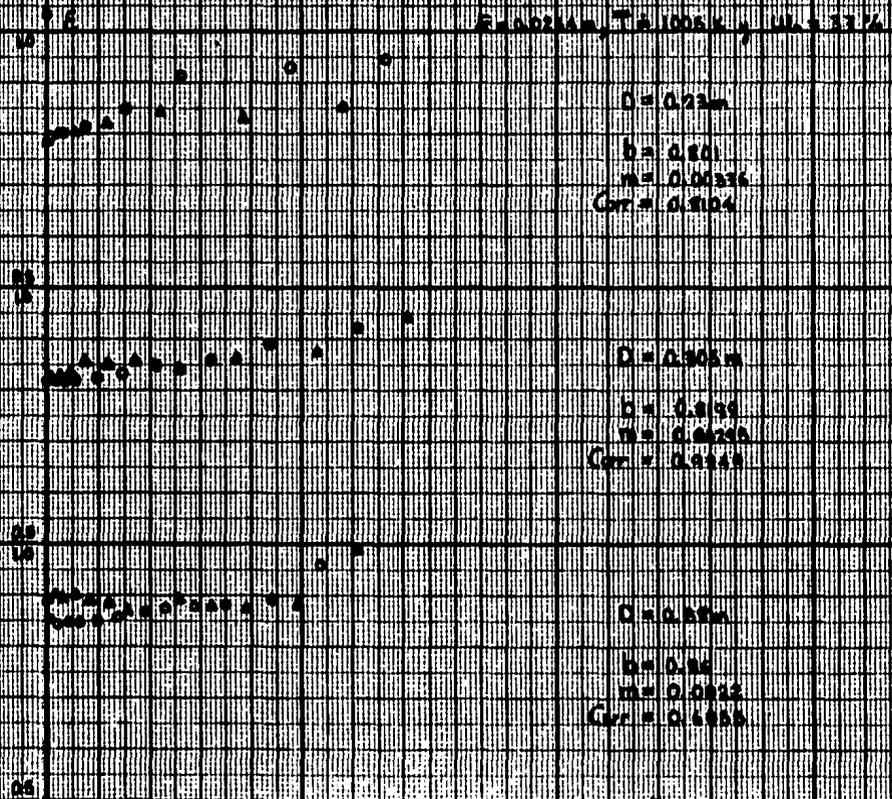
$T = 101.5 \text{ K}$
 $b = 0.8199$
 $m = 0.00455$
 $Corr = 0.9249$



$T = 104.3 \text{ K}$
 $b = 0.7481$
 $m = 0.0029$
 $Corr = 0.9691$

Grafik 1026

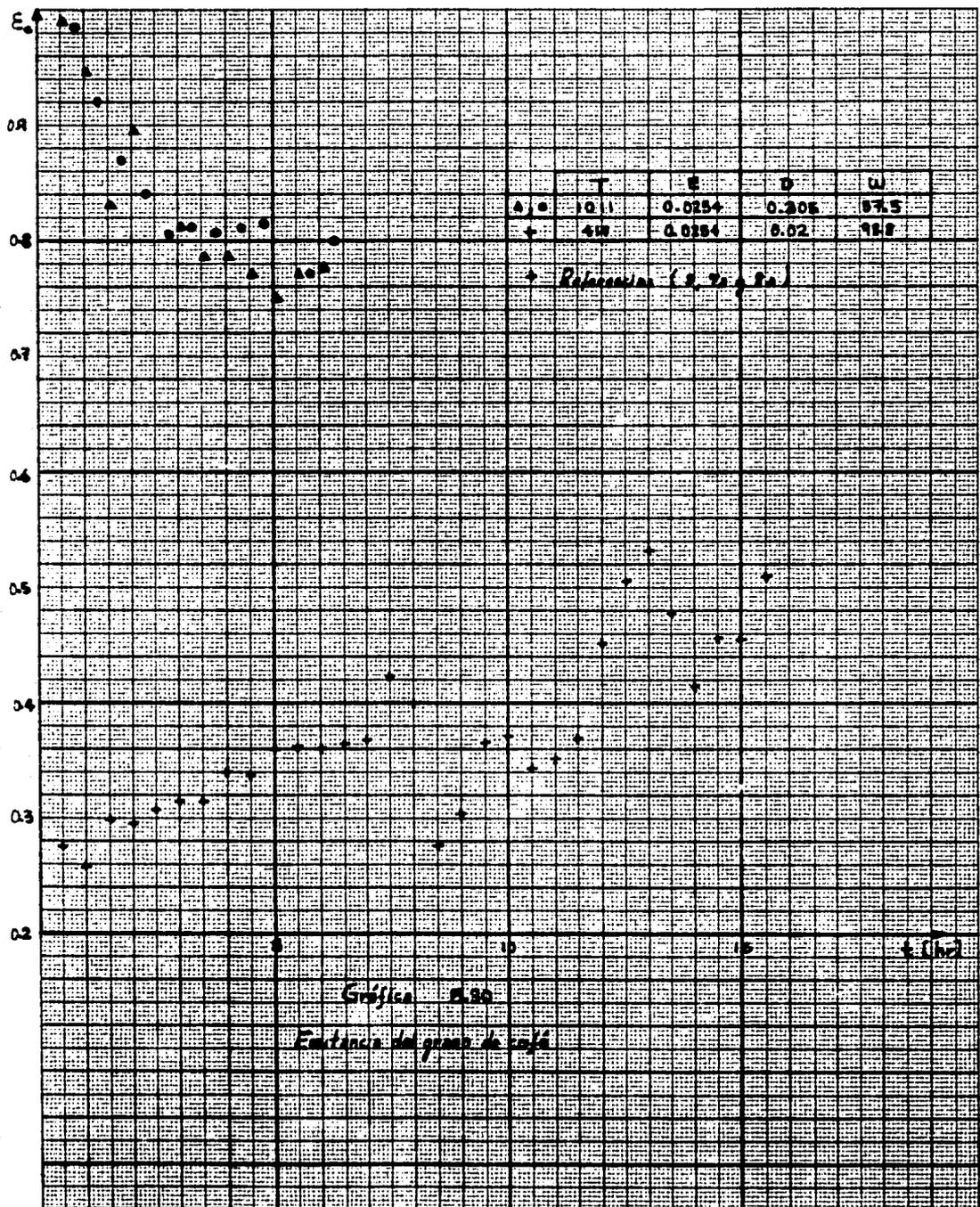
Einfluss des β auf die β -Werte



2b

50

w [%]



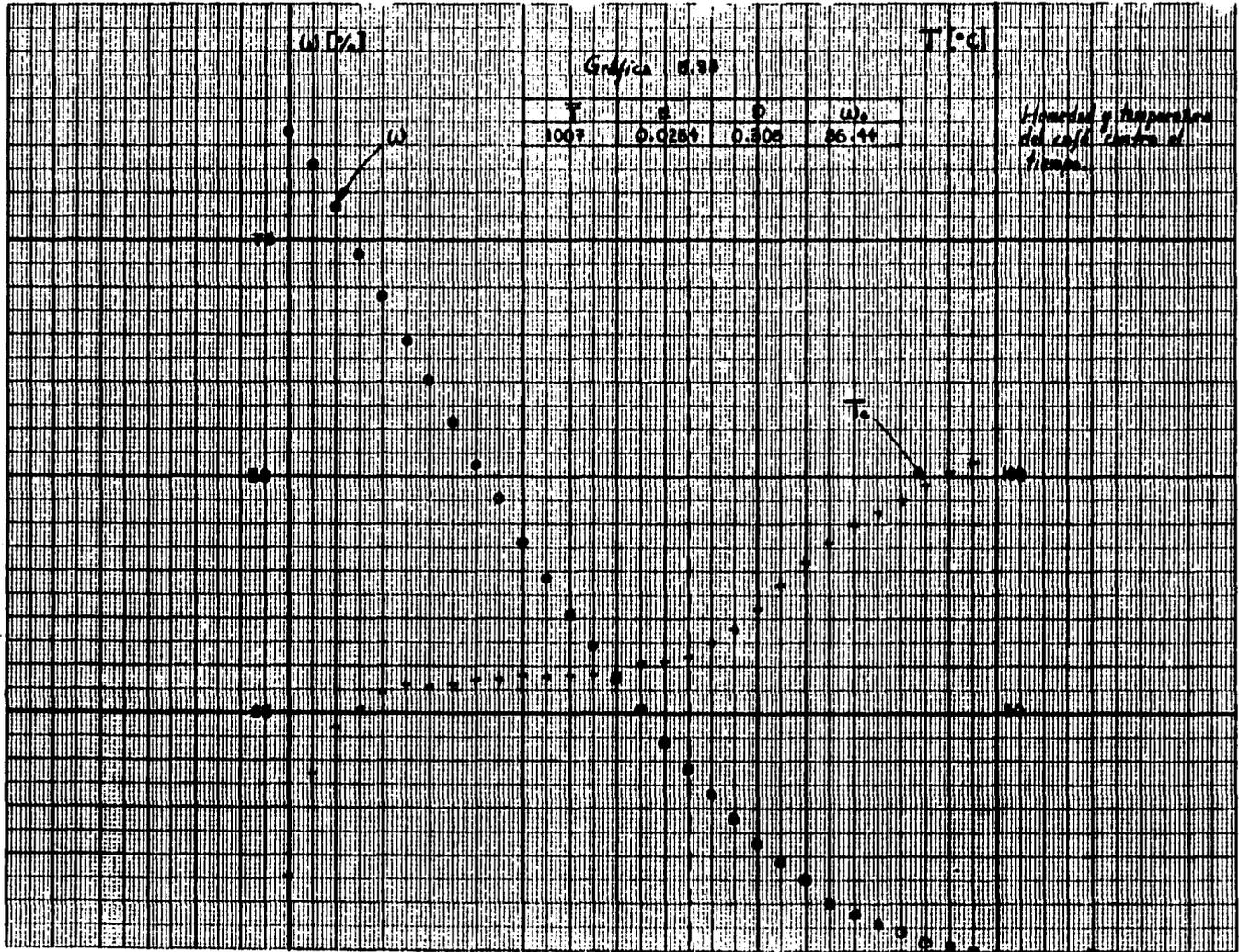
ω [%]

T [°C]

Gráfica 0.30

T	ω	ϕ	ω_0
100.7	0.0280	0.308	26.44

Humedad y temperatura
de café dentro el
tiempo.



25

5

t [hr]

5.3 Equipo utilizado.

a) Sistema de adquisición de datos de temperatura de 40 canales.

Marca YEW, YODAC-8, modelo 2873.

b) Termómetro digital de 30 canales.

Marca YEW, modelo 2572.

c) Báscula eléctrica.

