

LA TOSTACION CONTINUA DEL CAFE EN CAMA FLUIDA¹

Por Carlos Rölz, J. Francisco Menchú, Jorge Sandoval y Paul Simón²

S U M M A R Y

The purpose of this investigation was to establish the possibility of the continuous roasting of coffee beans in a fluidized bed. A detailed description of the equipment used is given. Data on the dynamics of fluidization of green and roasted beans, on characteristics of the mixture of solids in the bed, and on heat transfer from the air to the beans were obtained.

From the results it was possible to calculate two important parameters of the fluidization, the minimum velocity and the pressure drop associated with the air flux. It was found that within certain limits of temperature, air velocity and time of residence of the beans in the bed, it is possible to roast coffee in a continuous way. The organoleptic qualities of this coffee are similar to those of coffee roasted in the traditional system with the additional advantage of a more homogeneous color of the individual beans.

1) Introducción

La tostación del café es la operación en la cual se acentúan y se forman químicamente las sustancias o compuestos químicos que originan el aroma característico del grano de café, como también las causantes del olor y del sabor de la infusión acuosa o extracto de los granos tostados. Este conjunto de reacciones químicas se logra al someter los granos de café oro a la acción de una temperatura elevada por cierta cantidad de tiempo, condiciones que varían según el tipo de café y equipo empleados y el grado de tueste deseado.

La fluidización, por otro lado, es el nombre que se le ha dado a una forma específica de poner en contacto íntimo a los sólidos con los fluidos. Consiste en suspender los sólidos en una corriente de un fluido, formando un lecho o cama, en donde las partículas poseen una gran movilidad y mezcla. Fue desarrollada para la industria petroquímica pero ha sido adaptada, con mucho éxito, en diversas ramas o campos de la ingeniería química aplicada tanto en la industria como en la agricultura.

Siendo la naturaleza de la tostación del grano del café, el contacto íntimo de éste por un tiempo determinado, con un flujo de aire caliente, la factibilidad de tostar continuamente en un lecho o cama fluida se manifiesta claramente. Con esta idea, como referencia, se diseñó y se construyó un equipo de cama fluida en

la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos y recientemente se completaron los ensayos sobre la tostación del grano (22, 23) siendo estos trabajos asesorados por personal de la ANACAFE y el ICAITI.

2) Equipo empleado en la tostación comercial

La operación de tostar café se practica comercialmente de dos maneras diferentes: a) en forma de lotes o "batch" y b) en forma continua. Sivetz y Foote (25), sumanizan en forma clara e informativa el desarrollo industrial y la aplicación de nuevas técnicas en el diseño de los tostadores comerciales. El equipo usado en el tostado en lotes, consiste en un tambor giratorio, que puede o no ser perforado, donde los granos de café son agitados y calentados con aire a alta temperatura por un tiempo determinado. Esta operación intermitente se ha llegado a controlar adecuadamente con el objeto de lograr una tostación uniforme en todos los granos, condición que implica una homogenización de la temperatura en el tostador. El equipo de operación continua consiste en un cilindro rotatorio con un flujo de aire en el sentido radial y un movimiento de sólidos en el sentido longitudinal. En ambos tipos de operación, el aire puede calentarse por gases de combustión (en la mayoría de los casos), o por energía radiante (infrarroja, dieléctrica, etc.). El café ya tostado es enfriado rápidamente empleando aire o agua atomizada a temperatura ambiente o ambos.

3) Referencias previas en la tostación de café por fluidización

En 1940, Kneale y Cannon (10), patentaron un método de tostar el grano de café entero o molido en un aparato en donde éste se suspendía (fluidizaba), en una corriente de aire caliente a la temperatura deseada. La operación

¹ Presentado en el X Congreso Latinoamericano de Química, San José, Costa Rica, Febrero de 1969.

² Instituto Centroamericano de Investigaciones y Tecnología Industrial (ICAITI), Asociación Nacional del Café de Guatemala, Compañía Texaco de Guatemala y Empresas Simón de Guatemala, respectivamente.

descrita por los autores es eminentemente del tipo "batch", o de lotes y la principal ventaja anotada es que en la operación, las partículas de café se segregaban en capas de acuerdo al tamaño que poseían y por lo tanto estaban sometidas a diferentes temperaturas, lo que originaba un tostado más homogéneo.

En 1944, Goldfine (8), patentó otro método, en el cual, se tostaban los granos de café suspendiéndolos y arrastrándolos en una corriente de aire caliente a altas velocidades. La principal ventaja anotada por el autor era la homogeneidad y rapidez con que la tostación se llevaba a cabo.

Recientemente, Smith (26), patentó otro aparato, del tipo de tostación fluida, en donde

la característica principal de construcción está en un cono interior rotatorio, cuyo movimiento le imprime a las partículas sólidas mayor movimiento y mezcla. Su esquema incluye el uso de gases inertes, una unidad de recuperación de aromas y un dispositivo para poder operar a presiones por arriba de la atmosférica. La operación del aparato, sin embargo, es del tipo de lotes, teniéndose que programar un ciclo discontinuo de operación en la carga y descarga del material.

En las tres patentes citadas anteriormente, muy poco se ha descrito del verdadero fenómeno de la tostación del café en cama fluida y de los problemas que se presentan al efectuar la operación continuamente.

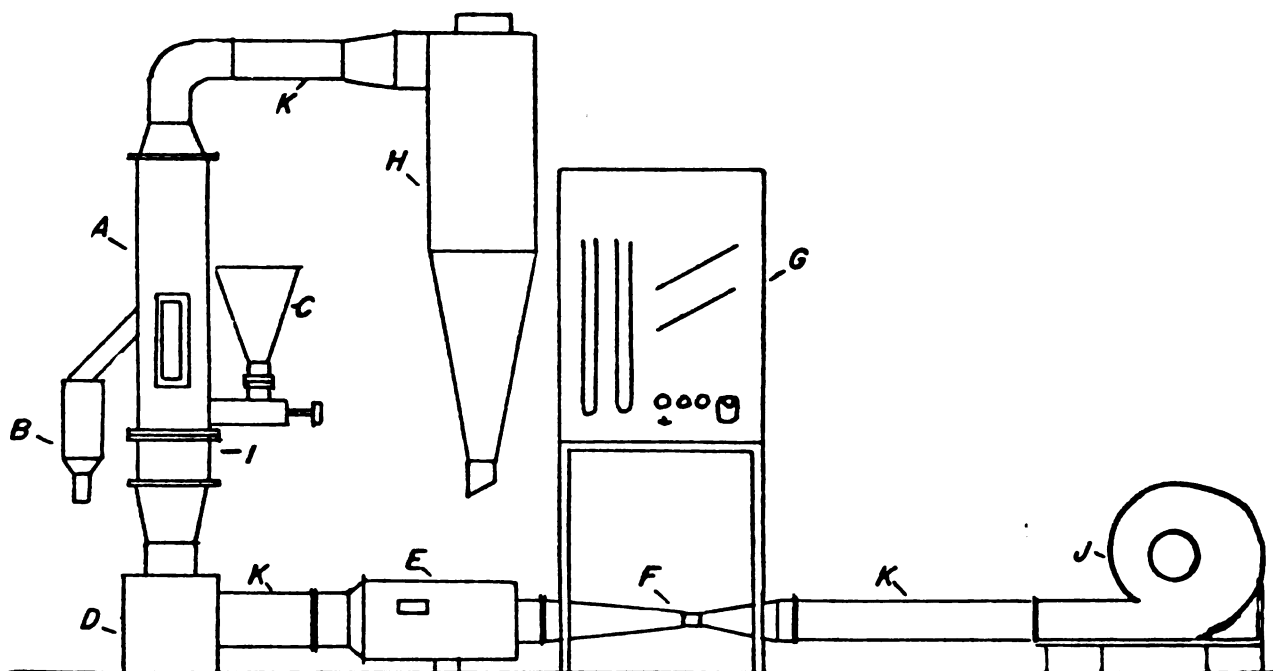


Figura 1.—Aparato experimental. A, cámara de fluidización; B, tolva de producto; C, tolva de alimentación; D, codo compuesto; E, calentador; F, medidor venturi; G, tablero de controles; H, ciclón; I, distribuidor de flujo; J, ventilador; K, conexiones.

4) Equipo Experimental (ver nomenclatura en el Apéndice)

La unidad de fluidización se muestra en la figura 1. Una descripción completa del mismo se ha detallado anteriormente (22, 23). En síntesis, el equipo consiste de: a) una cámara de fluidización, hecha de un tubo de hierro N° 10, NPS, Sch. 805, con un diámetro interno de .812 pies, un área seccional de .5185 pies cuadrados y un largo de 3.65 pies; teniendo en el frente adaptada una mirilla de vidrio de 2 x 12 pulgadas; b) una tolva de alimentación de .6 pies cúbicos de volumen, colocada encima de un ali-

mentador de tornillo con una capacidad de .38 pies cúbicos por cada 100 revoluciones, provista de un motor de velocidad variable; c) un ventilador centrífugo que suministra aire forzándolo a través de un medidor tipo venturi, el quemador de gas, un codo modificado, una sección de calma, un plato distribuidor, la cama fluida y un ciclón. La sección de calma consiste de 156 tubos de hierro de ½ por 8 pulgadas y el plato distribuidor, de una plancha de hierro perforada con agujeros de ⅛ de pulgada, espaciados en un arreglo triangular de ¼ de pulgada y encima de ésta una malla de acero inoxidable, 80 mesh. El aire puede graduarse con

una válvula obstructora, colocada a la salida del ventilador; d) dos toma-presiones colocados arriba del distribuidor y a 2.44 pies de éste. Estos comunican con un manómetro en U, lleno de aceite, AP123 ($\rho_{21^\circ\text{C}} = .907$). Las entradas de los toma-presiones están protegidas con una malla de calibre 80 mesh; e) un dispositivo de descarga, ajustable entre 10 y 17.5 pulgadas medidas desde el plato distribuidor, consistente

en un tubo de 2.5 pulgadas de diámetro y una cámara, con válvulas de mariposa colocadas en la entrada y la salida para poder remover intermitentemente el producto acumulado; f) un juego de deflectores, cuyas características de construcción se muestran en la figura 2; g) varias perforaciones en la pared lateral de la cama y en la entrada del aire colocadas con el objeto de instalar termómetros o termopares.

