

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

CAÍDA DE PRESIÓN EN UN SISTEMA DE DOS FASES
(CAFÉ - AGUA)

TESIS

PRESENTADA A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

DINNA LISSETTE ESTRADA MOREIRA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO

Guatemala, Octubre de 1996

PROFESOR DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
DINNA LISSETTE ESTRADA MOREIRA

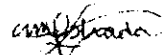
08
T(3844)
C.A

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley orgánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de tesis titulado:

CAÍDA DE PRESIÓN EN UN SISTEMA DE DOS FASES (CAFÉ - AGUA)

tema que fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 18 de Agosto de 1,996.



Dinna Lissette Estrada Moreira

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
CENTRO DE INVESTIGACIONES Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

MIEMBROS JUNTA DIRECTIVA

DECANO
VOCAL 1o.
VOCAL 2o.
VOCAL 3o.
VOCAL 4o.
VOCAL 5o.
SECRETARIO

Ing. Julio Ismael González Podszueck
Ing. Miguel Angel Sánchez Guerra
Ing. Jack Douglas Ibarra Solórzano
Ing. Juan Adolfo Echeverría Méndez
Br. Fernando Waldemar de León Contreras
Br. Pedro Ignacio Escalante Pastor
Ing. Francisco Javier González López

TRIBUNAL QUE PRACTICO EL EXAMEN
GENERAL PRIVADO

DECANO
EXAMINADOR
EXAMINADOR
EXAMINADOR
SECRETARIO

Ing. Julio Ismael González Podszueck
Ing. Julio Chávez Montúfar
Ing. Oscar Rosal Higueros
Ing. Otto de León de Paz
Ing. Francisco Javier González López

Guatemala, 4 de Octubre de 1996

Señor:

Ing. Adolfo Narciso Gramajo
Director de la Escuela de
Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Señor Director:

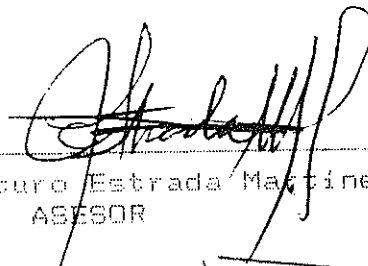
Por medio de la presente me dirijo a usted para comunicarle que he llevado a cabo la revisión final del trabajo de tesis titulado CAIDA DE PRESION EN FLUJO DE DOS FASES (SISTEMA CAFE-AGUA) presentado por la estudiante Dina Liseth Estrada Moreira.

El trabajo se ha desarrollado de acuerdo con el programa y los objetivos iniciales planteados y considero que llena los requisitos académicos para ser aprobado como tesis de grado.

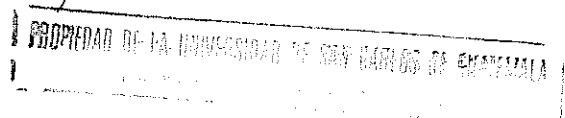
El presente trabajo de tesis es responsabilidad mía y del graduando en lo referente al contenido, presentación, conceptos y opiniones que aquí se traten, así como del estilo y calidad de redacción.

Agradeciendo la atención a la presente aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,



Ing. José Arturo Estrada Martínez
ASESOR





FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica
y Regional de Post-grado de Ingeniería
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12
Guatemala, Centroamérica

Ref. WGAM. 012.96
Guatemala, 18 de octubre de 1996

Doctor
Adolfo N. Gramajo Antonio
Director
Escuela Ingeniería Química
Presente.

Estimado Doctor Gramajo:

Por este medio me dirijo a usted para comunicarle que he revisado el informe final de tesis de la estudiante DINNA LISSETTE ESTRADA MOREIRA, quien realizó el trabajo titulado "CAIDA DE PRESION EN FLUJO DE DOS FASES SISTEMA CAFE-AGUA", el cual fue asesorado por el Ing. José Arturo Estrada Martínez.