Marca HARTNER, capacidad 2 kg.

d) Multímetro digital.

Marca KEITHLEY, modelo 616.

e) Radiómetro de termopila.

f) Psicrómetro.

g) Termopar de vaina, tipo J.

h) Alambre de termopar tipo J.

i) Termómetro de alcohol.

CAPITULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

A lo largo del desarrollo de este trabajo se observaron algunos aspectos muy interesantes sobre el uso de la radiación térmica infrarroja, proveniente de quemadores de gas, en el proceso de secado de granos de café.

Las ventajas que ofrece son las siguientes:

- Aceleración en la rapidéz del proceso de secado: esto sin duda tiene su explicación en la alta densidad de energía incidente sobre el grano de café, en la profundidad de penetración de la radiación en el mismo grano y en los valores de absorción muy cercanos a la unidad encontrados en los experimentos.
- Conveniencia de secar granos de café con grandes contenidos de humedad: al determinar el consumo de gas LP utilizado para extraer un kilogramo de agua de los granos de café, se observa una tendencia creciente en el consumo de combustible por kilogramo de agua extraída a medida que decrece el contenido de humedad en el grano
- Posible aprovechamiento del biogas que se produce por reacción anaeróbica de la pulpa de café, como combustible de los radiadores infrarrojos: el haber utilizado quemadores de gas como radiadores infrarrojos en los experimentos, permite suponer con optimismo el uso de este biogas como combustible de estos quemadores, y esto se debe a que según el estado actual de los gasógenos en que se produce dicho gas

generan del orden de 800 lt de gas al día a una presión de 200-20 mm de c.a., y estos radiadores consumen, cada uno de ellos, 17-23 lt/hr a una presión de 4 a 5 mm de c.a. También es importante que este combustible sólo reemplazaría en forma parcial el combustible necesario para secar grandes cantidades de café.

Las desventajas que muestra son las siguientes:

- Muestras pequeñas de granos de café.
- Altas temperaturas de secado del grano y grandes gradientes de temperaturas en muestras con espesor considerable: hasta aquí no es posible hablar sobre cuanto perjudican o benefician las altas temperaturas de secado a la calidad del grano (apariciencia, aroma y sabor), debido a que el estudio organoléptico y el análisis químico de los elementos constituyentes del grano no se incluyeron en los objetivos de este trabajo. También es necesario decir que la no homogeneidad de temperatura en los granos a través del espesor de la muestra es resultado de la muestra estática y de gran espesor.
- Grandes costos de energía e inversión inicial alta: aunque en este trabajo, también, el aspecto económico no fué uno de sus objetivos, resulta interesante mencionar que la inversión inicial de una instalación de esta naturaleza es bastante considerable, principalmente por el costo de los radiadores infrarrojos y los dispositivos mezcladores. De igual manera, al hablar del costo de la energía se puede decir que no existe punto de comparación entre el costo de la energía para extraer un kilogramo de agua del grano de café (41-60 \$/kg de agua, dependiendo del contenido de humedad del grano) y el costo de la energía necesaria para evaporar

un kilogramo de agua a condiciones ambientales (0.6655 \$/ kg de agua).

Resulta evidente de todo lo anterior el que, para tener un panorama más completo, desde el punto de vista técnico, sobre el uso de la radiación térmica infrarroja en el secado de granos de café, la necesidad de realizar un estudio organoléptico y un análisis químico de los elementos constituyentes del grano, como también proporcionar movimiento a los granos para de esta manera uniformizar la temperatura en ellos y evitar así los gradientes de temperatura, sólo así es posible determinar el efecto real de la temperatura de secado sobre la calidad del grano.

Por otro lado, para hablar del aspecto económico de la aplicación de esta técnica en el secado de granos de café, con estos resultados sería muy aventurado pues en ningún momento se pensó en construir un equipo secador eficiente (p.e. utilizando los gases producto de la combustión en el precalentamiento del grano, y por lo menos hacer uso de factores de forma entre radiador infrarrojo y muestra de granos, superiores a los utilizados en los experimentos, 0.107- 0.045), en secar grandes volúmenes de café y en utilizar el biogás como combustible de los radiadores infrarrojos. También, todo esto sería interesante realizarlo para completar el conocimiento del uso de la radiación térmica infrarroja en el secado de granos de café, y probablemente en el tratamiento térmico de algunos otros productos húmedos.

GENERALIDADES DEL GRANO DE CAFE.

Los granos de café tienen, principalmente, su origen botánico en dos especies muy diferentes: café Arabica cultivada casi exclusivamente en América y café Canephora cultivada ampliamente en Africa, y junto con la especie Arabica en Asia. Otras especies menos comunes cultivadas en pequeñas cantidades en Europa son, especialmente, el café Excelsa y el café Liberica. Cada especie comprende en si misma variedades, formas y tipos diferentes. A estos criterios botánicos se añaden otros, como son: el núcleo ecológico, las técnicas de cultivo, etc. Todas estas singularidades se traducen en diferencias mas o menos perceptibles en el tamaño, la forma, el color e incluso en la estructura de los granos. Adicionalmente, algunas de estas características se ven influenciadas por las técnicas de preparación, los cuidados dedicados a este trabajo y las técnicas de almacenamiento.

Desde el punto de vista comercial, la apariencia del grano de café es de gran importancia y por esta razón las técnicas de preparación y acondicionamiento se deben seleccionar y realizar cuidadosamente. Asimismo, es importante mencionar que para apreciar las cualidades organolépticas de la bebida, la degustación es obligatoria.

Características macroscópicas del café verde: desde el punto de vista granulométrico existen diferencias perceptibles entre las dos principales especies. Los granos de café Arabica son de mayor volumen y de forma más alargada; su longitud media, dependiendo de la variedad y de la región de cultivo, se sitúa entre los 8 y 15 cm. Los granos de café Canephora, por su parte, son más pequeños y de forma más redonda; su longitud media se sitúa entre los 6 y 8 cm. Adicionalmente, el grano de café Liberica es más voluminoso que las especies ante-

riores, y su longitud media generalmente supera los 15cm.

La densidad entre las dos principales especies es de gran diferencia: el café Arabica tiene una densidad relativa promedio de 0.6, mientras que la del café Canephora se situa entre 0.6 y 0.7 (con el mismo contenido de agua).

El color de los granos, de gran importancia comercial, de café Arabica varía entre el amarillo claro y el verde. Los granos de café Arabica lavados, por su parte, tienen en general un hermoso color verde, verde azulado o gris azulado; y los granos de café Canephora son de color menos determinado, en general con tendencia al grisáceo.

En algunas ocasiones los granos de café se colorean artificialmente, con el fin de darles un aspecto más atractivo. Esta práctica se tolera en general con la condición de que los productos empleados no sean tóxicos. Por ejemplo, los granos de café Arabica de buena calidad muchas veces son coloreados artificialmente en algunos países de Centroamerica.

El olor del café verde es muy característico y la presencia de granos enmohecidos, fétidos, etc., en un lote se detecta muy bien con el olfato.

Principales defectos de los granos (origen y consecuencias):

a) Color.

Granos negros: se designa así a todo grano el cual la mitad o más es interior o exteriormente de color negro. El origen de esta grave alteración debe atribuirse a una fermentación prolongada (frutos amontonados en tierra, mal secado con humedecimientos durante el mismo, etc.). Estos granos además de influir enormemente en el color del lote en observación dan a la bebida un sabor a acre y desagradable, generalmente no bebible. Durante la torrefacción sufren una pérdida de peso diferente a

los otros (13% frente a un 18 o 20%) y se distinguen fácilmente por su aspecto carbonoso y mate. Se consideran por lo tanto indeseables.

Granos grisáceos o gris oscuro: su origen puede ser variado; por ejemplo, una cosecha antes de la maduración, un comienzo de la fermentación en los granos amontonados, un mal secado o un humedecimiento durante el almacenamiento. Se consideran por lo tanto indeseables.

Granos rojizos: tienen principalmente su origen en un secado artificial demasiado forzado (temperatura demasiado elevada, duración excesiva del secado o poca movilización) lo cual afecta muchas veces los tejidos a cierta profundidad. Cuando este defecto es muy superficial se atribuye a un exceso de fermentación.

Granos plateados o cobrizos: son originados por la presencia mas o menos parcial de la película. Este defecto no es tan importante excepto para los cafes Arabica de gran calidad.

Granos blancos, blanquecinos, apalecentes y vidriosos: son en general granos poco secos o que se han humedecido y en los cuales empiezan a manifestarse los fenómenos internos de germinación (diatásicos). Tienen una densidad menor a la de los granos normales. Los granos vidriosos proceden de un secado artificial a temperatura demasiado elevada en su inicio (por la acción del vapor de agua desprendida), y por lo tanto se consideran indeseables.

Granos abigarrados: estos presentan zonas de diferentes colores y resultan de un secado incompleto e irregular.

Granos manchados: las manchas en estos granos son resultado de la acción sobre los tejidos. Estas lesiones se

producen, en general, durante el depulpado o por la acción de ataques parasitarios o criptogámicos. Una fermentación mal realizada o el empleo de agua ferruginosa en el tratamiento húmedo pueden originar esta alteración.

b) Olor y sabor.

Granos fétidos: tienen un olor pútrido y nauseabundo. Su origen es una fermentación de excesiva duración o el empleo de agua polucionada. Su apariencia no difiere apreciablemente de la apariencia de los granos normales y por lo tanto es muy difícil detectarlos. Durante la torrefacción se percibe muy claramente su mal olor y basta sólo uno de estos granos para contaminar todo el lote en proceso. La consecuencia de este defecto hace que el café no se pueda beber.

Granos ácidos: su olor es desagradable y son resultado de una fermentación mal llevada y demasiado prolongada. Comunican su mal sabor a la bebida.

Granos mohosos: estos granos están total o parcialmente de moho. Su origen se debe a un secado incompleto o humedecimiento durante el almacenamiento o durante el transporte. Tienen un olor desagradable y su mal sabor se transmite a la bebida.

c) Granos anormales, picados, fragmentados, aplastados, etc.

El origen de estos defectos puede ser variado: herencia, trabajo de preparación demasiado violento realizado por medios mecánicos o medios tradicionales sobre granos de molidos secos o insuficientemente secos, ataques de párasitos, régimen pluviométrico desfavorable, secado artificial iniciado a una temperatura demasiado elevada, etc. Estas anomalías influyen en mayor o menor gra-

do, dependiendo del tipo de defecto, en la calidad de la bebida.

Composición química del café verde:

a) Agua.