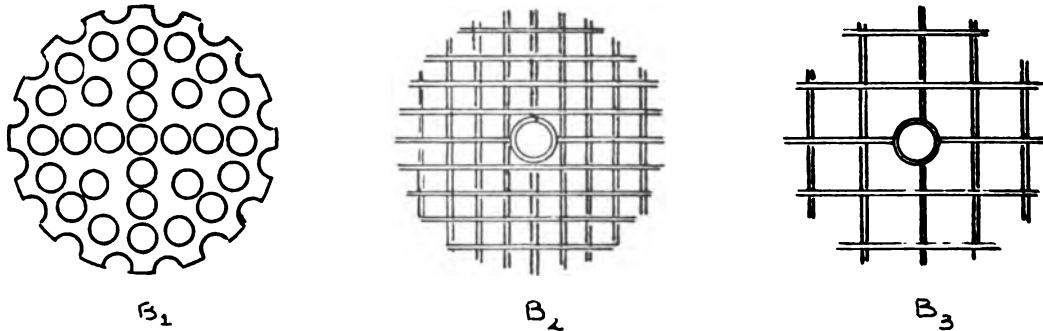


Figura 2.—Deflectores. a) B_1 , de orificios 1"; b) B_2 , de rejilla 1 x 1"; c) B_3 , de rejilla 2 x 2".

5) Procedimiento Experimental

Se decidió el siguiente plan de operación:

- Obtener datos dinámicos de la fluidización del café; éstos se refieren a la caída de presión del aire y la velocidad mínima de fluidización.
- Efectuar pruebas de tostación en lotes o batches a diferentes temperaturas y condiciones de flujo.
- Caracterizar la mezcla de sólidos en la cama fluida operando ésta continuamente.
- Estudiar la transferencia de calor en la operación de tostado continuo.
- Comparar en sus propiedades organolépticas, el café tostado continuamente en la cama fluida con el obtenido en condiciones de tostado normales de catación.

6) Aspectos dinámicos de la fluidización del café

6.1) **Técnica:** se introdujo una cantidad conocida de café en la cámara de fluidización, desprovista de los deflectores. En seguida se hizo pasar aire, a la temperatura del ambiente, a través de la cama y el primer dato de caída de presión (ΔP), se tomó a un flujo de masa (G), bastante abajo de G_{fm} . Antes de tomar el siguiente ΔP se fluidizó completamente la cama, aumentando G arriba de G_{fm} . Este procedimiento se repitió hasta que G se igualó con G_{fm} . Se aumentó entonces, el flujo de aire hasta un punto cercano y por debajo de la velocidad de

arrastre del grano de café; desde donde se obtuvieron más datos de ΔP al mismo tiempo que se disminuyó gradualmente G hasta igualarla de nuevo con G_{fm} . La altura inicial de la cama se varió de 5 hasta 15 pulgadas.

6.2) **Café empleado:** En las determinaciones se utilizaron dos tipos de café, el tipo "prime", cosechado entre 2,500 y 3,000 pies de altura y el tipo "hard bean", cosechado entre 3,000 y 4,000. Los dos tipos de grano proceden de plantaciones con una mezcla de las dos variedades botánicas *Bourbón* y *Typica*. Las características físicas pertinentes de los tipos de café se encuentran detalladas en la Tabla 1.

6.3) **Resultados:** los datos experimentales han sido tabulados para los diferentes materiales en la Tabla 2. Las lecturas del manómetro tienen un error aproximado de $\pm .1$ cm. de aceite y los datos de flujo de $\pm 2\%$.

Los datos experimentales de caída de presión y velocidad lineal se transformaron a libras/pie² y a velocidad de masa en libras/pie²-hr., utilizando las densidades del aceite y del aire respectivamente. Este último valor se aproximó por el promedio aritmético de las densidades del aire calculada a las condiciones existentes en la entrada y en la salida de la cama, suponiendo un comportamiento ideal del aire y una presión barométrica de 640 mm Hg.

Estos datos están distribuidos en la forma usual de $\log \Delta P/(M/S)$ contra $\log G$ en la figura 3.

T A B L A 1

CARACTERISTICAS DE LOS CAFES EMPLEADOS EN LOS EXPERIMENTOS DE CAIDA DE PRESION

Propiedad	Café oro entero		Café oro molido		Café tostado entero
Densidad real ¹ , lbs/pie ³	74.9		74.9		32
Análisis de tamaño	Mesh ²	Peso %	Mesh	Peso %	
	19	4.9	10	11.20	
	17	50.8	14	40.00	
	15	34.2	22	37.40	
	+	10.1	35	7.85	
Diámetro promedio, pies	.0217 ³		.0039 ³		.0217

1. Datos experimentales (22) (23)
2. Agujeros redondos; abertura: .295, .266 y .236 pulg.
3. Calculado de acuerdo al ploteo del porcentaje acumulativo (31)

T A B L A 2

RESULTADOS EXPERIMENTALES DE CAIDA DE PRESION

CAFE ORO		CAFE TOSTADO		CAFE ORO MOLIDO	
ΔP cms. de aceite	Uo pies/hora	ΔP cms. de aceite	Uo pies/hora	ΔP cms. de aceite	Uo pies/hora
4.4	909.68	3.6	880.63	3.3	125.08
6.7	1 193.10	6.1	1 169.82	6.5	233.10
9.7	1 424.28	7.3	1 308.54	8.7	298.70
15.2	1 696.08	8.8	1 597.94	10.6	373.70
18.8	1 984.50	8.6	1 766.86	12.9	442.20
18.4	2 276.68	8.6	1 988.70	15.3	535.31
18.2	2 510.81	9.0	2 272.92	15.5	709.00
18.5	2 818.84	9.2	2 870.40	15.8	1 605.61
19.1	3 112.83				
19.1	3 377.46				

6.4) **Discusión de los resultados:** la determinación experimental de los valores de la caída de presión a través de la cama de sólidos para diferentes condiciones de flujo del aire permite evaluar dos parámetros de fundamental importancia en la dinámica de las camas fluidas, la velocidad mínima de fluidización y la caída de presión en ese punto. La forma de las curvas mostradas en la figura 3 son típicas de esta clase de experimentos (4). Cuando pasa un gas a través de un lecho de sólidos, asociado con el flujo gaseoso, existe una caída de presión a través de la cama. En la región de cama fija la relación logarítmica entre estas dos cantidades es lineal (ver figura 3). Teóricamente, cuando la caída de presión es igual al peso de las partículas por unidad de área, la cama se fluidiza. Este punto se denomina como "punto incipiente de fluidización" y a la velocidad correspondiente como "velocidad mínima de fluidización"(7).

Como puede observarse en la figura 3, con los tres diferentes tipos de café, el estado fluidizado se logró antes de satisfacer la condición de $\Delta P / (M/S) = 1$. Este comportamiento puede atribuirse a la formación de "canales", en la cama de sólidos, por donde cierta cantidad del flujo de aire pasa a través del lecho (13). Los valores de G_{fm} encontrados se han anotado en la Tabla 3. Los valores de G_{fm} son independientes de la altura de la cama, mientras que ΔP_{fm} depende linealmente de la relación M/S; como puede observarse en la Tabla 4 y en la figura 4, que se refieren a datos experimentales para el café oro entero. Es interesante comparar los resultados experimentales con los análogos que pueden calcularse de las relaciones desarrolladas en la literatura; este cálculo se encuentra en el Apéndice de este trabajo y de él, puede observarse lo siguiente:

T A B L A 3
VELOCIDAD Y CAIDA DE PRESION MINIMAS

CAFE ORO ENTERO	CAFE TOSTADO	CAFE ORO MOLIDO
M/S = 39.61 libras/pies ² L = .93 pies	M/S = 18.35 libras/pie ² L = .79 pies	M/S = 32.80 libra/pie ² L = .96 pies
G _{fm} , Libras/hora pie ² 1240	960	350
ΔP _{fm} , Libras/pie ² 34.85	16.50	28.85

T A B L A 4

VALORES DE G_{fm} A DIFERENTES VALORES DE L. CAFE ORO ENTERO

L, pies	G _{fm} , libras/hora pie ²
1.210	1100
1.080	1100
.960	1240
.930	1240
.834	1175
.666	1200