Al respecto, me permito informarle que después de haber terminado la revisión del mencionado informe y de haberle hecho las correcciones pertinentes, considero que llena los requisitos para ser aprobada por parte de la Escuela como trabajo de tesis, por lo cual se lo remito y lo pongo a su consideración.

Agradeciendo la atención a la presente, le saluda respetuosamente,

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

M. en Ing. Williams G. Alvarez Mejía
Profesor Titular IV
Area de Operaciones Unitarias



FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica
y Regional de Post-grado de Ingeniería
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12
Guatemala, Centroamérica

El Director de la Escuela de Ingeniería Química; después de
conocer el dictamen del Asesor con el Visto Bueno del Jefe de
Departamento, al trabajo de Tesis de la estudiante **DINNA LISSETTE
ESTRADA MOREIRA**, titulado: **CAIDA DE PRESION EN UN SISTEMA DE DOS
FASES (CAFE - AGUA)**, procede a la autorización del mismo.


Dr. Adolfo Gramajo

DIRECTOR
DE
ESCUELA INTERMEDIA QUIMICA



Guatemala, 24 de octubre de 1,996.



FACULTAD DE INGENIERIA

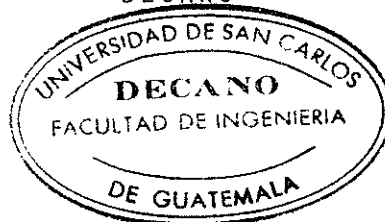
Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica
y Regional de Post-grado de Ingeniería
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12
Guatemala, Centroamérica

El Decano de la Facultad de Ingeniería, luego de conocer la autorización por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de Tesis titulado: **CAIDA DE PRESION EN UN SISTEMA DE DOS FASES (CAFE - AGUA)**, de la estudiante **DINNA LISSETTE ESTRADA MOREIRA**, procede a la autorización para la impresión de la misma.

IMPRIMASE:


Ing. Julio Ismael González Podszuck
DECANO



Guatemala, 24 de octubre de 1,996.

PROPIEDAD DE...
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

ACTO QUE DEDICO

- A DIOS: Por haberme guiado, dándome la perseverancia y el entendimiento necesarios para lograr esta meta.
- A MIS PADRES: José Arturo Estrada Martínez y Miriam Elizabeth Moreira Cuéllar de Estrada.
Por todo su amor, apoyo y su calidad de padres.
Que mi triunfo sea de gran satisfacción por los esfuerzos realizados.
- A MIS HERMANOS: Víctor Hugo, Leslie Jeannette y Byron Arturo.
Con mucho amor.
- A MIS ABUELITOS: Alicia Cuéllar Guerra de Moreira
María Nery Moreira Melgarejo de Dardón
José Luis Moreira Melgarejo (Q.E.P.D)
Con todo mi amor y cariño.
- A MIS TÍOS: Magaly, Auri, Rony, Regina, Carolina, David, Iván, María, Luis y Jeannine.
Por ser tan especiales.
- A MIS PRIMOS Y SOBRINOS: A todos con especial cariño.
- A MIS AMIGOS: Oséar, Patty, Rosalina, Claudia, Brenda, Erik, David y Nancy.
- A USTED: Como una muestra de amistad.
- A: Todas las personas que de una u otra manera han colaborado para esta realización.

AGRADECIMIENTOS

A LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

AL ING. ARTURO ESTRADA:

Por su valiosa asesoría y ayuda incondicional, ya que más que un padre es un gran amigo.

A OSCAR ROSSAL:

Por su apoyo y colaboración, sin la cual no hubiera sido posible la realización de este trabajo.

A TODO MI FAMILIA Y AMIGOS:

Por su amor, motivación y apoyo.