El grano de café verde comercial tiene generalmente un nivel de agua comprendido entre 10 y 13%. Se sabe que con un porcentaje superior la conservación se ve comprometida especialmente en medio húmedo, ya que no tarda en enmohecerse y decolorarse, además este nivel de agua es propicio para la vida del Escolite *Stephanoderes*. Por otro lado, es raro que los cafés verdes se comercialicen con menos del 10%. A pesar de esto, algunos autores como Morris y Wood¹ han demostrado como ciertas reacciones químicas que se producen en los cafés húmedos modifican su capacidad para dar tras la torrefacción productos aromáticos y sabrosos. Se estima que esta alteración se evita cuando el contenido de agua es inferior al 10%.

b) Minerales.

El contenido de cenizas en los granos de café verde se sitúa entre el 3 y 4%. Estas contienen principalmente potasio, sodio, calcio, magnesio, fósforo y azufre. Asimismo, se ha comprobado la presencia de algunos oligamentos, tales como: Hierro, aluminio, cobre, iodo, fluor, boro y manganeso.

c) Prótidos.

Los cafés verdes contienen del 1 al 3% de nitrógeno el cual se encuentra formando parte de prótidos y alcaloides. Algunos aminoácidos azufrados (cistina y metionina) contenidos en los prótidos del café, juegan un papel importante en la formación del aroma del café torrefacto.

d) Alcaloides y otras sustancias nitrogenadas no proteícas.

Los principales alcaloides del café son la cafeína y trigonilina y en menor cantidad los acompañan otras bases nitrogenadas (betaina y colina). Los cafés verdes contienen generalmente del 1 al 2.5% de cafeína. Los cafés Arabica son los menos ricos (0.8 a 1.5% de cafeína), mientras que los cafés Canephora (Robusta y Kouillou) su contenido varía entre 1.6 y 1.2%, aunque en algunos casos alcanzan 2.8% e incluso sobrepasan el 3%. Los cafés Libérica y Excelsa, por su parte, contienen un promedio de 1.5%. Esta sustancia se presenta en forma de cristales blancos, finos y sedosos; se funde a 234-237°C y hasta 384°C, pero se sublima ligeramente a los 100°C y claramente a los 180°C. Esto explica en parte la pérdida de esta sustancia durante la torrefacción. La cafeína existe también en otros componentes del fruto (en la pulpa 9%), así como en diversas partes del cafeto (hojas, flores y tronco). Según A. Chevalier³ los Mascarocoffeae espontáneos en Madagascar y en las Islas Mascarenas no contienen cafeína.

Los cafés verdes contienen entre 0.4 y 1.2% de trigonilina. Nevallier menciona que su descomposición durante la torrefacción está relacionada con la aparición de ácido nicotínico.

e) Lípidos.

El café contiene sustancias grasosas. Algunos autores consideran que estas sustancias influyen sobre las cualidades organolépticas durante la conservación, mientras que otros contradicen esta afirmación.

f) Glúcidos.

Estos elementos representan más de la mitad de la materia seca del grano; sin embargo, no parecen desempeñar un papel importante en las cualidades de la bebida pero le proporcionan sobre todo color y sabor acaramelado después de la torrefacción. El café verde contiene pequeñas cantidades de azúcares reductores libres y de sacarosa (5 a 8%). Entre los polisacáridos insolubles se señala la presencia de la celulosa y la lignina.

g) Ácidos y taninos.

Los granos de café verde contienen diversos ácidos orgánicos, especialmente ácidos fenólicos los cuales presentan carácter de taninos.

Principios volátiles y constituyentes del aroma.

Los elementos volátiles contenidos en el café están representados por el agua y una pequeña cantidad de aceite esencial cuya presencia se descubre por el olor durante la molienda. La cromatografía de gases ha detectado entre 250 y 300 sustancias diferentes que constituyen el aroma, pero ninguna de ellas puede caracterizarlo por sí sola.

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

TECNOLOGIA DEL GRANO DE CAPE.

En la actualidad, se disponen de dos técnicas de producción de grano de café comercial, y se les conoce como "vía húmeda" y "vía seca".

Vía húmeda.

Esta técnica esta compuesta por las siguientes etapas:

a) Depulpado.

Tiene por objeto separar la pulpa del fruto de café. El tiempo máximo entre la recolección y esta operación no debe exceder las 34 horas para de esta manera evitar la fermentación. Esta operación se realiza mecánicamente en aparatos conocidos como depulpadores los cuales pueden ser de cilindro (o tambor) o de disco. Estos aparatos se paran la pulpa por medio de presión y fricción, únicamente.

b) Demucilagínación.

Al finalizar la operación anterior, el grano de café queda cubierto de mucílago, substancia rica en pectina y muy higroscópica, el cual dificulta el secado rápido de los granos. Para separar esta substancia del grano se utiliza alguno de los procedimientos siguientes:

- Acción bioquímica o fermentación.

La fermentación se inicia al colocar el grano de café con mucílago en un medio propicio para que la descomposición de las substancias pectínicas, atribuida a una acción diatásica, se realice en acompañamiento de una fermentación de tipo láctico, principalmente, sin producir fermentaciones de tipo secundario (acética, butírica y pútrida) nocivas a la calidad del producto. Esta acción tiene gran importancia, pues actualmente se asegura que una fermentación bien llevada y limita-

da al tiempo necesario para que fluidifique el mucílago no tiene influencia en la bebida.

- Acción química.

En este caso, la fermentación del mucílago se realiza por la acción de productos químicos, tales como: cal y carbonatos alcalinos.

- Acción mecánica.

El desprendimiento del mucílago se realiza en presencia de un medio acuoso, y por medio de presión y fricción simultáneamente.

- Acción mecano- química.

Este procedimiento es una combinación de las acciones mecánica y química mencionadas.

c) Lavado.

En este proceso los granos de café se lavan con agua, para despojarlos de los restos de productos que no pudieron eliminarse en los procesos anteriores (restos de pulpa y mucílago).

En actividad posterior los granos se someten a un escudrido para eliminarles una fracción de agua por gravedad, al final de este proceso los granos de café contienen al rededor de 50-60% de contenido de agua.

d) Secado.

Sobre este proceso se habla con gran amplitud en el capítulo 2.

e) Depergaminado o descascarillado.

En este proceso se elimina la cascarilla adherida al grano de café, y se realiza por medio de un aparato cuya operación se fundamenta en la acción combinada de presión y fricción para romper la cascarilla que envuelve el grano, para luego expulsarla al exterior. Los resultados

que se obtienen son satisfactorios, siempre y cuando el café pergamino este completamente seco, pues de lo contrario el grano corre el riesgo de romperse.

Vía seca.

Esta técnica esta compuesta por las siguientes etapas:

a) Secado.

Una vez que se ha efectuado la tría de los frutos de café, se procede a realizar el proceso de secado de estos. De la misma manera, sobre este proceso se habla con gran amplitud en el capítulo 2.

b) Decorticación y descascarillado.

Al finalizar el proceso de secado, el grano de café queda cubierto por una cáscara compuesta por la pulpa, el mucílago, el pergamino y la película plateada, la cual deberá romperse al liberarlo. Este proceso se realiza mecánicamente, ya sea por choque o por compresión. Este último método tiene la ventaja de romper pocos granos de café, no calentar el grano y tener una capacidad elevada de trabajo para un gasto de energía relativamente bajo.

Operaciones comunes al tratamiento de grano de café por vía húmeda y vía seca.

Al terminar los procesos de depergaminado y decortinado, los granos de café contienen una serie de impurezas, una proporción mas o menos grande de granos defectuosos e indeseables (granos manchados, decolorados, rotos, etc.) y cáscaras rotas. Adicionalmente, es de gran importancia hacer una clasificación de granos de café para homogeneizar a un lote y así valorizarlo. Por esta razón, independientemente del tratamiento seguido es necesario realizar una serie de actividades complementarias (limpieza, tría, calibrado, mezclado y homogeneizado).

Existen actualmente algunos procedimientos y aparatos para realizar una o más de las actividades mencionadas; sin embargo, su utilización depende principalmente si se trata de pequeñas o grandes cosechas. Como ejemplo, se pueden mencionar los siguientes:

- Uno de los procedimientos más utilizados para efectuar la tria, tiene como principio básico de operación a la diferencia de densidades que existe entre los granos normales, abortados, parasitados, etc. Con este procedimiento la eliminación de impurezas y de granos indeseables no es completa, ya que, por ejemplo los granos de café negros y manchados con densidades similares a la de los granos normales no es posible separarlos. Por esta razón, al final es necesario efectuar una tria manual.
- Existe, también, un aparato llamado Catador el cual realiza simultáneamente las actividades de limpieza, tria y calibrado.
- En los últimos años se introdujo en el mercado un nuevo aparato capaz de escoger los granos de color. Este aparato esta provisto de células fotoeléctricas y se les conoce como triadores o seleccionadores electrónicos.
- Por último mencionaremos los aparatos utilizados para "mejorar", construidos por una firma alemana, los cuales efectúan una limpieza y un depelículado complementario de los granos mediante agitación y fricción en presencia o no de agua o de material inerte (p.e. serrín de madera húmedo).

Al final de estos procesos los granos de café son, si es posible, homogeneizados por tipo de clasificación. Este trabajo es indispensable para preparar lotes uniformes, y el cual es realizado manualmente o por medio de aparatos llamados mezcla-

dores, si la cosecha lo justifica.

Los procesos de tratamiento del grano terminan hasta aquí, faltando solamente el embalado de la mercancía de acuerdo a las normas en vigor. Normalmente, los sacos antes de ser expedidos son almacenados en recintos apropiados, los cuales deben estar bien aereados, protegidos de humedad, aislados del suelo y con posibilidad de realizar tratamientos insecticidas.

Ya para finalizar, a continuación se muestra el rendimiento típico obtenido al procesar 100 kg de frutos maduros de café:

45-65% de pulpa y mucilago.

35-55% de granos lavados y escurridos los cuales llevan:

55% de agua para evaporar.

45% de café pergamino con un 10-12% de humedad,
y que contiene:

20% de pergamino y

80% de café comercial.

Finalmente, el rendimiento global es de:

12.8-18% de grano de café comercial.

GENERADORES DE RADIACION INFRARROJA.

Los generadores de radiación infrarroja se clasifican de acuerdo a las siguientes características:

1) Longitud de onda máxima de radiación, dependiente de la temperatura del radiador:

- a) Radiadores claros (de onda corta) con temperaturas dentro del rango 1773-2073 K (1500-1800°C); longitud de onda máxima en el rango de $\lambda_{max} \leq 1.3\mu$, aproximadamente. En estos radiadores, parte de la de la radiación que emiten se encuentra dentro de la región visible.
- b) Radiadores oscuros (de onda larga) con temperaturas de 673-623 K (400-350°C) o menores; longitud de onda máxima de radiación en el rango de $\lambda_{max} \leq 1.3\mu$. En estos radiadores, en la radiación que emiten predominan los rayos infrarrojos.