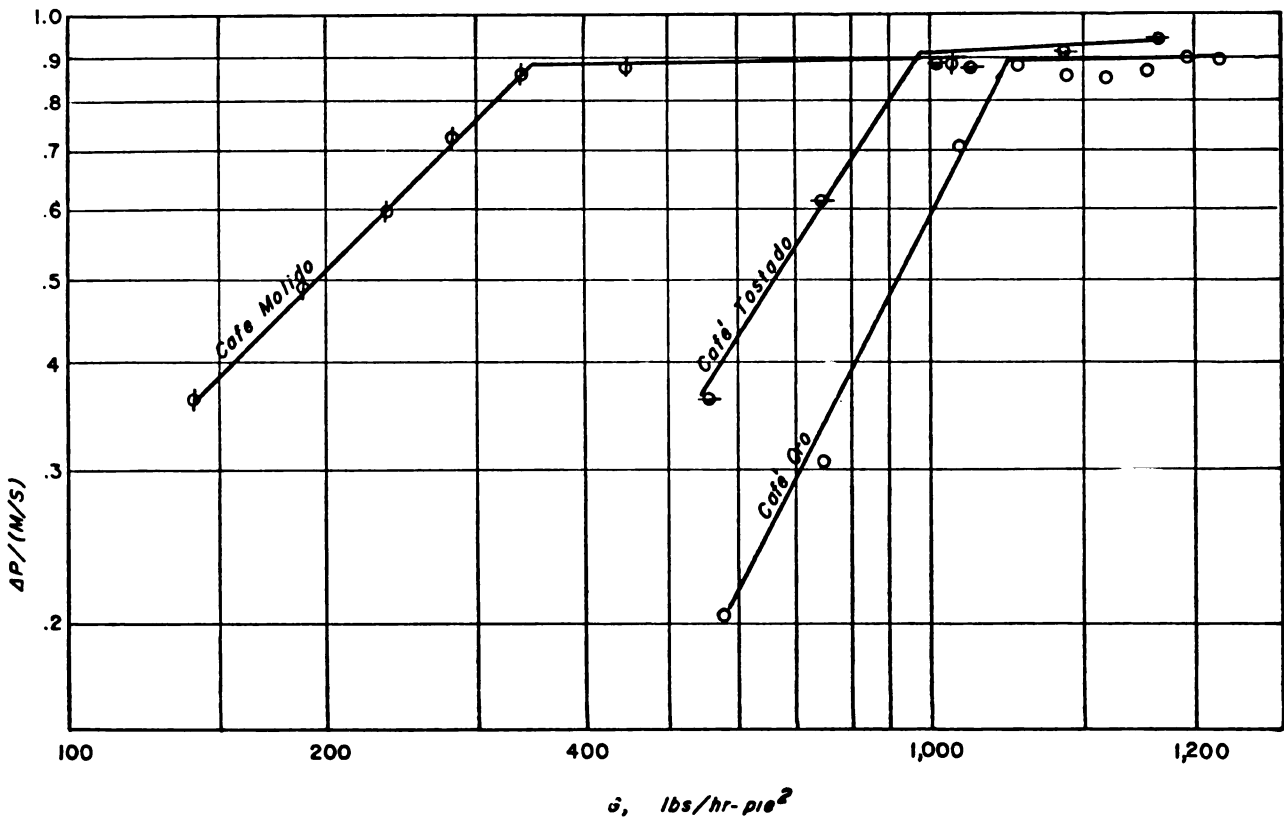


Figura 3.—Caída de presión. ΔP (M/S), contra G.

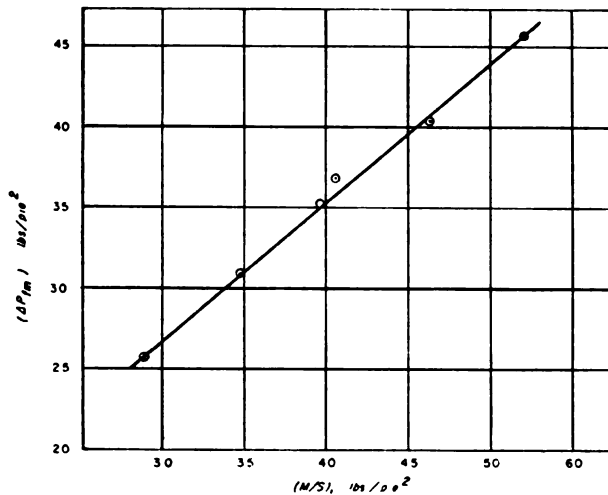


Figura 4.—Cambio de la caída de presión en el punto incipiente de fluidización y la carga de producto por unidad de área.

Con respecto a G_{fm} : a) la fórmula teórica para predecir G_{fm} da resultados excesivamente altos; b) de los modelos de Frantz (7), el número dos es el que más se acerca para los cafés enteros, tostado y oro y el número cinco para el oro molido; c) la técnica de Wen y Yu (28), da resultados demasiado bajos y, d) los que mejor predicen G_{fm} para los diferentes cafés son: el número dos para el oro (20.9% del valor experimental) y el tostado (21.8%), y el número cinco para el molido (19.3%).

Es necesario aclarar que para todos los cálculos se utilizó el diámetro de la partícula de café, obtenido por un análisis granulométrico en tamices y no se corrigió por poseer el grano de café una forma no esférica. El factor de corrección en el procedimiento de Leva et al. (12), para el café tostado y oro entero se aproximó a .2. La densidad y la viscosidad del aire se supusieron constantes e iguales a .063 libras/pie³ y .0445 libras/pie-hora.

Con respecto a ΔP_{fm} , puede observarse, en el Apéndice, que los valores calculados con la ecuación de Frantz (7), se acercan bastante a los encontrados experimentalmente.

Las ecuaciones semi-empíricas que se utilizaron en los cálculos anteriores se han obtenido fluidizando partículas de un diámetro menor y los resultados de este trabajo son interesantes en este sentido, pues permiten observar el comportamiento de las relaciones a otros valores de sus parámetros. Leva et al. (12), usaron datos obtenidos con partículas de un diámetro de .00202 - .205 pulg., Frantz (7), con .00209 - .012 y Wen y Yu (28), con .08 - .25. Los obtenidos en este trabajo son .046 - .26 y .36 pulg. para café molido, oro y tostado respectivamente.

Hay que hacer notar que Wen y Yu correlacionaron datos de otros autores y en ellos se llega hasta un diámetro de .75 pulg. pero el fluido usado en ese caso específico fue agua en lugar de aire.

Otro parámetro de importancia en la dinámica de camas fluidas es la altura máxima de cama que puede obtenerse sin que se note en su comportamiento la condición que se denomina "pistoneo". En ella se observa que se forman burbujas de gas que eventualmente alcanzan el diámetro de la cama formando bolsas de aire que empujan, a semejanza de un pistón, las partículas hacia arriba. Se comprobó experimentalmente con café tostado que a una altura de cama mayor de 1 pie, esta condición se formaba fácilmente. El valor experimental está de acuerdo con el calculado por la ecuación de Yagi y Muchi (29), desarrollado en el Apéndice. Conocida la altura de cama máxima es posible calcular la velocidad de aire máxima que puede emplearse para evitar el "pistoneo" y para esto se utiliza la ecuación de Singh y Bhat (24), ver Apéndice. El resultado obtenido no es representativo de la tendencia encontrada, pues fue posible operar la cama fluida sin que prevaleciera una condición de "pistoneo" marcada, hasta valores de 1.9 G_{fm} ; aunque los valores para el café tostado de los grupos paramétricos L/Dt y Dt/Dp se salen de los límites especificados por Singh y Bhat (24).