ÍNDICE

Introducción	1
Marco Teórico	2
Justificación	5
Objetivos	6
Hipótesis	7
Parte experimental	8
Metodología	10
Resultados	11
Discusiones	15
Conclusiones	24
Referencias Bibliográficas	25
Apéndices	26
Apéndice 1	27
Apéndice 2	28
Apéndice 3	29
Apéndice 4	30
Apéndice 5	31
Apéndice 6	32
Cálculo de muestra	32
Análisis de error	34
Apéndice 7	36
Apéndice 8	37

INTRODUCCIÓN

La idea directriz de este trabajo, se origina por la situación del sistema de transporte de café en los beneficios, porque, si bien, es cierto que existen en operación regular varias bombas, hasta este momento, ninguna ha sido instalada bajo bases técnicas, desde el punto de vista de la Ingeniería Química. No existe un método para obtener un diseño físico adecuado, partiendo de la capacidad de trabajo requerido.

Por la importancia que tiene la actividad cafetalera en Guatemala, se presenta un diagnóstico del efecto de la caída de presión en el beneficiado de café.

En este trabajo no se pretende establecer las bases de diseño total sobre sistemas de bombeo de café, sino, más bien, investigar el efecto de la caída de presión, por variación del flujo de dos fases (café - agua), en tubería recta horizontal y algunos accesorios, tomando como tercer parámetro la relación de café - agua

El experimento consistió en bombear café fermentado por tubería recta horizontal más algunos accesorios (codos, etc.), y medir la caída de presión, detectada en diferentes puntos del sistema.

Este experimento se realizó en la finca "ONA", propiedad de don Manfredo Lifman, con la colaboración del Ing. Oscar Humberto Jiménez, de la Asociación Nacional del Café. La operación del sistema experimental fue satisfactoria, y permitió la obtención de datos que pudieron relacionarse para aportar conclusiones concretas, que son deducidas de la construcción de curvas, a partir de los datos experimentales.

MARCO TEÓRICO

El sistema de transporte de café, por medio de agua en tuberías circulares, se considera como un flujo de dos fases.

El transporte de un flujo de dos fases, puede clasificarse así:

- a) Gas - líquido
- b) Gas - sólido
- c) Sólido - líquido.

El sistema café - agua, se clasifica como sólido - líquido.

Los tipos de flujo que se tiene en un sistema sólido - líquido, de acuerdo con Hughmark (1), son los siguientes:

- a) **Partículas sólidas menores de 40 micrones de diámetro, pueden ser transportadas en flujo laminar, sin sedimentarse.**
- b) Sólidos de 40 micrones a 2 mm de diámetro, sedimentan en el agua, en flujo laminar; pero, pueden ser transportados como una suspensión por agua, en flujo turbulento.
- c) A velocidad normal de transporte, partículas mayores de 2 mm de diámetro, no son suspendidas, sino que rebotan a lo largo del fondo de la tubería.

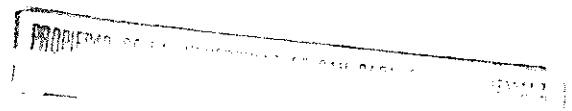
Zenz y Othmer recomiendan que, en el flujo de dos fases, sólido - líquido, se distinga dos casos:

- a) El flujo de sólidos finos (harina, cenizas, carbón), que, generalmente, son tratados como plásticos de Bingham (fluidos no Newtonianos).
- b) El flujo de sólidos gruesos (arena, grava), que, pueden tratarse como suspensiones gas - sólido.

En el caso del sistema café - agua, no es una suspensión de partículas sólidas finas en un fluido, porque el transporte de granos de café por agua está lejos de ser un fluido plástico.

Las ecuaciones diferenciales que gobiernan el flujo de fluidos, han sido resueltas para un gran número de arreglos geométricos (2); sin embargo, teóricamente podrían escribirse estas ecuaciones para el transporte de sólido - líquido; pero, hasta ahora, no existe una solución de este sistema.

El ataque práctico del problema reside, entonces, en la correlación de datos experimentales por métodos conocidos en la Ingeniería, con el objeto



de encontrar los valores de los parámetros en ecuaciones de tipo de fanning o de Darcy.