2) Método de calentamiento:

a) Eléctricos.

- i) Lámparas incandescentes.
- ii) Tubos de cuarzo.
- iii) Elementos de resistencia:
 - de tubo metálico;
 - de cerámica, en diferentes configuraciones, y
 - no metálicos.

b) Gas.

Puesto que en este trabajo experimental se utilizan generadores de radiación infrarroja calentados por gas, es interesante mencionar con detalle algunas de las características de estos.

Los gases más utilizados para calentamiento son: gas natural, gas licuado, gas de alto horno y algunos otros.

Existen básicamente dos métodos de calentamiento:

a) La superficie radiante e impermeable al gas, es calentada en la parte inferior por medio de la flama de un pequeño chorro de un quemador de gas o bien por medio de gases calientes provenientes de un horno. En estos casos la temperatura de la superficie radiante alcanza unos 300-500°C (la longitud de onda máxima de radiación es de 4μ , aproximadamente).

b) La superficie radiante es una placa de cerámica porosa y en su interior se realiza la combustión del gas, sin flama. En estos casos, la temperatura de la superficie radiante alcanza 850-900°C, aproximadamente. Estos radiadores se clasifican como radiadores oscuros (longitud de onda máxima de 2μ , aproximadamente).

Atención especial merecen los generadores de radiación infrarroja calentados por gas, que trabajan con el método visto en el inciso b anterior.

Estos radiadores son resultado del desarrollo de los quemadores del tipo inyección atmosférica, que utilizan gas a baja presión. En estos quemadores, la mitad del aire total necesario para la combustión completa del gas es inyectado. El aire faltante se toma de la atmósfera circundante (aire secundario). Una disminución en la flama y un incremento en la temperatura del radiador, se obtienen al incrementar la cantidad de aire inyectado (aire primario) en la mezcla aire-gas; sin embargo, puesto que la rapidez de flujo de la mezcla es incrementada, la flama puede extinguirse. Por otro lado, con pequeños flujos de mezcla se corre el peligro de que la flama se introduzca en el mezclador.

Se han desarrollado, también, radiadores que funcionan con el método de combustión de superficie, en el que todo el aire necesario para la combustión es inyectado.

La figura A3 muestra un radiador de este tipo.

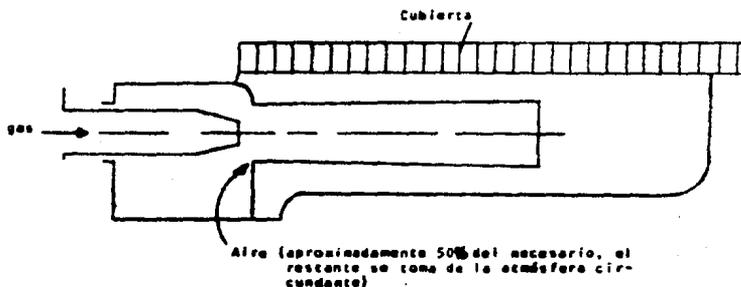


Figura A3-1 Radiador con combustión de superficie

En este caso, la mezcla aire-gas, proveniente del inyector, pasa a la cámara de distribución y de ahí entra a la cerámica porosa. La presión de la mezcla en la cámara de distribución es de 250-500 mm de c.a. La combustión de la mezcla se realiza sobre la superficie exterior de la cerámica, formando una película delgada de flama. Una gran cantidad de calor se libera en esta película, y la superficie exterior de la cerámica se calienta rápidamente (40-50 seg.) a 800-900°C. Simultáneamente, se realiza un precalentamiento a lo largo del espesor de la cerámica, lo cual ayuda a precalentar la mezcla que fluye a través de los poros de la misma y de esta manera se evita la extinción de la flama. El desplazamiento de la flama hacia el mezclador se evita por el diámetro de los poros de la cerámica el cual es menor a un diámetro crítico, y adicionalmente la baja conductividad de la cerámica ayuda a mantener baja la temperatura de la superficie interior de ésta, la cual es menor a la del punto de ignición.

Estudios realizados sobre este particular muestran lo siguiente:

- La figura A32 representa la distribución de temperaturas a lo largo del espesor de la cerámica con poros de un diámetro de 1.55 mm, en condiciones normales de operación (consumo de gas natural de 80 lt/hr).

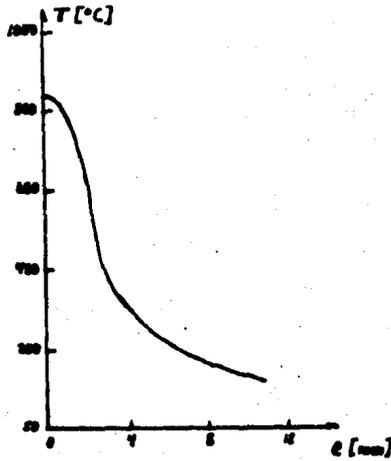


Figura A3.2 Distribución de temperaturas en la cerámica.

La figura A3.3 muestra el efecto de la alimentación del gas, sobre la temperatura de la superficie exterior y de la superficie interior de la cerámica.

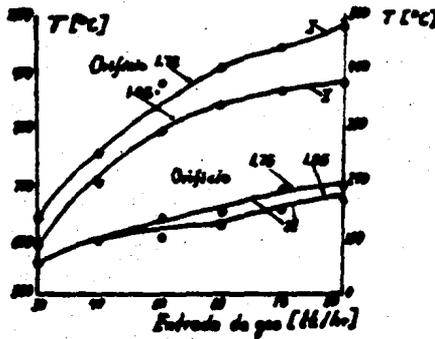


Figura A3.2 Efecto de la alimentación del gas sobre la temp. de la cerámica. I- sup. de combustión, II- sup. opuesta.

Esta curva muestra que al mantener las condiciones de operación recomendadas, la temperatura de la superficie interior de la cerámica no excede los 163°C. Al mismo tiempo, la temperatura de la superficie exterior, sobre la que se realiza la combustión, es del orden de 900°C, y el color de la superficie de un amarillo rojizo. Cuando el suministro de gas se incrementa, la temperatura de la cerámica se incrementa y algunas regiones de la superficie exterior de ésta se calientan a 1050-1100°C (su color cambia a blanco). A consecuencia de esto, la mezcla se calienta hasta el punto de ignición en la entrada de los poros de la cerámica y se origina así un desplazamiento de la zona de combustión hacia el interior de la cerámica. En algunos casos, la flama puede desplazarse hasta el mezclador, y en consecuencia, dar lugar a una extinción de la flama. Por esta razón, la temperatura límite de estos radiadores debe ser de 850-900°C. Bajo estas condiciones la flama se mantiene a una profundidad de 1-1.1 mm.

A4.0 Medición de temperatura.

Uno de los dispositivos más utilizados en el laboratorio para la medición de temperatura es el termopar. Cuando dos alambres de metales diferentes (M_1 y M_2) se juntan formando un circuito (figura A4.1), y además las temperaturas en las juntas (T_1 y T_2) son diferentes, entonces, en el circuito se genera una fem (fuerza electromotriz) E (efecto Seebeck) la cual puede medirse con un milivóltmetro o un potenciómetro, o bien, se origina una corriente la cual puede medirse con un ampermetro. A este circuito se le conoce como termopar.

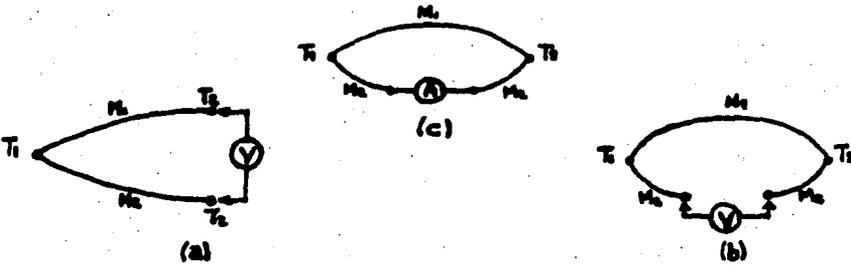


Figura A4.1

Si se permite el flujo de corriente eléctrica en el circuito, lo cual tiene como consecuencia una generación de calor por efecto joule, entonces, las temperaturas T_1 y T_2 serán diferentes a las temperaturas de los cuerpos en contacto con las juntas (efecto Peltier). Además, si la corriente fluye en dirección opuesta al gradiente unidimensional de temperatura (misma dirección al flujo de calor), dentro del conductor, entonces, se liberará calor en todo punto del mismo donde se presente esta situación; en caso contrario, se absorberá calor en todo punto del mismo (efecto Thomson).

Estos dispositivos están gobernados por los principios básicos siguientes:

1. El voltaje generado por la unión de dos metales M_1 y M_2 , con $T_1 \neq T_2$ en las juntas, no cambia al colocar un tercer metal M_3 en el circuito, si las temperaturas de las juntas entre este metal y los metales del circuito son iguales, y además se mantienen inalterables las temperaturas T_1 y T_2 (ley de los metales intermedios).

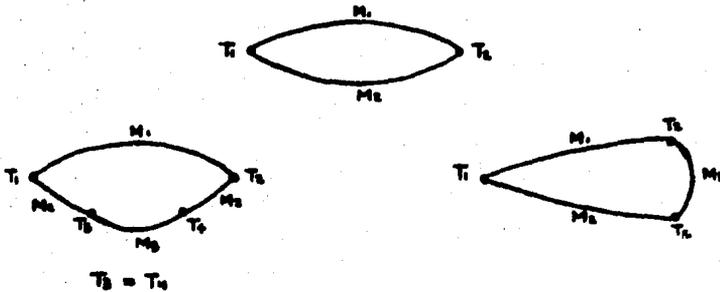


Figura A4.2

2. Si el voltaje generado por la unión de dos metales M_1 y M_2 con T_1 y T_2 en sus juntas es E_1 , y además el voltaje generado por la unión de estos dos metales con T_2 y T_3 en sus juntas es E_2 , entonces, el voltaje generado por este mismo circuito con T_1 y T_3 en sus juntas es $E_3 = E_1 + E_2$ (ley de las temperaturas intermedias).



Figura A4.3

3. Si el voltaje generado por la unión de dos metales M_1 y M_2 con T_1 y T en sus juntas es E_1 , y además el voltaje generado por la unión de los metales M_1 y M_3 con T_1 y T en sus juntas es E_2 , entonces, el voltaje generado por la unión de los metales M_2 y M_3 con T_1 y T en sus juntas es $E = E_1 + E_2$.