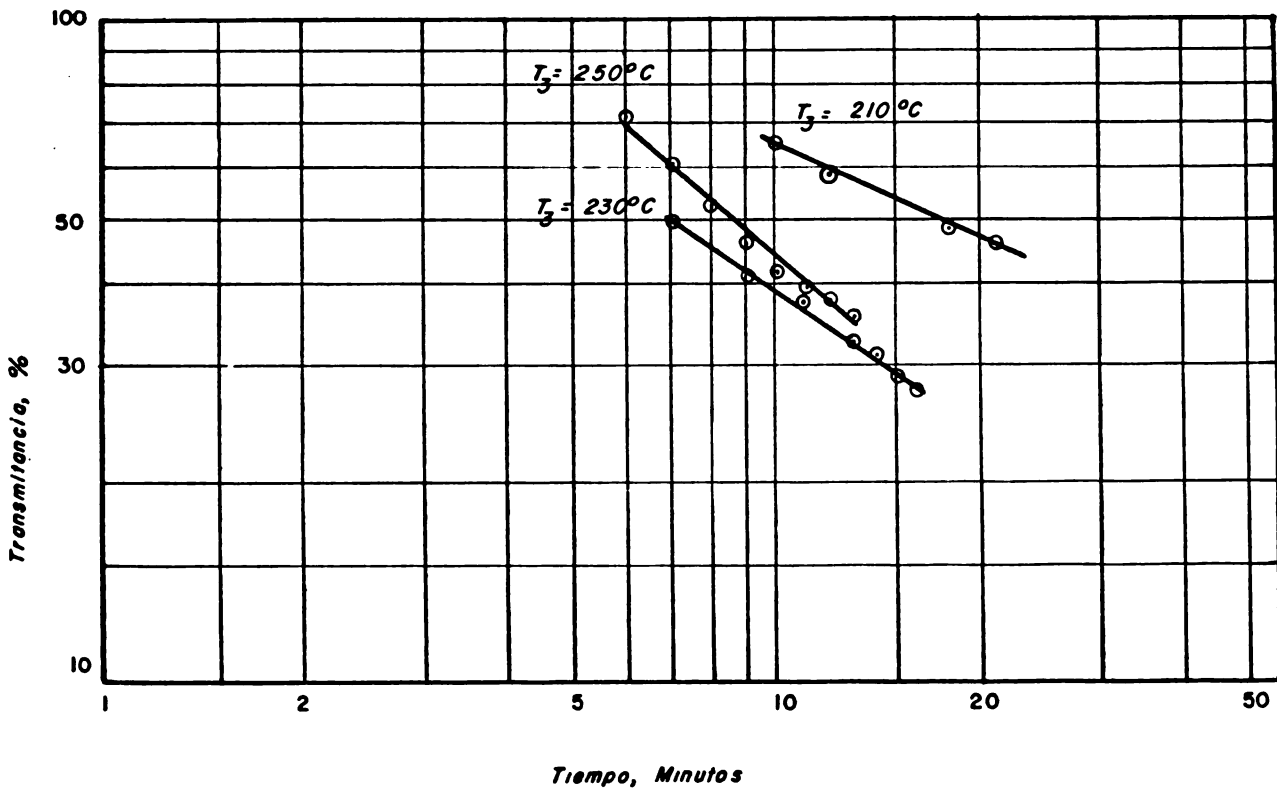
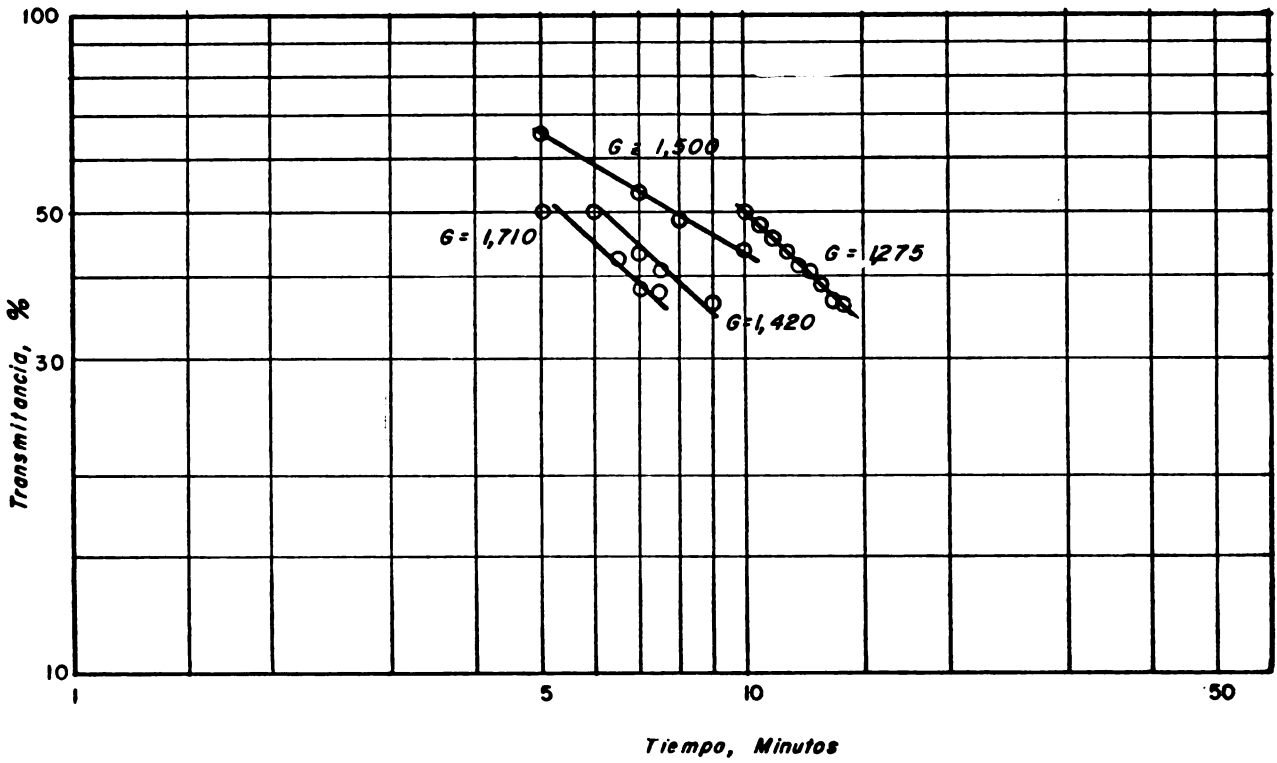
7) Pruebas de tostación en lotes

Es importante conocer el tiempo que se necesita para tostar café en una cama fluida para ciertos valores de temperatura y de cantidad de aire empleado, así como también del tipo de café utilizado. Con este fin, se planearon experimentos con dos tipos de café ("prime" y "hard bean"), en los cuales cada uno se tostó a cuatro diferentes temperaturas manteniendo una velocidad de aire constante y luego a una temperatura fija, el tipo "hard", se tostó a tres velocidades de aire distintas.

En cada experimento el grado de tueste se determinó en función del tiempo, analizando la transmitancia del extracto acuoso obtenido de los granos de café. La muestra final se cató comparándola con el mismo café tostado de manera convencional.

7.1) Técnica empleada: para efectuar un experimento se llevó la unidad de fluidización hasta la temperatura deseada; se cargó ésta con la cantidad y el tipo de café seleccionados. Se anotaron los valores de velocidad del aire y de la temperatura en la cama y se tomaron muestras representativas del material a diferentes intervalos de tiempo.

Figuras 5a y 5b.—Valores de transmitancia del extracto acuoso con respecto al tiempo de tostado y diferentes fluidos de la masa de aire y temperaturas.



Para obtener un dato de transmitancia, se molió la muestra obtenida en la tostación, se pesaron 10 gr. y se extrajeron por espacio de dos minutos con 100 ml de agua destilada a su punto de ebullición. La solución así obtenida y a temperatura ambiente se utilizó para obtener la transmitancia, relativa al agua, a 550 m μ .

La temperatura de la cama fluida (T_1), se obtuvo por medio de un termopar de hierro-constantan sumergido directamente en ella y un potenciómetro (Leeds & Northrup, 8690). La temperatura del aire entrando (T_3), se obtuvo por medio de un termómetro de mercurio (con un intervalo marcado en décimos de $^{\circ}\text{C}$), instalado antes del distribuidor perforado de aire. La lectura de transmitancia se efectuó en un espectrofotómetro (Bausch & Lomb, Spectronic 20). Las cataciones de las muestras de café fueron llevadas a cabo por personal de la ANA-CAFE, Guatemala.

7.2) Resultados: los datos obtenidos se encuentran en las figuras 5a y 5b, en donde se han colocado los datos de transmitancia y el tiempo para los dos tipos de café a diferentes temperaturas y velocidades de aire. La figura 6 muestra, para el tipo de café "hard", los cambios de la temperatura de la cama con respecto al tiempo e identifica la zona de muestras que se catalogaron como óptimas de acuerdo a la catación posterior. Se observó, también, que estas muestras óptimas tuvieron un porcentaje de transmitancia entre 45 - 50%.

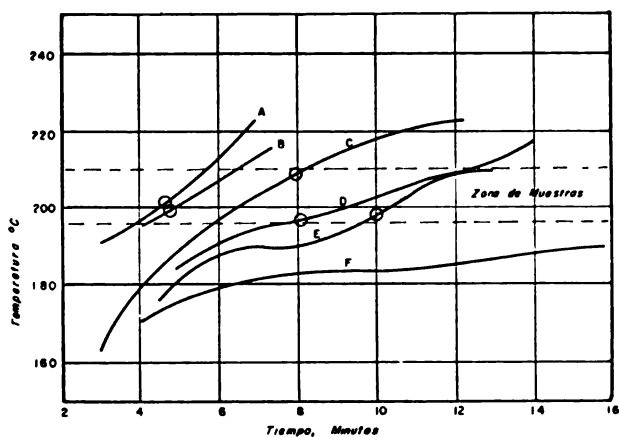


Figura 6.—Temperatura de la cama, para la tostación de café, tipo "hard" en lotes o tandas. A, G = 1500; T_1 = 270; B, G = 1710, T_1 = 250; C, G = 1500, T_1 = 250; D, G, 1275, T_1 = 250; E, G = 2540, T_1 = 230; F, G = 1900, T_1 = 210.

7.3) Discusión de los resultados: el objeto de esta serie de experimentos fue el de determinar el tiempo requerido para tostar café, a ciertas condiciones fijas de temperatura y velocidad del aire en la cama fluida. Además, se espera-

ba encontrar cuál era el conjunto óptimo entre los valores experimentados. Desafortunadamente, el criterio de comparación dependía del resultado de un análisis cualitativo de catación, hecho que no permite la cuantificación de los resultados y únicamente puede, de una manera cualitativa, ayudar a su interpretación y discusión. Se observó que con un valor de T_3 = 250 $^{\circ}\text{C}$, (T_1 = 210, según figura 6) y una velocidad de G = 1500, que corresponde a un tiempo de residencia de 8 minutos (ver figura 6) y una transmitancia de 48.5% del extracto para el café tipo "hard" y 53.5% para el "prime" (ver figura 5), se obtuvo el grano que relativamente fue el mejor en cuanto se refiere a la calidad de la taza. Por supuesto, esta conclusión es válida únicamente para los tipos de café usados y el margen de las condiciones de temperatura y velocidad de aire investigados.