1) Hinkle (3, 4) encontró la siguiente ecuación para calcular la caída de presión en flujo sólido - líquido, en tubería horizontal:

$$\Delta P = U_L P_L / 2g + W U_p / g + 2f P_L + U^2 a L / g D_t (1 + f_p U_p W / f U_L^2 P)$$

donde:

$$\begin{aligned} U_L P_L / 2g &= \text{aceleración del fluido} \\ W U_p / g + 2f P_L &= \text{aceleración del sólido} \\ U^2 a L / g D_t &= \text{fricción del fluido} \\ f_p U_p W / f U_L^2 P &= \text{fricción del sólido} \\ U_p / U_a &= L - 0.179 D_p^{0.3} P_p^{0.5} \end{aligned}$$

pero, el P calculado es mayor que el experimental.

2) Smith (5, 6) recomienda, para evaluar la caída de presión, el uso de la siguiente ecuación basada en suspensiones en agua, de sólidos de diámetro de 0.01 plg. a 1 plg., con concentraciones alrededor de 30 volúmenes por ciento, en tubería de 1½ plg. a 23 plg.

$$i_M - i_L = 121 C \left[\frac{D_t g (P_s - P_l)}{U_p} \frac{U_s}{V D_p g (P_s - P_l) / P_l} \right]^{3/2}$$

donde:

- i_M = gradiente de presión para mezcla = $(\Delta h_m / L) (P_m / P_l)$, en pies de líquido por pie de tubería
- i_L = gradiente de presión para líquido fluyendo a una velocidad U, en pies de líquido por pie de tubería
- Δh_m = pérdida de cabeza para mezcla, en pies de mezcla
- L = Longitud de tubería, en pies
- P_m = Densidad de mezcla, en lb/pie³
- P_s = Densidad de la partícula, en lb/pie³
- D_t = Diámetro de tubería, en pies
- D_p = Diámetro de partícula, en pies
- C = Concentración como fracción volumétrica del sólido
- g = Aceleración de la gravedad = 32.2 pies/seg²
- U = Velocidad de la mezcla, en pies/seg
- U_s = Velocidad de caída libre del sólido en el líquido, en pies/seg

La ecuación es aplicable a tamaño de partículas antes indicado y a velocidades de líquido no mayor de 3 pies/seg.; para mezcla de partículas, la ecuación dará error, y la cantidad de error depende de la cantidad de variación en el tamaño de la partícula. (14)

3) Daily y Bugliarello (7) encontraron en el flujo de suspensiones de fibras, en tubería horizontal, que el factor de fanning en la suspensión, era menor que el factor de fanning correspondiente para flujo de agua.

4) Daily y Col (8) trabajaron con partículas esféricas de 0.0255 plg. de diámetro, y encontraron que el factor de fanning de la suspensión era mayor que el factor de fanning del agua, y, además, reportaron que el factor de fanning aumenta, cuando la concentración de partículas en el sistema aumenta, y cuando el diámetro de las partículas disminuye.

5) Daily y Roberts (9), trabajando con el sistema de partículas esféricas de poliestireno y agua, encontraron que el factor de fanning de la suspensión era mayor que el factor de fanning del agua, para una tubería de 2 plg. de diámetro.

JUSTIFICACIÓN

El proceso de beneficiado del café que se practica en toda Guatemala, es básicamente el mismo. Sin embargo, existen algunas diferencias originadas, principalmente, por la magnitud de las instalaciones y por las condiciones climáticas, en las cuales, se lleva a cabo la cosecha. El productor del café es también quien lo beneficia in situ, por la vía húmeda, hasta pergamino seco. En fincas muy pequeñas, algunas veces, benefician con pulperos manuales, seguido de fermentación y lavado en una pequeña pila y secado en láminas metálicas o cualquier otra superficie disponible.

Algunos de estos microproductores venden su cosecha en cereza a algún beneficio cercano, pues, existen algunas pequeñas centrales de beneficio. Las fincas de media caballería o más, tienen su propio beneficio mecanizado.