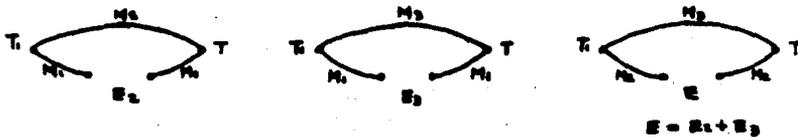


Figura A4.4

Los termopares comunmente utilizados son los siguientes:

Termopar		Sensibilidad (mv/°C)
Cromel ¹ -constantan ²	(tipo E)	
Hierro-constantan	(tipo J)	53.5
Cobre -constantan	(tipo T)	41.5
Cromel-alumel ³	(tipo K)	
platino-platino rodio	(tipo R)	
platino-platino rodio	(tipo S)	

- Ni 90% y Cr 10%
- Cobre 55% y Ni 45%
- Ni 94%, Mn 3%, Al 2% y Si 1%.

Circuitos típicos de termopar para medición de temperatura se muestran en las figuras siguientes:

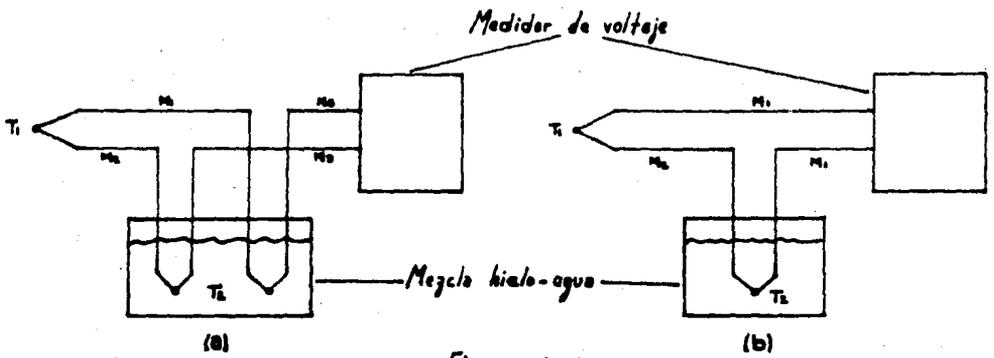


Figura A4.5

Circuitos con compensación externa.

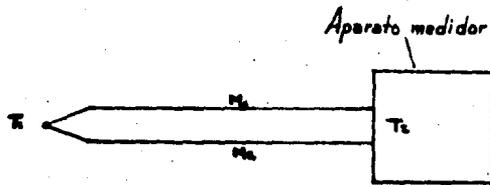


Figura A4.6

Compensación interna.

A4.1 Detección y medición de la radiación térmica.

En la actualidad, existen diferentes instrumentos que se utilizan para la detección y medición de la radiación térmica los cuales trabajan bajo dos principios básicos: detección térmica y fotodetección.

Los instrumentos que trabajan bajo el principio de la detección térmica, utilizan el efecto de calentamiento que produce la radiación térmica al incidir sobre el material, y de esta manera se establece indirectamente una relación entre el cambio de alguna propiedad del material, originado por el cambio de temperatura, y la radiación incidente. La característica básica de estos detectores es su respuesta espectral plana; es decir, su respuesta se mantiene casi constante en un intervalo muy amplio de longitudes de onda. Existen tres tipos de detectores térmicos: celdas de Golay o radiómetros de gas, bolómetros y radiómetros de termopar.

Son de interés particular los radiómetros que tienen como elemento básico al termopar (radiómetros de termopar). Los radiómetros comúnmente utilizados son de un sólo termopar o de varios termopares conectados en serie (termopila). Estos se muestran de manera esquemática en las figuras A4.7, A4. 8.

En estos radiómetros la radiación incide ya sea sobre el receptor (junta caliente) o sobre las juntas calientes, y de esta manera se crea una diferencia de temperatura(s) entre ésta(s) y la(s) junta(s) fría(s), la cual a su vez genera una fem (fuerza electromotriz) que, finalmente, se pueden relacionar con la radiación incidente. Los metales M_1 y M_2 son metales diferentes que constituyen al termopar, y en general

el metal M es de cobre.

La diferencia entre los radiómetros de termopar y de termopila esta en que, en el radiómetro de termopila de n termopares el voltaje es n veces mayor; es decir, se logra una amplificación en la señal y, por lo tanto, se obtiene un instrumento de mayor sensibilidad.

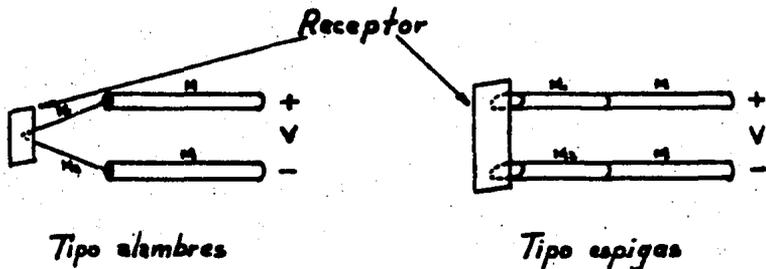


Figura A4.7
Radiómetro de termopar

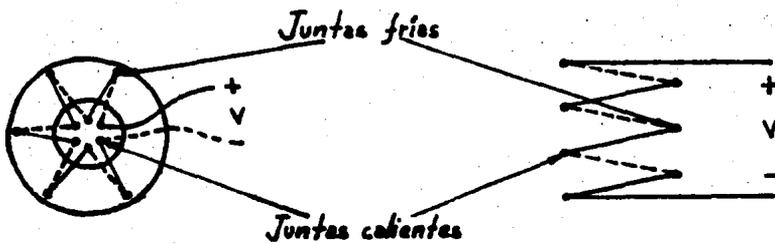


Figura A4.8
Radiómetro de termopila

A4.2 Medición del contenido de humedad en alimentos.

Estos métodos se dividen en dos grupos: directos o químicos e indirectos o físicos.

En los métodos directos, el agua es removida del material, y la cuantificación de la humedad se hace por la medida de su peso. Sus principales características son:

- se utilizan comúnmente en el laboratorio,
- tienen un alto grado de exactitud, y con precauciones apropiadas en el muestreo pueden dar valores absolutos.

Sin embargo, su operación es manual y el tiempo de duración es razonablemente grande.

Método termogravimétrico.

Tiene como elemento principal a una báscula térmica de precisión; de tal manera que, durante el secado, el material en proceso se mantiene acoplado directa o indirectamente con la báscula, y de esta forma se registra periódicamente el peso de la misma. Este proceso se suspende cuando el peso, en mediciones consecutivas, se mantiene constante. Una de las características principales de este método, es: debido a que el material no se retira del lugar del proceso, para la medida de su peso, evitando de esta manera el enfriamiento y la evaporación posterior, entonces, la medición del contenido de humedad es aproximadamente exacta.

A4.3 Medición de flujos.

Existe una amplia variedad de instrumentos medidores de flujo; y la diferencia principal entre ellos se sustenta en su principio de funcionamiento.

El rotámetro es uno de estos instrumentos, y esta constituido por un tubo vertical internamente cónico, en general transparente, y por un elemento flotador (figura A4.10). El fluido de interés entra por la parte inferior del tubo y, en consecuencia, el flotador se desplaza hacia arriba hasta una posición en la que se establece un equilibrio de fuerzas.

La posición de equilibrio del flotador esta determinado por:

$$\overline{W} = F_a + F_f + F_p \quad (A4.11)$$

donde: W - peso del flotador,
 F_a - fuerza de arrastre hidrodinámica,
 F_f - fuerza de flotación,
 F_p - fuerza de presión.

o bien

$$\frac{\rho_f V_f g}{g_c} = \eta \frac{\rho V_f V^2}{2g_c} + \frac{\rho V_f g}{g_c} + \rho A_f \quad (A4.12)$$

donde: ρ_f , V_f y A_f - densidad, volumen y area frontal del flotador, respectivamente.

η - coeficiente de arrastre,

- A - area libre en y ,
- ρ - densidad del fluido en y ,
- P_i - presión en l ,
- g - aceleración de la gravedad,
- g_c - constante de conversión de unidades.

Además: $A = \pi(\phi^2 - D^2)$; ϕ - diámetro interno del tubo en y ,

$$\phi = \frac{y}{L} (\phi_2 - \phi_e) + \phi_e \quad (A4.13)$$

Analizando el caso de fluido incompresible; es decir, $\rho = \text{cte}$ y definiendo $G^2 = (AV)^2$, entonces:

$$\frac{\rho V_t g}{g_c} = \eta \frac{\rho G^2}{2A g_c} + \rho \frac{V_t g}{g_c} + P A_f \quad (A4.14)$$

En la ecuación inmediata anterior se observa que: suponiendo conocido η , todos los parámetros, a excepción de G e y , se conocen; entonces, se dispone de una relación en G e y ; es decir, una relación entre el gasto volumétrico y la posición del flotador.

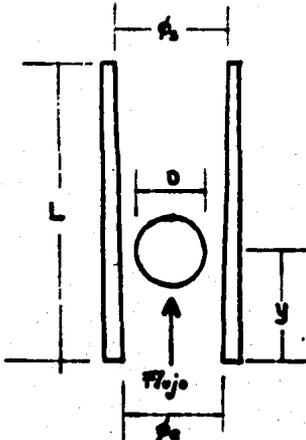


Figura A4.10

Rotámetro.

A5.1 Calibración de rotámetros para medición de flujos de gas L.P.

Existen varios métodos para la calibración de rotámetros que se utilizan en la medición de flujos de gas, algunos de ellos son totalmente independientes (utilizan técnicas e instrumentos de medición diferentes a los patrones de medición de flujos) y otros son independientes (utilizan patrones de medición de flujos).