A pesar de un estudio previo sobre el cambio de color del café en su tostación y de su medición directa en el grano (16), se ha discutido recientemente (17), que los valores obtenidos en un instrumento pueden diferir de los obtenidos en otro aparato (aunque sean de la misma marca comercial); por lo que es necesario normalizar las lecturas para una mejor interpretación. Lockhart (18), por otro lado, midiendo siempre el color directo del grano, ha definido una escala de 11 clases diferentes de colores. Debido a estas dificultades y por carecer del equipo específico de preparación de muestras, se decidió efectuar las lecturas del porcentaje de transmitancia en el extracto preparado de las muestras. Este procedimiento previamente había sido experimentado por Little y Mackinney (15). El empleo de dos minutos como tiempo de extracción se escogió debido a que al extraer por este tiempo con agua hirviendo se obtiene el 84% del color final que se logra hasta los 10 minutos de extracción (19).

8) Caracterización de la mezcla de los sólidos en la cama fluida

Una de las características de la cama fluida es el movimiento continuo y al azar de las partículas sólidas. Este fenómeno origina una mezcla casi perfecta de los sólidos, que causa una homogeneidad de condiciones en toda la cama. Esta propiedad es beneficiosa o perjudicial según sea el caso específico y la aplicación particular de esta técnica. En el caso de la tostación de café, al operar en lotes, la magnífica mezcla lograda tiene como efecto una tostación pareja y homogénea del grano, tanto en comparación a otros granos de café, como también en el mismo grano en sí, superficial e interiormente. Por otro lado, al operar la cama continuamente, es decir, con alimentación y remoción continua de café verde y tostado respectivamente, la mezcla que prevalece en la cama es

causa de que el flujo de café que sale del equipo sea completamente heterogéneo, presentando partículas muy poco a demasiado tostadas, mezcladas con granos en el punto deseado de tueste. Debido a este problema que se observó al iniciar los experimentos de tostación continua se decidió: a) modificar el equipo con el objeto de disminuir la mezcla y b) evaluar cuantitativamente las modificaciones.

8.1) Modificaciones del equipo: la mezcla de las partículas sólidas en las camas fluidas ha sido previamente estudiada y evaluada. Leva (14), afirma que en columnas de diámetros menores de dos pies, los sólidos se mueven hacia abajo, en regiones cercanas a la pared y hacia arriba, en el centro. Esta mezcla violenta origina que el tiempo de residencia de las partículas en la cama varíe dentro de un amplio margen. Zenz y Othmer (31), afirman que la circulación interna de los sólidos es un fenómeno, que cualitativamente está establecido pero que experimentalmente es difícil de cuantificar. Rowe y Partridge (21), han demostrado que el movimiento de las partículas es un proceso reproducible y dirigido, originado específicamente por la presencia de burbujas de aire, y que de ninguna manera este movimiento es al azar, como antes se mencionaba. Leva (14), resume que la mezcla natural en la cama fluida puede reducirse al colocar un sistema de varios lechos fluidos en serie o introducir en un lecho desviadores o "baffles". El empleo de los desviadores para este propósito ha sido estudiado por Overcashier et al. (20), quienes empleando desviadores de tipo de mallas y de tubos, en un sistema gas-sólido, encontraron experimentalmente que la presencia de éstos en el lecho fluido, disminuye considerablemente la mezcla de los sólidos. Agarwall y Davis (1), ensayaron el uso de desviadores de tipo de aletas y encontraron que éstos, colocados en lechos de diámetros pequeños (1 pie o menos), mejoraban la calidad o uniformidad de la fluidización, rompían burbujas grandes de aire y evitaban fluctuaciones en la caída de presión a través del lecho fluido. Chang y Wen (3), en sus experimentos de transferencia de calor, reportan el mismo efecto al emplear desviadores de mallas.

En base a estas experiencias se diseñaron tres tipos de desviadores, mostrados en la figura 2. Uno de ellos de orificios y dos de rejillas, diferenciándose estos dos últimos en el área o tamaño de la abertura. Además, se construyó un soporte central para los desviadores, con un mecanismo que permitía colocarlos a la altura deseada.

8.2) Técnica empleada: el arreglo físico de la unidad se muestra en la figura 7. En ella puede observarse la presencia de los desviadores (2 de orificios idénticos y uno de rejilla de

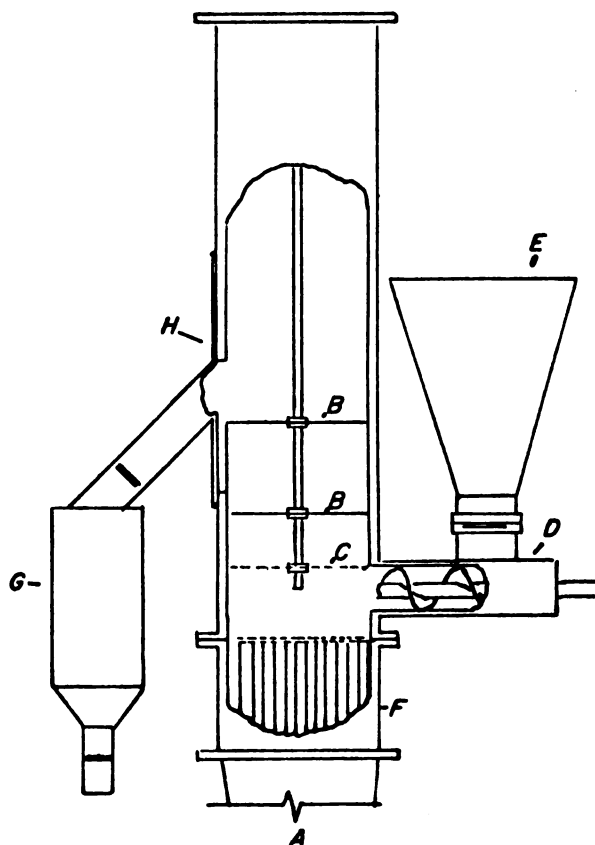


Figura 7.—Cámara de fluidización. A, entrada del aire; B, deflector de orificios; C, deflector de rejilla 2 x 2"; D, alimentación; E, tolva de alimentación; F, distribuidor de flujo; G, tolva de producto; H, salida de producto.

2" x 2") y su soporte central. Se efectuaron tres tipos de experimentos, en el primero se estudió el efecto de las variables en la segregación de las partículas de café, en el segundo se investigó el efecto de la velocidad de masa sobre la distribución de granos de diferente tueste y en el tercero se experimentó el cambio de densidades de la partícula con el grado de tueste.

a) *Segregación.* Se efectuaron pruebas para obtener datos extremos y a la vez representativos del problema. Se utilizaron mezclas de 10 libras de café, el 50% en peso de granos de café verde y el otro 50% de café previamente tostado, esto implica una diferencia de densidades de 75 a 39 lbs./pie³. La mezcla se introdujo al aparato, en el cual previamente se habían fijado las condiciones geométricas y de flujo de aire. Se esperaron 15 minutos y se removió una muestra de la superficie del lecho. En ella se separaron manualmente los granos verdes de los tostados y se calculó el porcentaje en peso respectivo. Los resultados se encuentran resumidos en la Tabla 5. Puede observar-

T A B L A 5

EFFECTO DE LOS DESVIADORES EN LA SEGREGACION DE LOS GRANOS DE CAFE

<i>Influencia de h_{B1}</i>	
$h_{B2} = 8$ pulg. $G = 2450$	
h_{B1} , pulg.	% crudo en muestra
9.75	85.4
11.125	87.5
13.50	94.5
<i>Influencia de G</i>	
$h_{B1} = 16$ pulg.	$h_{B2} = 8.75$ pulg.
G	% crudo en muestra
2900	79.0
2400	93.5
<i>Distancia entre deflectores</i>	
$h_{B1} = 13.5$ pulg. $G = 2640$	
$h_{B1} - h_{B2}$, pulg.	% crudo en muestra
3.5	97.5
5.5	97.5
<i>Número de deflectores</i>	
$G = 2460$ $h_{B1} = 13.5$ pulg. $h_{B2} = 8$. pulg. $h_{B3} = 5.0$ pulg.	
No	% crudo en muestra
B1	92.0
B1 y B2	97.2
B1, B2 y B3	99.0
<i>Tamaño de rejilla</i>	
$G = 2460$	
Deflector	% crudo en muestra
B1 y B2	97.2
B1 y B3	96.6

se que la segregación es mucho más completa cuando el equipo posee desviadores y en una forma parcial puede decirse que la segregación es directamente proporcional al número de deflectores y a su altura inversamente al tamaño de la rejilla y a la velocidad de masa del aire e independiente de la distancia relativa entre los desviadores.

b) *Espectro de color.* Se efectuaron dos tostaciones en forma continua, pero con dos deflectores de orificios y uno de rejilla de 2 x 2 pulg. instalados en el aparato. La temperatura se mantuvo constante (215°C), pero G varió de 2000 a 2250 respectivamente. De cada tostación se tomó una muestra representativa y en ella se contaron al azar 100 granos de café, que posteriormente se clasificaron en 5 grupos arbitrarios de acuerdo a su color (desde más crudo a más tostado). Los resultados, en duplicado, del porcentaje de granos en cada color para las dos diferentes condiciones de tostado se encuentran en la figura 8. Puede observarse que el espectro es bastante amplio a velocidades de masa mayores.