El café se cultiva, en general, en las faldas de los volcanes y sierras, con topografía típicamente inclinada, la mayoría, de acceso difícil. La zona occidental tiene abundante agua, que fluye con bastante pendiente, lo que hace innecesario el tratamiento y la recirculación de agua, ya que el agua utilizada para lavado y transporte se oxigena, aguas abajo, fácilmente. Esta abundancia de agua (la época lluviosa coincide con la cosecha) hizo que en un tiempo proliferara el uso de energía hidráulica para generar energía de movimiento, práctica que ha ido desapareciendo por la conveniencia de los motores estacionarios de diesel y, en menor grado, por la introducción de la red nacional de energía eléctrica en ciertas áreas. Por otra parte, la coincidencia de la cosecha de café con la época lluviosa, dificulta considerablemente el secado en patios de cemento, por lo que en esa zona, éste ha ido sustituyéndose gradualmente por secado mecánico, utilizándose siempre los patios existentes para presecado.

En este trabajo, se pretende investigar el efecto de la caída de presión por variación del flujo de dos fases en el sistema (café - agua), en tubería recta horizontal y algunos accesorios, tomando como tercer parámetro la relación de café - agua.

Esta investigación se origina, debido a que el sistema de transporte de café en los beneficios no contempla ningún control de la caída de presión y sus efectos en la producción, y se trabaja sin bases técnicas, desde el punto de vista de Ingeniería Química. Por ello, se desea establecer ecuaciones, por medio de las cuales, se puedan establecer los distintos factores que toman parte en la caída de presión en un sistema de dos fases, y establecer el efecto de la misma en el sistema.

OBJETIVO

- Determinar el flujo óptimo en tuberías circulares de un sistema de dos fases, sólido - líquido, a través de pruebas experimentales, en un Beneficio de Café.

HIPÓTESIS

El efecto de la caída de presión por variación del flujo de dos fases en el sistema (café - agua), permitirá establecer ecuaciones para calcular las bombas más aptas, según el punto de vista del Ingeniero Químico.

PARTE EXPERIMENTAL

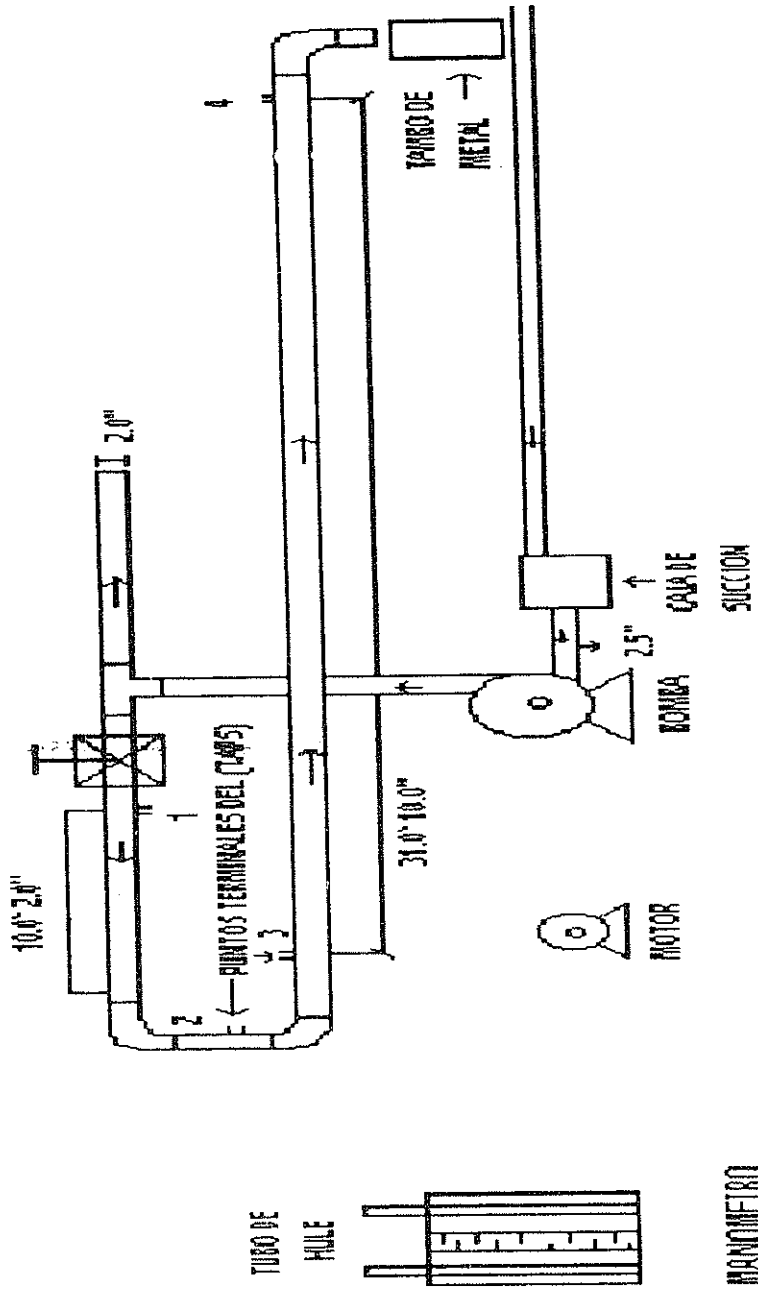
El experimento consistió en bombear una mezcla de café - agua, a través de tubería galvanizada circular de dos pulgadas de diámetro, provista con diferentes accesorios, con el propósito de medir la caída de presión en partes representativas del sistema.