El método seleccionado para la calibración de los rotámetros usados en la medición de flujos de gas L.P., utiliza como elemento básico un rotámetro debidamente calibrado (rotámetro patrón). Este método consiste en acoplar en serie el rotámetro patrón y el rotámetro por calibrar (rotámetro de prueba), sellar perfectamente las fugas de gas entre los rotámetros, garantizar la posición vertical entre ellos, y finalmente permitir diferentes flujos de gas para posteriormente establecer la relación entre las escalas de estos. Figura A5.1

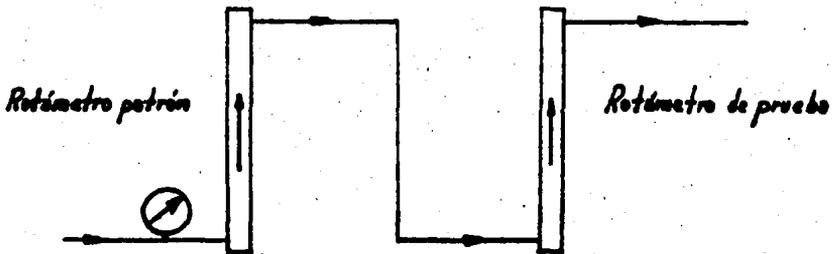
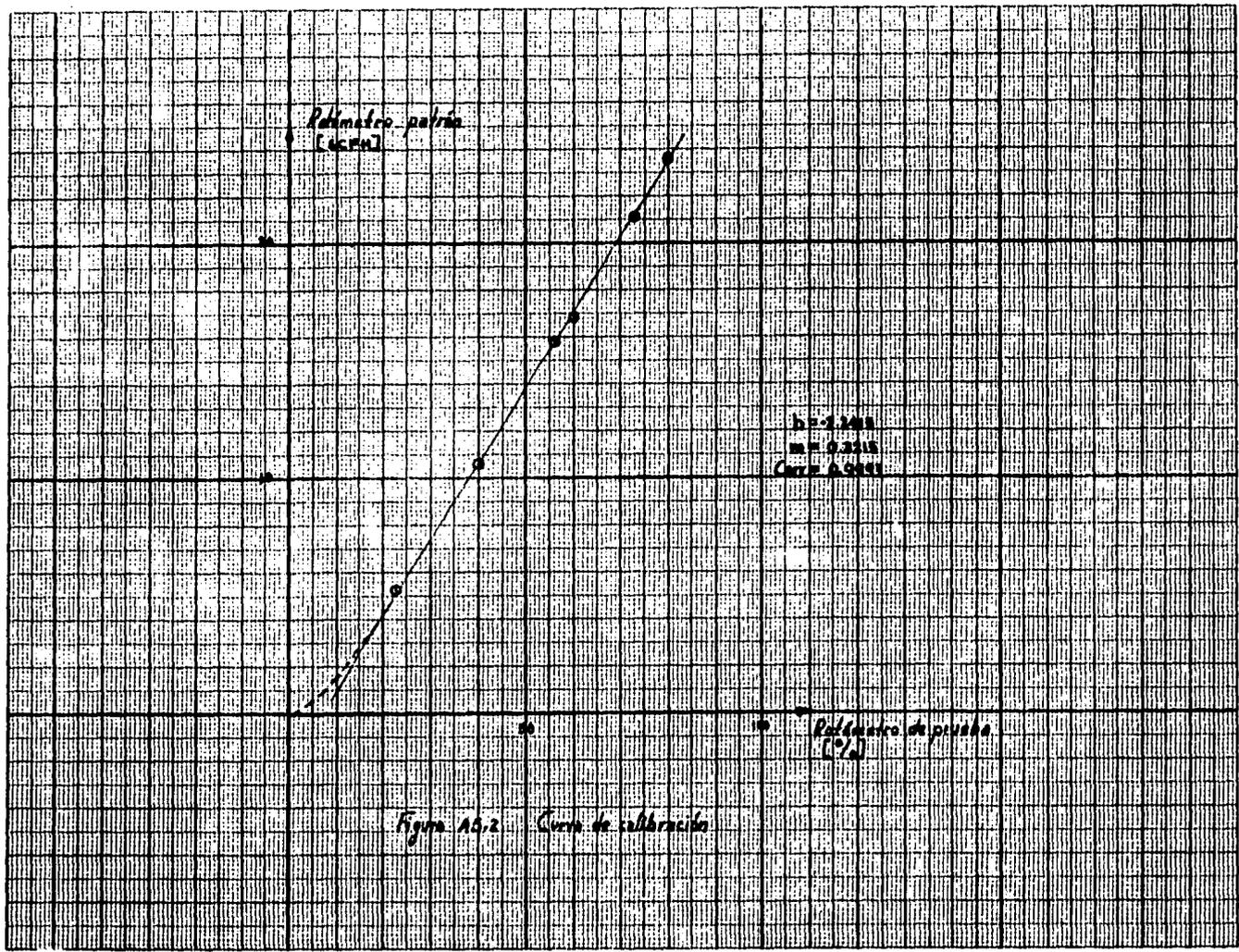


Figura A5.1 Instalación de rotámetros

La curva de calibración de estos rotámetros se muestra en la figura A5.2



A5.2 Calibración de un radiómetro de termopila.

Este método de calibración se sustenta en el establecimiento de una relación entre el flujo neto de calor radiante en el elemento sensor del radiómetro (termopila) y la respuesta eléctrica de la misma (voltaje). Para lo grar esto se propuso:

- a) Instrumentar experimentalmente el intercambio de calor por radiación entre el radiómetro y un cuerpo de prueba, ambos con propiedades radiantes y temperaturas conocidas.

El equipo de calibración utilizado está constituido por el radiómetro de termopila, el cuerpo de prueba (placa de acero de 15 15 cm y 1.5 mm de espesor cubierta con negro de humo), un calefactor eléctrico y equipo adicional para medición de temperatura y voltaje. La posición relativa entre estos se muestra en la figura A5.3

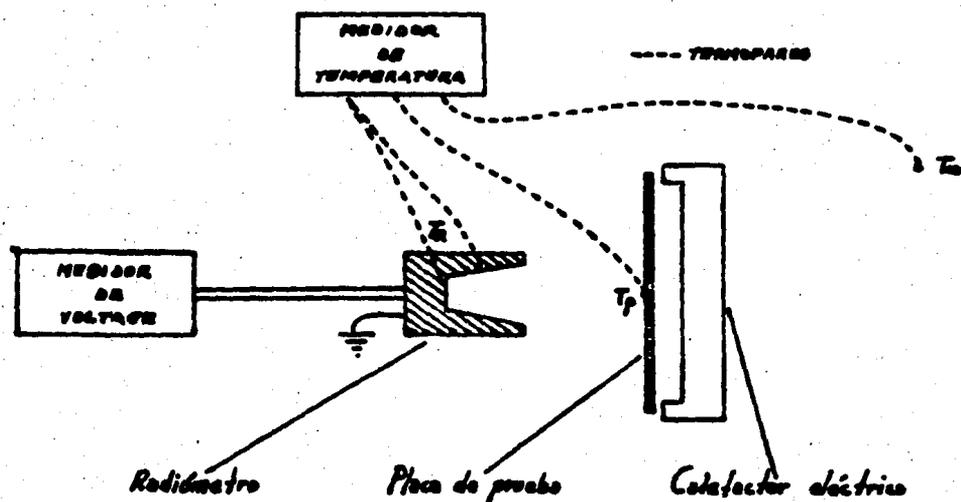


Figura A5.3 Equipo de calibración

- Descripción de los experimentos.

Inicialmente, se permitió el paso de corriente eléctrica a través del calefactor, y se esperó un tiempo suficiente para que el cuerpo de prueba alcanzara una temperatura considerada de equilibrio térmico con el medio ambiente. Posteriormente, se midieron las temperaturas del medio ambiente, del radiómetro y de la placa de prueba, y además se colocó el radiómetro frente a la placa para realizar la medición del voltaje. Este voltaje se registró hasta que el sistema radiómetro-placa de prueba-medio ambiente alcanzó el equilibrio térmico. A continuación, este dispositivo se retiró de la placa de prueba, y se le suministró otra corriente al calefactor eléctrico para así disponer de otra temperatura en la placa y repetir el procedimiento de medición anterior. Estas mediciones se realizaron manteniendo constantes tanto la geometría de los cuerpos como su posición relativa.

- Resultados obtenidos.

Estos se muestran en la tabla A5.4

- b) **Elaborar un modelo matemático para determinar el flujo de calor.**

Este modelo se realizó considerando lo siguiente:

- 4 cuerpos intercambian calor, figura A5.5**
- Intercambio de calor por radiación únicamente.**
- Cuerpos isotérmicos y grises.**

Tabla A5.4 Tabla de resultados.

T_a [K]	T_c [K]	T_p [K]	U_n [mV]
293.65	295.05	300.65	1.36
294.65	295.65	307.25	3.03
295.15	296.15	315.35	5.20
296.95	296.85	328.85	9.15
296.65	297.55	341.55	13.25
297.65	298.35	357.35	19.30
297.90	298.35	381.65	30.00
298.35	298.55	414.05	47.40
298.65	298.15	448.15	69.50
298.65	297.85	491.55	103.40

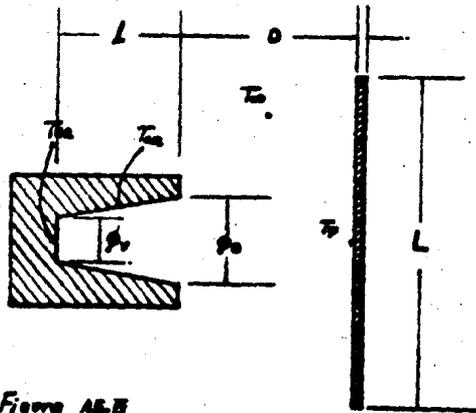


Figura A5.5

Cuerpos intercambiando calor por radiación

ca - base del radiómetro

ca - caso del radiómetro

p - placa de prueba

m - medio ambiente

- Emisión y reflexión difusa.
- Flujos uniformes de calor en los cuerpos.
- Medio no participante.
- Estado permanente.
- Propiedades radiantes y temperaturas conocidas.

Las ecuaciones que gobiernan dicho intercambio de calor son las siguientes, referencias

$$R_i = \epsilon_i \sigma T_i^4 + \rho_i \sum_{j=1}^n R_j F_{i-j}; \quad i=1,2,\dots,n; \quad n=4$$

$$Q_i = R_i - \sum_{j=1}^n R_j F_{i-j}; \quad i=1,2,\dots,n; \quad n=4$$

o bien

$$\sum_{j=1}^n \frac{\delta_{ij} - \rho_i F_{i-j}}{\epsilon_i} R_j = \sigma T_i^4; \quad i=1,2,\dots,n; \quad n=4 \quad (A5.6)$$

$$Q_i = R_i - \sum_{j=1}^n R_j F_{i-j}; \quad i=1,2,\dots,n; \quad n=4 \quad (A5.7)$$

donde:

1 = p , 2 = BR , 3 = CR y 4 = ∞

R_i - Radiosidad

ϵ_i - Emitancia

ρ_i - Reflectancia

T_i - Temperatura

Q_i - Flujo de calor en i

F_{i-j} - Factor de forma de i a j

σ - Constante de Stefan-Boltzmann

δ_{ij} - Delta de Kronecker

i - cuerpo i ésimo , j - cuerpo j ésimo

Y además, las ecuaciones correspondientes a los factores de forma

$$\sum_{j=1}^n F_{i-j} = 1 \quad ; \quad i=1,2,\dots,n \quad ; \quad n=4 \quad (\text{A5.8})$$

$$A_i F_{i-j} = A_j F_{j-i}$$

la ley de Kirchhoff

$$\alpha_i = \varepsilon_i \quad (\text{A5.9})$$

y la ley de reflexión y absorción para cuerpos opacos

$$\alpha_i + \beta_i = 1 \quad (\text{A5.10})$$

Consideraciones adicionales.