c) *Cambio de densidad.* El café oro tiene una densidad inicial de 75 libras por pie cúbico,

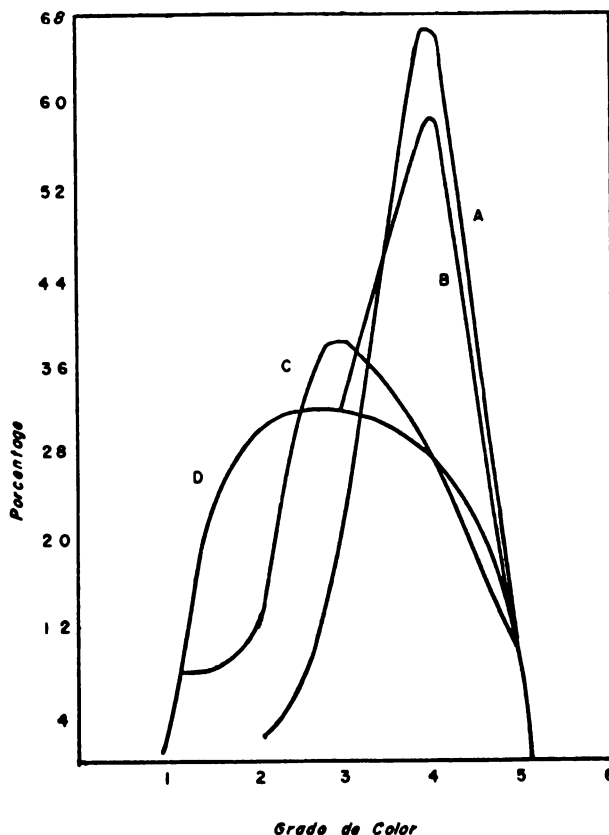


Figura 8.—Espectro de mezcla en el lecho. A y B con $G = 2000$; C y D con $G = 2250$.

T A B L A 6

VARIACION DE LA DENSIDAD DEL GRANO CON EL GRADO DE TOSTACION CONTINUA DEL MISMO

t/γ	densidad, libras/pie ³
.375	56.2
.500	55.2
.625	45.5
.750	40.5
.875	39.0
1.000	38.4

y el tostado (en su punto de tueste), de 39. La disminución de esta propiedad es gradual conforme el café pierde peso y aumenta de volumen, principalmente por la gama de reacciones químicas que ocurren y que originan gases o sustancias muy volátiles. Estos cambios se muestran en la figura 9 y en la Tabla 6, para una tostación de café en lotes a condiciones de 210°C y 2000 para la temperatura de la cama y el flujo de aire respectivamente.

encontrada de los desviadores fue la de colocar, en su orden, uno de rejas de 2 x 2 pulg. e inmediatamente dos de orificios.

9) Transferencia de calor

En las secciones anteriores se ha hecho énfasis en que una cama o lecho fluido de partículas sólidas es un sistema en el cual el movimiento, tanto del fluido como el de los sólidos, es violento y muy lejos de ser clasificado como uno de los dos modelos ideales postulados en la teoría, la mezcla instantánea y perfecta y el flujo tubular o de pistón. Cuando además se considera el posible fenómeno de transferencia de calor que puede existir debido a un gradiente de temperaturas, entre el sistema y los alrededores o entre el fluido y el sólido en la cama, el problema se hace más complejo y como es natural se vuelve un tema atractivo para trabajos investigativos. Es así que los datos experimentales de transferencia de calor entre el fluido y las partículas sólidas, o viceversa, reportados en la literatura son extensos. Recientemente (2), estos datos experimentales han sido recopilados y sumariados en la forma clásica de la correlación de Colburn, es decir, un gráfico logarítmico de factor "j", de Colburn y el número de Reynolds. Sin embargo, como lo indica Harriott y Barnstone (9), se puede notar que para un Reynolds de 1, existe un intervalo de aproximadamente 10,000 en el factor de Colburn, además de que la pendiente de las varias correlaciones oscila entre límites de -.5 a .5. Uno de los principales problemas estriba en que debe medirse en el transcurso de los experimentos la temperatura de las partículas sólidas; hecho que en la práctica resulta difícil debido al movimiento natural y violento de las partículas que no puede restringirse por la presencia de un detector. Debido al método de medición, pueden entonces obtenerse diversos

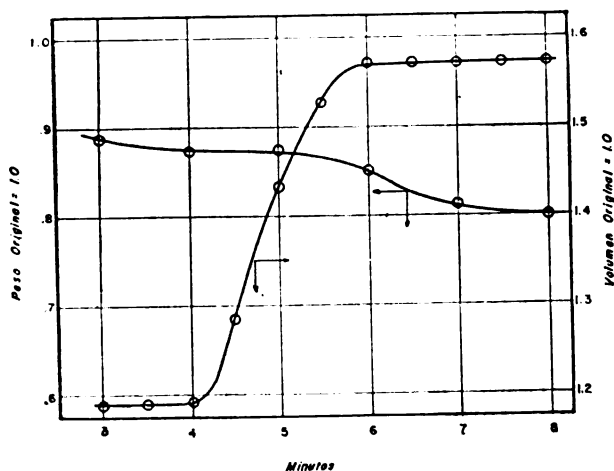


Figura 9.—Cambio de peso y de volumen del café con el tiempo de tostación. Operación de la cama en forma de lotes.

De todas estas experiencias se concluyó que los desviadores sí permitían la operación continua de tostación, obteniéndose un producto homogéneo en la salida. La mejor disposición

valores para el coeficiente, es más, Frantz (5, 6), ha dividido los coeficientes en "aparentes" y "verdaderos", de acuerdo con criterios específicos de medición. Se puede concluir, entonces, que no existe una correlación general hasta el momento para poder caracterizar la transferencia de calor entre el fluido y las partículas sólidas. Muy similar es el problema del transporte de calor entre el sistema y los alrededores.

Otro aspecto importante y que es pertinente a la tostación del café, es que, además de que los granos de café se calienten debido al gradiente de temperatura entre ellos y el fluido, ocurren en el grano una serie de reacciones de combustión que son exotérmicas. Esto crea una generación de calor dentro del grano mismo que contribuye a elevar su temperatura.

Se decidió efectuar mediciones de la temperatura de la partícula de café y su variación con el tiempo de tostado, con el objeto de caracterizar su comportamiento y poder utilizar los datos en los cálculos del coeficiente de transferencia.

9.1) **Temperatura del grano de café:** para poder determinar la temperatura del grano se construyó un dispositivo como el mostrado en

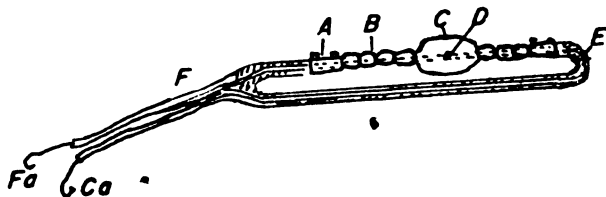


Figura 10.—Dispositivo para medir la temperatura en el interior del grano. A, empalmes; B, perlas de porcelana; C, grano; D, termopar; E, aislamiento; F, alambre.

la figura 10. Este aparato se colocó de la manera siguiente: se perforó longitudinalmente un grano de café con una broca de 1/16", de manera que quedara el agujero lo más al centro posible. Luego se introdujo el termopar procurando que la unión de éste quedara en el centro del grano, se ajustó con perlas de porcelana y se puso una cinta de "teflón", para ajustarlo. Efectuadas estas operaciones, se introdujo a la cámara de fluidización, que previamente se había controlado a la temperatura y flujo de aire deseados y se registró la temperatura del grano cada 10 segundos, empleando un potenciómetro (Leeds & Northrup, modelo 8690).

En la figura 11 se muestran los resultados obtenidos para cuatro tipos de café guatemaltecos ("strictly hard", "hard", "prime" y "good washed"), colocados en la cámara vacía. Puede observarse que:

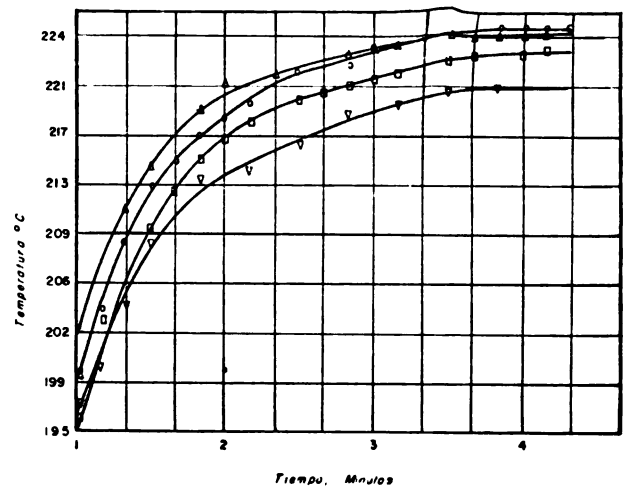


Figura 11.—Cambio de la temperatura en el interior del grano de café con el tiempo de tostación. Δ "Strictly hard bean"; \circ "Hard Bean"; \square "Prime" y ∇ "Good Washed". Temperatura de la cama = 225°C.