Descripción del aparato:

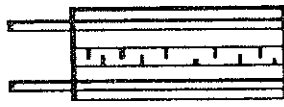
El aparato que se detalla en la figura No. 1, consta de las siguientes partes:

- a) Una bomba centrífuga tipo RS - 7
Velocidad de operación = 1150 r.p.m.
Diámetro de la tubería de succión = 2 ½ pulgadas
Diámetro de la tubería de impulsión = 2 pulgadas
Capacidad de la caja de succión = 35 galones.
- b) Un motor eléctrico con las siguientes características:
Potencia = 3 caballos nominales
Velocidad de operación = 3640 r.p.m.
Voltaje = 220 Voltios
Amperaje = 5 - 15 amperios.
- c) Una sección de prueba, formada de tubería galvanizada recta, 5 coplas, 3 codos de 90°, 4 niples especiales y una llave de compuerta (que se utilizó para regular y variar el flujo en el sistema).
- d) Para medir la caída de presión, fue necesario construir niples especiales, con puntos terminales del manómetro.
Los niples especiales fueron colocados en diferentes posiciones, para poder determinar diferentes caídas de presión en el sistema.
- e) El manómetro utilizado fue de vidrio en forma de U, llamado manómetro diferencial. El líquido usado para hacer las mediciones, fue mercurio.
- f) Para poder medir la mezcla café - agua, fueron utilizados tambos de metal de 18 y 5.5 galones; el café se pesó en una balanza corriente y el agua se midió en una probeta graduada.

FIGURA # 1



TUBO DE
HULE



MANOMETRO

MOTOR

BOMBA

2.5"

CAJOTE DE
SUCCION

31.0" 10.0"

PUNTOS TERMINALES DEL (LAFS)

10.0" 2.0"

TANQUE DE
METAL

METODOLOGÍA

El experimento consistió en bombear café fermentado por tubería recta horizontal más algunos accesorios (codos, etc.), y medir la caída de presión, detectada en diferentes puntos del sistema.

Método experimental:

La metodología usada en el desarrollo del experimento, fue la siguiente:

- a. Para una relación de café-agua, se alimentó la caja de succión de la bomba.
- b. Se puso a funcionar la bomba y se esperó un tiempo prudencial, para que las condiciones del sistema fueran iguales en todos los puntos (estado constante).
- c. Fueron realizadas medidas de flujo en la descarga del sistema, por medio de un cronómetro y un tambo de metal; se anotó el tiempo en que tarda en llenarse el tambo, y se determinó la relación café-agua, así:
 - Se midió el agua con una probeta graduada.
 - Se pesó el café sedimentado en el fondo del tambo.
- d. Se tomaron caídas de presión, en el sistema en el orden siguiente:
 1. Caída de presión de tubería recta horizontal.
 2. Caída de presión de tubería recta horizontal más un (1) codo de 90°.
 3. Caída de presión de tubería recta horizontal más dos (2) codos de 90° más tubería recta horizontal.
- e. Por medio de la llave de compuerta, se reguló y varió el flujo en el sistema.
- f. Se añadió a la caja de succión de la bomba más café fermentado, para variar la relación café-agua.
- g. Fueron repetidos los pasos anteriores, hasta obtener todos los datos necesarios de caídas de presión a diferentes flujos y diferentes relaciones de café - agua reportados en este trabajo.