- Cuerpo 2 (termopila cubierta con pintura negra) con $\varepsilon_2 = \alpha_2 = 0.9$ y $\beta_2 = 0.1$
 - Cuerpo 3 (aluminio) con $\varepsilon_3 = \alpha_3 = 0.05$ y $\beta_3 = 0.95$
 - Cuerpo 4 (medio ambiente) es un cuerpo negro
 - En el cálculo de los factores de forma se considera al cuerpo 1 (cuerpo de prueba), placa cuadrada, como cuerpo circular con la misma área.
- La ecuación que permite calcular el factor de forma entre cuerpos circulares paralelos cuyos centros coinciden con la normal a ambos es

$$F_{i-1} = \frac{1}{2} \left[\chi - \sqrt{\chi^2 - 4 \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2} \right] \quad (\text{A5.11})$$

donde:

$$R_1 = \frac{r_1}{h} \quad ; \quad R_2 = \frac{r_2}{h} \quad ; \quad \chi = 1 + \frac{1 + R_2^2}{R_1^2}$$

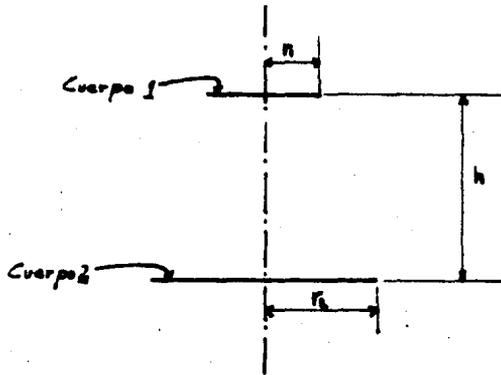


Figura A5.11 bin

Además, se considera la existencia de un cuerpo imaginario (cuerpo 5) circular y negro, figura A5.5

Recordando que para el caso de cuerpos cóncavos, el factor de forma de un cuerpo sobre sí mismo es nulo entonces,

$$F_{i-i} = F_{i-1} = 0$$

Para el caso particular, mostrado en la figura A5.5, donde:

$$L = 0.15 \text{ m}$$

$$l = 0.05 \text{ m}$$

$$D = 0.02 \text{ m}$$

$$\phi_1 = 0.011 \text{ m}$$

$$\phi_2 = 0.0315 \text{ m}$$

se resuelve, por regla de Kramer, el sistema de ecuaciones (A5.6). Y además, considerando en este siste-

Las soluciones válidas para valores cercanos a la unidad, de la emitancia del cuerpo 1, las ecuaciones (A5.7) nos conducen a

$$Q_2 = \epsilon_p \sigma (-0.6623 T_1^4 + 0.0212 T_2^4 + 0.6411 T_3^4) + 0.225 \sigma T_2^4 - 0.1442 \sigma T_3^4 - 0.672 \sigma T_4^4 \quad (A5.12)$$

Puesto que en los experimentos se observó que $T_3 \approx T_4$ y además realizando el cambio de variable visto con anterioridad, la ecuación (A5.12) se escribe finalmente de la siguiente manera:

$$Q_2 = \epsilon_p \sigma (0.6623 T_p^4 - 0.0212 T_R^4 - 0.6411 T_\infty^4) + 0.672 \sigma T_\infty^4 - 0.6808 \sigma T_R^4 \quad (A5.13)$$

Suponiendo que $\epsilon_p = 0.95$, y sustituyendo este valor y los valores de las temperaturas de la tabla A5.4, en la ecuación (A5.13) se obtienen los valores respectivos de Q_2 . Estos valores y los voltajes del radiómetro se enlistan en la tabla A5.14

Tabla A5.14 Voltajes del radiómetro y flujo neto de calor radiante.

Q_2 [W/m^2]	V_R [mV]
19.352	1.36
43.739	3.03
76.749	5.20
138.973	9.15

Continuación.

204.197	13.25
297.488	19.30
472.682	30.00
763.610	47.40
1155.830	69.50
1800.720	103.40

Estos resultados se presentan también en la gráfica A5.15

Ajustando, por mínimos cuadrados, una línea recta por tramos a este conjunto de puntos, se obtienen las siguientes correlaciones

$$\text{Recta } \underline{1} \quad R = 0.0419 \text{ y } B = 0.4832 \quad \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} U_R = R q_a + B \quad (\text{A5.16})$$

$$\text{Recta } \underline{2} \quad R = 0.0538 \text{ y } B = 6.1509 \quad \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} U_R = R q_a + B \quad (\text{A5.17})$$

- Cálculo de la emitancia de diferentes cuerpos.

Puesto que se dispone de una fórmula que permite determinar el flujo neto de calor en el elemento sensor del radiómetro, ecuación (A5.13), y además de una relación entre este flujo de calor y el voltaje del radiómetro, ecuaciones (A5.16) y (A5.17), entonces, sustituyendo la primera en la forma general de las dos últimas, se obtiene una relación entre el voltaje del radiómetro, la emitancia y temperatura del cuerpo de prueba, y las temperaturas del radiómetro y del medio ambiente, ecuación (A5.18).

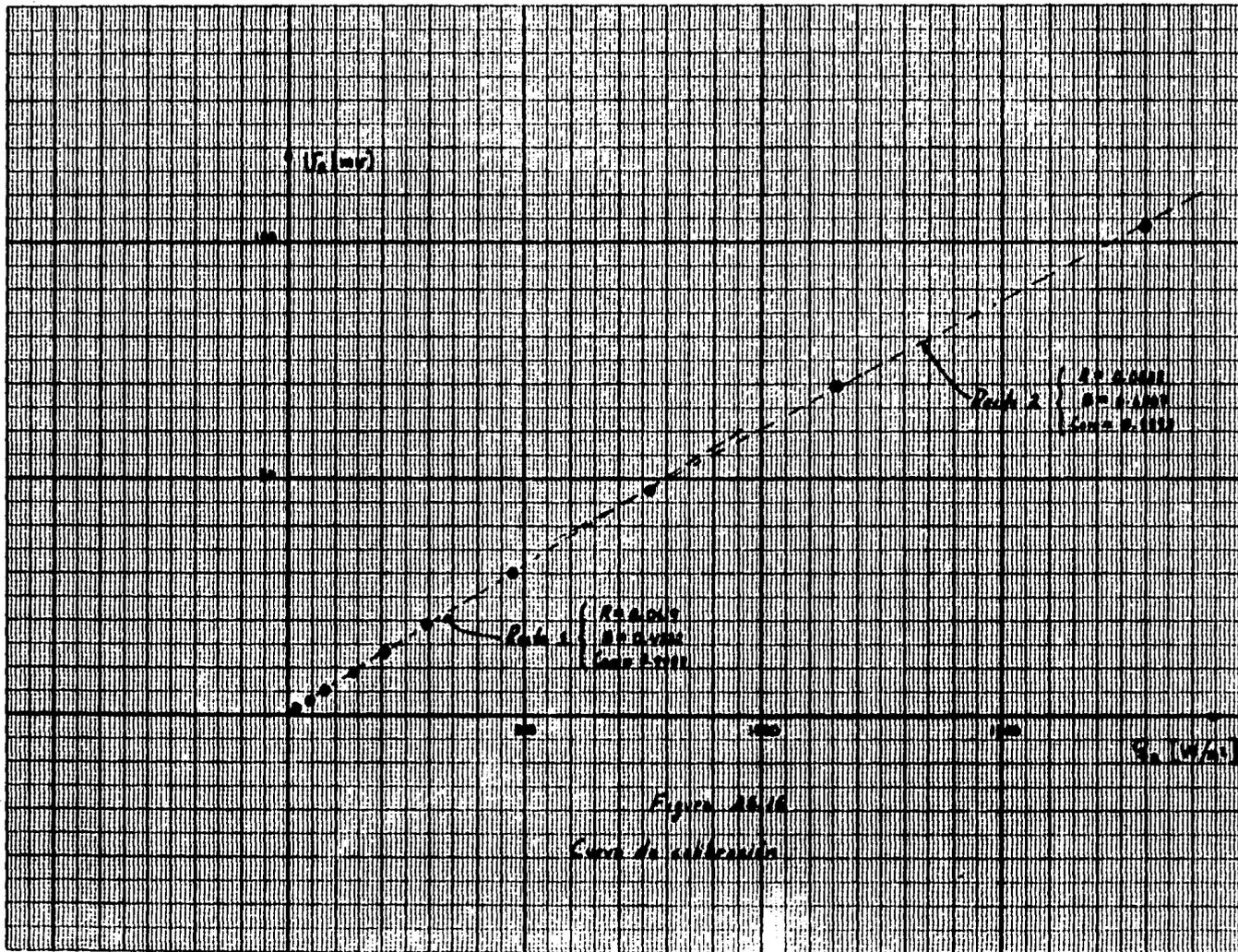


Figure 10.10
 Curve for calibration

$$\epsilon = \frac{\left(\frac{U_R - B}{R} + 0.6888 \sigma T_R^4 - 0.678 \sigma T_{\infty}^4 \right)}{\sigma \left(0.6623 T^4 - 0.0212 T_R^4 - 0.6811 T_{\infty}^4 \right)} \quad (A5.18)$$

Esta última ecuación permite determinar la emitancia del cuerpo de prueba, conocidos el voltaje del radiómetro y las temperaturas de los cuerpos involucrados.

- Verificación de la validéz de la calibración.

Se midió y comparó, con los valores reportados en la literatura, la emitancia de los dos siguientes especímenes.

- a) Pintura negra mate depositada sobre una placa de acero a 313.15 K.

Calculada - $\epsilon_m = 0.97$

Reportados - $\left\{ \begin{array}{l} \epsilon_m = 0.96, \text{ laca negra mate a } 311 \text{ K, ref.} \\ \epsilon_m = 0.96 \text{ a } 0.98, \text{ laca negra mate a } \\ 311 - 366.5 \text{ K, ref.} \end{array} \right.$

- b) Pintura de aluminio depositada sobre una placa de acero a 313.15 K.

Calculada - $\epsilon_{Al} = 0.44$

$\left\{ \begin{array}{l} \epsilon_{Al} = 0.27 \text{ a } 0.67, \text{ pintura de aluminio a } \\ 373.15 \text{ K, variando el añejamiento } \\ \text{ y contenido de aluminio, ref.} \end{array} \right.$

Reportados - $\left\{ \begin{array}{l} \epsilon_{\text{Al}} = 0.52, \text{ pintura de aluminio (10\% Al} \\ \text{y 20\% laca) a 373.15 K, ref.} \\ \epsilon_{\text{Al}} = 0.65, \text{ laca aluminizada a 311 K,} \\ \text{ref.} \end{array} \right.$

Memoria de cálculos numéricos.