- aproximadamente en 4 minutos se logra un equilibrio en la temperatura del grano; y
- existe una diferencia en el comportamiento térmico del grano de acuerdo con el tipo de café a que pertenezca.

En la figura 12 se muestran los resultados obtenidos con una mezcla de diferentes tipos de

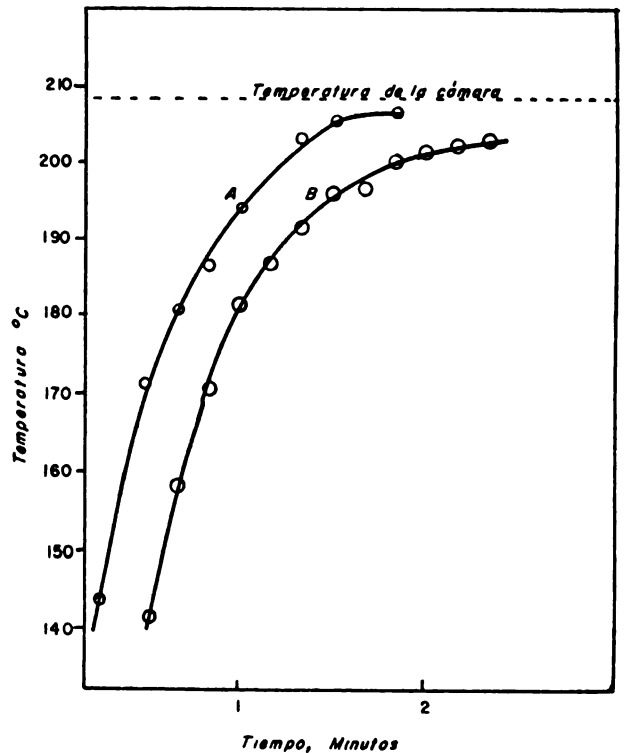


Figura 12.—Cambio de la temperatura en el interior del grano de café con el tiempo de tostación. A, cámara con partículas en fluidización; B, cámara vacía.

café, pero en un caso con la cámara vacía y en el otro con 9.6 libras del mismo café fluidizadas. En este último caso los datos fueron tomados de una partícula en el primer nivel de fluidización, es decir, inmediatamente después del desviador de rejilla. De la figura 12, puede deducirse que la presencia de otras partículas

influye en el perfil de temperatura obtenido, disminuyendo el tiempo requerido para llegar al equilibrio térmico. Aún así, este último experimento, no es representativo de lo que ocurre en la fluidización 'per se', puesto que la partícula a la cual se le está midiendo la temperatura, se encuentra fija y sumergida en el lecho de sólidos. Posiblemente las partículas que se encuentren libres logren alcanzar un equilibrio térmico en menor tiempo.

9.2) Evaluación del coeficiente de transferencia de calor: los métodos experimentales para el cálculo de los coeficientes de transferencia de calor han sido enumerados y revisados por Frantz (5) y Zabrodsky (30). En el presente caso se utilizó la fórmula desarrollada por Walton et al. (27) y se obtuvo un valor de 57 Btu/pie² hora °F. Este resultado es una aproximación muy cruda debido a defectos experimentales como, pérdidas de calor del sistema hacia los alrededores, generación de calor por las reacciones exotérmicas en el grano de café, aproximación en el cálculo del área superficial del grano (la cual aumenta conforme transcurre el proceso de tostado), suposición en el valor correcto del calor específico del grano de

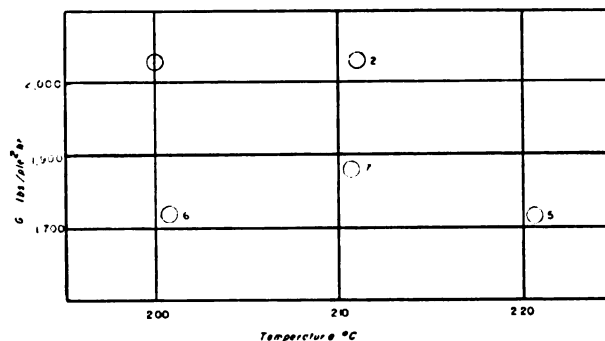


Figura 13.—Localización de las condiciones experimentales en los ensayos de evaluación de calidad.

bargo, el valor encontrado es razonable y está dentro de los amplios límites fijados por el conocimiento actual del fenómeno.

10) Comparación de calidad

Como se discutió anteriormente, el único procedimiento que permite seleccionar cuáles son las condiciones, o mejor dicho, la región que incluye las condiciones óptimas en el tostado del café en lotes, es efectuar un análisis organoléptico de la calidad de la taza obtenida. Debido a los problemas encontrados al tostar continuamente, se decidió efectuar un análisis organoléptico de cafés tostados de acuerdo a varios experimentos en los que variaron las condiciones de la temperatura y el flujo de masa del aire.

T A B L A 7

CONDICIONES DE TOSTACION PARA EVALUACION DE CALIDAD						
Exp.	M	G	°C			γ
			T1	T2	T3	
1	12.3	2029	240	171	200	9.46
2	12.8	2029	283	174	212	7.10
5	11.0	1713	314	185	222	6.10
6	13.5	1713	291	177	202	7.50
7	12.5	1871	285	177	214	6.90

café y el escoger el gradiente de temperatura correcto. Además, existe una suposición fundamental en la fórmula y es que especifica un flujo ideal de pistón del gas al pasar por el lecho de sólidos, lo cual se ha demostrado que es un proceso mucho más complejo (11). Sin em-

10.1) Experimentos: se fijaron para todas las experiencias los siguientes valores: 15 pulg. para la altura de salida del producto, 3 desviadores (2 de orificios y 1 de rejilla de 2" x 2"), a 5, 8 y 14" de altura y se empleó café tipo "prime". Se varió la temperatura (T1) y la cantidad de

aire G, de acuerdo con el diagrama de la figura 13 y en la Tabla 7 se resumen las condiciones de trabajo.

10.2) **Resultados y discusión:** de acuerdo con las cataciones efectuadas por personal de la ANACAFE, los experimentos número dos y siete, resultaron superiores e indistinguibles entre sí. Luego, en orden decreciente, se encontraron los equivalentes a los puntos seis, uno y cinco.

De acuerdo con los resultados obtenidos, parece ser que el efecto de elevar T1 arriba de 210°C, es perjudicial, aunque se reduzca el tiempo de residencia promedio de los granos de café en la cama. La influencia de G, es menos notoria y el efecto de un cambio de 300 es prácticamente imperceptible en la calidad resultante, por otro lado la calidad de la taza de los experimentos número dos y siete son prácticamente iguales comparadas con el café tostado de una manera tradicional, sin embargo, como se expresó anteriormente, los granos tostados en fluidización son más homogéneos en cuanto a su color individual.

AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen la cooperación que varias compañías e instituciones desinteresadamente les brindaron en el desarrollo del trabajo. Los datos experimentales presentados en este reporte, fueron extractados de la tesis universitaria de dos de los autores (I.S. y P.S.)

SUMARIO

La investigación efectuada tuvo como propósito, el determinar la factibilidad de la tostación continua del café en una cama fluida. Se describe en detalle el equipo construido y usado para tal efecto. Con él se obtuvo información sobre datos dinámicos de la fluidización del café verde y tostado, las características de la mezcla de los sólidos en la cama y la transferencia de calor entre el aire caliente y las partículas de café.

Los resultados permitieron el cálculo de los dos parámetros fundamentales en la fluidización, la velocidad mínima y la caída de presión, asociada con el flujo del aire. Se determinó que dentro de ciertos valores de la temperatura, la velocidad del aire y el tiempo de residencia de las partículas en la cama, es posible tostar café en forma continua, obteniéndolo con propiedades organolépticas similares a las logradas con el método tradicional de tostado,

con la ventaja de lograr una mayor homogeneidad en cuanto al color individual de los granos tostados.

Referencias

1. Agarwall, J. C. and W. L. Davis Jr. "The dynamics of fluidization of iron and its ores" *Chem. Eng. Prog. Symposium Series*, 62 (67) 101 (1966).
2. Barker, J. J. "Heat transfer in fluidized beds" *Ind. Eng. Chem.* 57 (5) 33 (1965).
3. Chang, T. M. and C. Y. Wen "Fluid to particle heat transfer in airfluidized bed" *Chem. Eng. Prog. Symposium Series*, 62 (67) 111 (1965).
4. Davidson, J. F. and D. Harrison "Fluidized Particles" Cambridge University Press, 1963.
5. Frantz, J. F. "Fluid to particle heat transfer in fluidized beds" *Chem. Eng. Prog.* 57 (7) 35 (1961).
6. Frantz, J. F. "Design for fluidization" *Chem. Eng.* 69 (19) 161 (1962).
7. Frantz, J. F. "Minimum fluidization velocities and pressure drop in fluidized beds" *Chem. Eng. Prog. Symp. Series* 62 (62) 21 (1966).
8. Goldfine, W. R., U.S. Patent 2, 348, 066 May 2, 1944.
9. Harriott, P. and L. A. Barnstone "Heat transfer in fluidized beds" *Ind. Eng. Chem.* 59 (4) 55 (1967).
10. Kneale, R. D. and H. Cannon, U.S. Patent 2, 212, 120 Aug. 20, 1940.
11. Latham, R., C. Hamilton and O. E. Potter "Back mixing and Chemical Reaction in fluidized beds" *British Chemical Engineering* 13 (5) 666 (1968).
12. Leva, M., T. Shirai and C. Y. Wen, *Genie Chimique* 75 (2), 333 (1956) citado en (14) y (6).
13. Leva, M. "Flow behaviour in fluidized systems" *Chem. Eng.* 64 289, (October, 1957).
14. Leva, M. "Fluidization" McGraw-Hill Book Co. New York, 1959.
15. Little A. and G. MacKinney, *Food Tech.* 10 (10) 503 (1956).
16. Little, A. C., C. O. Chichester and G. MacKinney "On the color of coffee" *Food Technology XIII* (12) 684 (1959) y las referencias citadas en el artículo.
17. Little, A. "Collaborative Study of the Measurement of Color of Ground Coffee", The Coffee Brewing Institute, Publ. No. 51, New York, 1967.
18. Lockhart, E. E. "Roasted Coffee Color Measurement and Classification", *Food Tech.* 14, (11) 597 (1960).
19. Merritt, M. C. and B. E. Proctor "Extraction Rates for Selected Components in Coffee Brew", *Food Research*, 24, (6) 735 (1959).

20. Overcashier, R. H., D. B. Tood and R. B. Olney "Some effects of Baffles on a Fluidized System" **AIChE Journal** 5 (1) 54, (1959).
 21. Rowe, P. N. and B. A. Partridge "Particle movement caused by bubbles in a fluidized bed" in Proc. Symp. on the Interaction between fluids and Particles, The Institution of Chemical Engineers, London, 1962.
 22. Sandoval, Jorge "Estudio de la Tostación Continua de Café en Cama Fluida" Tesis de Ingeniero Químico. Universidad de San Carlos, Noviembre de 1967, Guatemala.
 23. Simón, Paul "Estudio de la Tostación de Café en Cama Fluida. Parámetros de operación" Tesis de Ingeniero Químico. Universidad de San Carlos, Noviembre de 1966, Guatemala.
 24. Singh, B. and G. N. Bhat "Minimum Fluidization Velocity for hematite-air systems" **British Chemical Engineering**, 12 (2) 242 (1967).
 25. Sivetz, M. and H. E. Foote "Coffee Processing Technology" The Avi. Publ. Co. Inc. Conn. 1963 Vol 1.
 26. Smith, H. L., U.S. Patent 3, 328, 894. July 4, 1967.
 27. Walton, J. S., R. L. Olson and O. Levenspiel. **Ind. Eng. Chem.** 44, 1474 (1952).
 28. Wen, C. Y. and Y. H. Yu "Mechanics of fluidization" **Chem. Eng. Prog. Symp. Series** 62 (62) 100 (1966).
 29. Yagi, S. and Muchi, I, **Chem. Eng. (Japan)** 16, 307 (1952) citado en (6).
 30. Zabrodsky, S. S. "Hydrodynamics and Heat Transfer in fluidized beds" The MIT Press, 1966.
 31. Zenz, F. A. and D. F. Othmer "Fluidization and Fluid-Particle Systems" Reinhold Publishing Corp., New York 1960.
-

A P E N D I C E

Nomenclatura

B1	= deflector de orificios
B2	= deflector de rejilla (1 × 1")
B3	= deflector de rejilla (2 × 2")
Dp	= diámetro de la partícula sólida
Dt	= diámetro del lecho fluido
Fg	= factor de corrección de Leva
G	= flujo de masa del aire
G _{fm}	= flujo de masa del aire mínimo de fluidización
G _p	= flujo de masa del aire que origina "pistoneo"
h _{B1}	= distancia desde el comienzo de la cama al desviador B1
h _{B2}	= ibid, a B2
h _{B3}	= ibid, a B3
k	= constante, definida en Tabla A-1
L	= altura del lecho fluido
L _p	= altura que origina "pistoneo"
M	= peso de café en la cama
N _{Rep}	= número adimensional de Reynolds, basado en D _p
S	= área seccional del lecho fluido
T ₁	= temperatura de la cama fluida
T ₃	= temperatura del aire entrando
U _o	= velocidad lineal del aire
ΔP	= pérdida o caída de presión del aire en el lecho fluido
ΔP _{fm}	= ibid, en el punto de fluidización incipiente
ρ _{real}	= densidad real del café
ρ _f	= densidad del fluido
ρ _s	= densidad del sólido
μ	= viscosidad del fluido

γ = tiempo de residencia de las partículas en el lecho fluido

Cálculo de G_{fm} y ΔP_{fm}

Leva y col. (12) y Zenz y Othmer (31), han desarrollado dos métodos para predecir G_{fm}. Ambos han sido comparados por Frantz (6) quien aconseja el desarrollado por Leva, Shirai y Wen debido a su uso mas simple, pues el de Zenz y Othmer necesita datos que son difíciles de obtener como la porosidad en el punto incipiente de fluidización, la esfericidad de la partícula y la velocidad de escape. Recientemente, Frantz (7), ha propuesto una ecuación, desarrollada a partir de datos experimentales, para calcular G_{fm} y Wen y Yu (28), han presentado una relación adimensional que permite también su evaluación. Se han comparado los valores experimentales con los calculados por los métodos anteriores y los resultados se resumen en las Tablas A-1 y A-2. El valor calculado por Leva et al. (12), fué corregido por el factor F_g, que es una función de D_p G_{fm}/μ = N_{Rep}, de acuerdo a Frantz (7). La ecuación de Wen y Yu (28), ha sido arreglada algebraicamente en la forma siguiente:

$$G_{fm} = \frac{\mu}{D_p} \left(\sqrt{1135 + .0408 (D_p^3 \rho_f \rho_s^2)} - 33.7 \right) \quad (A-1)$$

Frantz (7), propone la siguiente ecuación para predecir la caída de presión en la cama fluida:

$$\Delta P = .81 Dt^{-.035} \left(\frac{M}{S} \right) \left(\frac{G}{G_{fm}} \right)^{.05} \quad (A-2)$$

Los resultados calculados se comparan con los experimentales en la Tabla A-3, para G/G_{fm} = 1 y G/G_{fm} = 1.5

Cálculo de L_p

De acuerdo con Yagi y Muchi (29), la altura que origina "pistoneo", se calcula de acuerdo a:

$$L_p = 1.18 Dt (D_p \rho_s)^{-.3} \quad (A-3)$$

Substituyendo los valores para el café tostado, se tiene que L_p = .925 pies.

Cálculo de C_p

Singh y Bhat (24), han desarrollado una metodología para efectuar este cálculo. Primero es necesario calcular L/Dt y Dt/D_p , que son para el café igual a 1.2 y 28.4. Estos valores sirven de guía para escoger la ecuación:

$$\frac{G_p}{G_{fm}} = .009 \left(\frac{Dt}{L}\right)^{1.5} \left(\frac{Dt}{D_p}\right)^{1.5} \quad (A-4)$$

Substituyendo valores para el café tostado se tiene que:

$$G_p = 1.039 G_{mf} \quad (A-5)$$

T A B L A A - 1

ECUACIONES ALTERNAS PARA PREDECIR G_{fm} . COEFICIENTES DE LAS VARIABLES (7)

$$G_{fm} = k D_p \rho_f \rho_s / \mu D_t$$

MODELO Frantz (7)	K	D_p	ρ_f	ρ_s	U	D_t
1	1.75×10^2	1.207	1.018	1.430	.739	.182
2	2.01×10^2	1.126	1.000	1.592	.709	.135
3	1.51×10^4	1.546	1.027	1.000	.806	.209
4	1.36×10^6	2.000	1.030	.825	.836	.210
5	6.52×10^5	2.000	1.031	1.000	.843	.180
6	5.56×10^3	1.518	1.000	1.000	1.000	.260
7	3.44×10^5	2.000	1.000	1.000	1.000	.198
Teórico (4) (7) (12)	4.45×10^5	2.000	1.000	1.000	1.000	0.0
Leva et al (12)	1.40×10^5	1.824	.941	.941	.882	—

T A B L A A - 2

COMPARACION DE VALORES DE G_{fm}

MODELO Frantz (7)	CAFE ORO Experimental = 1240	CAFE ORO MOLIDO Experimental = 350	CAFE TOSTADO Experimental = 960
1	514.5	6.6	289.2
2	1 498.6	22.2	758.7
3	2 239.7	163.0	1 806.0
4	17 780.0	567.4	18 047.0
5	17 766.0	417.6	16 298.6
6	1 867.9	140.0	1 494.6
7	17 686.2	570.4	16 248.5
Teórico (4) (7) (12)	21 956.0	707.5	20 167.5
Leva et al (12)	1 715.0	128.5	1 545.0
Wen y Yu (28)	216.0	18.2	187.0

T A B L A A - 3

ΔP , libras/pie²

COMPARACIONES DE VALORES DE ΔP

TIPO DE CAFE	ORO		TOSTADO		MOLIDO	
	G_{fm}	1.5 G_{fm}	G_{fm}	1.5 G_{fm}	G_{fm}	1.5 G_{fm}
Calculado					28.60	29.20
Ecuación (A-2)	34.6	35.25	15.98	16.31	28.85	28.90
Experimental						
FIGURA 4			16.50	16.88	G_{fm}	1.5 G_{fm}
TABLA 8	34.85	35.15				