A6.1 Cálculo numérico de los siguientes parámetros: T_c , ϵ_c , ϵ_r y D .

- a) La referencia obtiene una variación aproximadamente lineal para T_c^* y ϵ_c^* en la mayor parte del tiempo de duración del secado; estas variaciones son las siguientes:

$$T_c^* = 55.8631 + 1.2954 t \quad (A6.1)$$

$$\epsilon_c^* = 0.26 + 0.0181 t \quad (A6.2)$$

donde: T_c^* y ϵ_c^* - temperatura ($^{\circ}C$) y emitancia del grano de café.

t - tiempo en horas.

Calculando el valor promedio de T_c^* y ϵ_c^* , haciendo uso de las ecuaciones (A6.1) y (A6.2), se obtiene.

$$T_c = 65.58^{\circ}C = 338.73 K$$

$$\epsilon_c = 0.396$$

- b) Considerando lo dicho en la sección 4.2.3, entonces, el area total de radiación esta compuesta por:

$$A_r = A_{ca} + A_a \quad (A6.3)$$

donde: A_r - area total del radiador

$$A_r = (0.15) (0.15) = 0.0225 m^2$$

A_a - area de la malla de alambre (Inconel)

$$A_a = 86 (0.15) (0.001) = 0.0129 \text{ m}^2 = 0.57 A_r$$

No. de alambres longitud diámetro.

Sustituyendo los valores de A_r y A_a en la ecuación (A6.3) se obtiene:

$$A_{ca} = 0.0225 - 0.0129 = 0.0096 \text{ m}^2 = 0.43 A_r .$$

La emitancia del radiador, considerando la relación entre áreas, se determina de la siguiente manera:

$$E_r = 0.43 E_{ca} + 0.57 E_a \quad (A6.4)$$

donde: E_{ca} - emitancia de la cerámica

E_a - emitancia de la malla de alambre.

Puesto que,

$$E_a = 0.8 E_{\text{niquel}} + 0.14 E_{\text{cobre}} + 0.06 E_{\text{hierro}}$$

entonces,

$$E_r = (0.43) (0.8 E_{\text{niquel}} + 0.14 E_{\text{cobre}} + 0.06 E_{\text{hierro}}) + 0.57 E_a .$$

Debido a que la oxidación se presenta con más rapidez a temperaturas altas, entonces, el cálculo de E_a se hace con los valores de emitancia para metales oxidados; y por lo tanto,

$$E_a = 0.8 (0.31) + (0.14) (0.73) + (0.06) (0.74) \\ = 0.3946 .$$

y

$$\epsilon_r = (0.43) (0.90) + 0.57 (0.3946) = 0.612.$$

NOTA: las dimensiones de las areas y los componentes de los materiales del radiador, los proporcionó el fabricante; los valores de las emitancias se tomaron de la referencia .

c) Se tiene que:

$$q_{r-c} = \frac{\sigma (T_r^4 - T_c^4)}{\frac{1-\epsilon_r}{\epsilon_r} + \frac{1}{F_{r-c}} + \frac{1-\epsilon_c}{\epsilon_c}}$$

y por lo tanto,

$$\frac{1}{F_{r-c}} = \frac{\sigma (T_r^4 - T_c^4)}{q_{r-c}} - \frac{1-\epsilon_r}{\epsilon_r} - \frac{1-\epsilon_c}{\epsilon_c} \quad (A6.5)$$

donde:

$$x = \frac{a}{b}$$

$$F_{r-c} = \frac{2}{\pi x^2} \left\{ \int_0^x \left[\frac{(1+x^2)^2}{1+2x^2} \right]^{1/2} + 2x\sqrt{1+x^2} \tan^{-1} \left(\frac{x}{\sqrt{1+x^2}} \right) - 2x \tan^{-1} x \right\}$$

Considerando $T_r = 1033.15$ K, y además sustituyendo todos los valores de los parámetros en la ecuación (A6.5), se obtiene:

$$\frac{1}{F_{r-c}} = \frac{0.5669 \times 10^{-8} (1033.15^4 - 338.73^4)}{745} - \frac{(1-0.612)}{0.612} - \frac{(1-0.396)}{0.396}$$

$$\frac{1}{F_{r-c}} = 83.541.$$

o bien,

$$\frac{1}{x^2} \left\{ \int_0^x \left[\frac{(1+x^2)^2}{1+2x^2} \right]^{1/2} + 2x\sqrt{1+x^2} \tan^{-1} \left(\frac{x}{\sqrt{1+x^2}} \right) - 2x \tan^{-1} x \right\} = 0.0188$$

Utilizando un método iterativo, para resolver la ecuación anterior, se obtiene:

$$\chi = 0.197.$$

y por lo tanto,

$$D = 0.76 \text{ m}.$$

A6.2 Cálculo de tuberías.

En general, el cálculo de la pérdida de presión del flujo de un fluido dentro de conductos cerrados se realiza por medio de la ecuación de Darcy-Weishback, que es la siguiente:

$$P_1 - P_2 = f \frac{L}{D} \frac{U^2}{2g} \gamma \quad (\text{A6.6})$$

donde: P_1 y P_2 - presiones absolutas en las secciones 1 y 2
 $[\text{kg/cm}^2]$

D - diámetro interior del tubo $[\text{m}]$

L - longitud del tubo $[\text{m}]$

U - velocidad promedio en el interior del tubo
 $[\text{m/s}]$

g - aceleración de la gravedad $[\text{m/s}^2]$

γ - peso específico promedio $[\text{kg/m}^3]$

f - factor de fricción

El flujo másico se define como

$$\dot{m} = \rho U A = G A \quad (\text{A6.7})$$

donde: G - gasto volumétrico $[\text{m}^3/\text{s}]$

Utilizando el peso específico δ en lugar de ρ , y usando el peso específico a condiciones estandar (15°C y 10332 kg/m^3), la ecuación para un flujo másico constante es:

$$G_0 \delta_0 = G \delta \quad (\text{A6.8})$$

donde: δ_0 - peso específico a condiciones estandar

Considerando un proceso isotérmico; es decir,

$$\frac{P}{\rho} = \frac{B}{\rho_0} \quad (\text{A6.9})$$

entonces,

$$y = \frac{y_0}{\rho_0} \left(\frac{P_1 + P_2}{2} \right)$$

donde: $P = \frac{P_1 + P_2}{2}$

Sustituyendo (A6.9) en (A6.8) se obtiene:

$$G = \frac{2G_0 P_0}{P_1 + P_2}$$

y por lo tanto

$$\frac{2G_0 P_0}{P_1 + P_2} = \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) v$$

de donde

$$v^2 = \left(\frac{2G_0 P_0}{\pi (P_1 + P_2) D^2} \right)^2 \quad (\text{A6.10})$$

Ahora, sustituyendo (A6.9) y (A6.10) en (A6.6) se obtiene:

$$P_1 - P_2 = f \frac{L}{D} \frac{1}{2g} \left(\frac{2G_0 P_0}{\pi (P_1 + P_2) D^2} \right)^2 \frac{\rho_0}{\rho} \left(\frac{P_1 + P_2}{2} \right)$$

Simplificando, homogeneizando unidades y además sustituyendo $R_0 = 1.03 \text{ kg/cm}^2$ y $\rho_0 = 1.225 \text{ S kg/m}^3$, y el valor de $f = 0.0025$ recomendado para tuberías de alta presión (), se obtiene:

$$P_1 - P_2 = 0.00707 \times 10^{-12} \cdot \frac{S L G_0^2}{D^5} \left[\frac{\text{kg}^2}{\text{cm}^4} \right] \quad (\text{A6.11})$$

Sustituyendo el valor de L , D , S , G_0 en la ecuación (A6.11), se determina la siguiente caída de presión; siendo las unidades de L y D m, G_0 en m^3/hr y S adimensional

Para este caso particular en que

$$L = 3\text{m}$$

$$D = 0.0127\text{m}$$

$$S = 1.53$$

$$G_0 = 0.22653 \text{ m}^3/\text{hr}$$

se obtiene la siguiente pérdida de presión

$$P_1 - P_2 = 0.00001 \text{ kg/cm}^2.$$

Referencias.

- 1.- El café.
René Coste.
Técnicas agrícolas y producciones tropicales.
Ed. Elumo.
- 2.- Producción moderna de café.
A.E. Harer.
CECSA.
- 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, P.E. Jones and R.P. Chasmar.
Oxford at the Clarendon Press, 1957.
- 5.- Radiación Infrarroja.
Ivan Simón.
Ed. Reverté Mexicana, S.A., 1968.
- 6.- Métodos experimentales para ingenieros.
J.P. Holman
Mc Graw-Hill
- 7.- Application of infra-red radiation in food processing.
A.S. Ginsburg.
Leonard Hill Books, 1969.
- 8.- Algunas consideraciones sobre el secado del fruto de café mediante radiación térmica infrarroja.
Adrián Valera Negrete.
Tesis, Facultad de Ingeniería UNAM, 1980
- 9.- Transferencia de calor.
Osizik, N.
Mc Graw Hill Company,
- 10.- Principios de transferencia de calor.
Frank Kreith.
Herrero Hermanos, S.A., 1970.
- 11.- Transmisión de calor por radiación.
Frank Kreith.
CECSA, 1965.
- 12.- Thermal radiation heat transfer.
Siegel - Howell.
McGraw-Hill, Kogakusha, LTD, 1972.

Referencias de articulos.

- 1a.- Fluid bed drying and roasting of coffee beans.
M. Sivetz.
Corvallis, Oregon, USA, 97330.
- 2a.- Producción de biogás a base de pulpa de café.
Fernando Arcila Otero.
Centro Nacional de Investigación de café (CENICAFE)
Chinchiná (Caldas), Colombia, Nov.,1979.
- 3a.- Como producir gas combustible con pulpa de café.
Hernán Calle V.
Boletín técnico # 3.
Centro Nacional de Investigaciones de café.
Chinchiná (Caldas), Colombia, 1974.
- 4a.- General problems of drying theory and technique.
P.D. Lebedev and A.S. Ginzburg.
Progress in heat and mass transfer, Vol. IV.
- 5a.- Improvements relating to the treatment of cereals and
other seeds.
David Newton.
Patent specification, complete specification published
2 jan., 1975.
- 6a.- Techniques for measurement of moisture content of foods
Endel Karmas.
Food technology, april,1980.
- 7a.- Curso sobre secado de granos.
Jaime Cervantes de Gortari.
UNAM, 1984.
- 8a.- El secado infrarrojo de café.
J.A. Valera y Jaime Cervantes
VI Congreso de la Academia Nacional de Ingeniería, A.C.
1980.