RESULTADOS

En la tabla No. 1, se han resumido los resultados de caída de presión experimental para diferentes relaciones de café - agua y razones de flujo en tubería recta horizontal.

TABLA No. 1

Razón café - agua en lb café/lb agua	Razón de flujo en gal/min.	Caída de presión en cm de Hg.	Energía Amperios
0.3	75	9	8
0.3	100	8	8
0.372	75	12	8
0.372	100	11	8
0.372	120	10	8
0.53	75	12	8
0.53	100	10	8
0.53	120	9	8
0.6	75	10	8
0.6	100	9	8
0.6	120	8	8
0.72	75	12	8
0.72	100	10	8
0.72	120	9	8

La distancia entre puntos de manómetro fue de 21 pies 4, pulgadas fija para todas las corridas.

En la tabla No. 2, se han resumido los resultados de caída de presión experimentales, para diferentes relaciones de café - agua y razones de flujo de tubería recta horizontal más un codo de 90°.

TABLA No. 2

Razón café - agua en lb café/lb agua	Razón de flujo en gal/min.	Caída de presión en cm de Hg.	Energía Amperios
0.3	75	9	8
0.3	100	8	8
0.372	75	11	8
0.372	100	10	8
0.372	120	8	8
0.53	75	10	8
0.53	100	8	8
0.53	120	8	8
0.6	75	9	8
0.6	100	8	8
0.6	120	8	8
0.72	75	10	8
0.72	100	8	8
0.72	120	7	8

La distancia entre puntos de manómetro fue de 10 pies 6 pulgadas, fija para todas las corridas.

En la tabla No. 3, se han resumido los resultados de caída de presión experimentales, para diferentes relaciones de café - agua y razones de flujo de tubería recta horizontal, más dos codos de 90°.

TABLA No. 3

Razón café - agua en lb café/lb agua	Razón de flujo en gal/min.	Caída de presión en cm de Hg.	Energía Amperios
0.3	75	10	8
0.3	100	9	8
0.372	75	13	8
0.372	100	12	8
0.372	120	10	8
0.53	75	13	8
0.53	100	11	8
0.53	120	10	8
0.6	75	11	8
0.6	100	10	8
0.6	120	8	8
0.72	75	11	8
0.72	100	9	8
0.72	120	8	8

La distancia entre puntos de manómetro fue de 10 pies 10 pulgadas, fija para todas las corridas.

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

En la tabla No. 4, se han resumido los resultados de caída de presión experimentales, para diferentes relaciones de café - agua y razones de flujo de tubería recta horizontal, más dos codos de 90°, más tubería recta horizontal.

TABLA No. 4

Razón café - agua en lb café/lb agua	Razón de flujo en gal/min.	Caída de presión en cm de Hg.	Energía Amperios
0.3	75	25	8
0.3	100	24	8
0.372	75	26	8
0.372	100	25	8
0.372	120	23	8
0.53	75	27	8
0.53	100	25	8
0.53	120	23	8
0.6	75	24	8
0.6	100	24	8
0.6	120	22	8
0.72	75	23	8
0.72	100	21	8
0.72	120	20	8

La distancia entre puntos de manómetro fue de 31 pies 10 pulgadas, fija para todas las corridas.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Con el fin de facilitar el tratamiento de los datos experimentales y con el objeto de obtener la mejor dependencia entre los parámetros que gobiernan el flujo de fluidos en general, se efectuó el siguiente procedimiento:

- a) Se calculó y ploteó los factores de fanning ($\log FAN$) y los números de Reynolds ($\log REY$), evaluados con las propiedades del agua. (Apéndice 1, figura No. 2)
- b) Se calculó y ploteó los factores de fanning ($\log FAC OR$) y los números de Reynolds ($\log REC OR$), evaluados con las propiedades del agua; pero, corregidos por las relaciones de café - agua, o sea, considerar flujo de dos fases. (Apéndice 2, figura No. 3)
- c) Se calculó y ploteó los factores de fanning ($\log FAN_p$) y los números de Reynolds ($\log REY_p$), evaluados con las propiedades del agua y de las partículas de café; pero, considerados como flujo de una sola fase. (Apéndice 3, figura No. 4)
- d) Se calculó y ploteó los números de fanning ($\log FAC OR_p$) y los números de Reynolds ($\log REC OR_p$), evaluados con las propiedades del agua y de las partículas de café; pero, corregidos con las relaciones de café - agua, o sea, considerar flujo de dos fases. (Apéndice 4, figura No. 5)

Como se puede observar en las figuras No. 2 y No. 3, la dispersión que presentan los puntos no indica alguna tendencia funcional. Su diferencia está, en el primer caso, usar D como el diámetro de tubería, y segundo caso, D como el diámetro de la partícula: sin embargo, el parámetro de la relación café - agua no ha sido tomado en cuenta ni puede obtenerse de los ploteos.

En la figura No. 3, usando D como diámetro de tubería; pero, tomando en cuenta la corrección de la velocidad, puede observarse que se ha obtenido una familia de curvas que demuestran la influencia del parámetro discutido anteriormente.

Ahora bien, con el fin de obtener una sola función; pero, que contenga la relación café - agua y sea representativa del tamaño de la partícula, se plotó en la figura No. 5 $\log \text{FAC OR}_p$ contra $\log \text{REC OR}_p$ obteniéndose una tendencia definida en los puntos. Se calculó la ecuación de la línea recta que mejor representa la función; de acuerdo a regresión lineal de cuadros mínimos (10), la ecuación obtenida es:

$$\log Y = 6.3692 - 2.0919 \log X \quad (a)$$

donde:

- Y = Factor de fanning para partículas de café
- X = Número de Reynolds para partículas de café.

La ecuación predice $\log Y$, con una desviación standard de Y de 0.37, por lo que, usando la distribución de la T de student (11), el factor de fanning puede estimarse en 10.8%. Comparando este error con el experimental (Apéndice 6), puede observarse que los coeficientes de la línea son estadísticamente significativos.

Introduciendo (a) en la ecuación de fanning (2), y después de un arreglo algebraico, obtenemos:

$$\Delta P = 2.35 \times 10^6 (LU^2/D_p) (D_p P_p U/u)^{-2.1} \quad (b)$$

donde:

- ΔP = Caída de presión en lb/pies²
- L = Longitud de tubería en pies
- U = Viscosidad del agua en lb/pies-seg
- D_p = Diámetro de la partícula de café en pies
- P_p = Densidad del café en lb/pies³

Fueron tomados en cuenta para los cálculos de longitud equivalente, los resultados de la columna 3, de la tabla No. 5, por considerarse menos representativas las columnas 1 y 2 de dicha tabla, debido a que los puntos terminales del manómetro se encontraban en posición cercana a las turbulencias producidas por los codos de 90°. La diferencia entre los valores de las columnas 2 - 3 y 1 - 3 oscilan entre 15 a 50%.

Fueron calculados y plotados los resultados de longitud equivalente por codo de 90° y velocidad lineal corregida (UCOR). (Apéndice 5, figura No. 6)

La ecuación de la línea recta, presentada en la figura No. 6, es:

$$\log Y = 1.0975 - 0.1889 \log x \quad (c)$$

donde:

- Y = Longitud equivalente
- X = Velocidad lineal corregida

La ecuación predice $\log Y$, con una desviación standard de Y de 0.07, por lo que, usando la distribución de la T de student (11), la longitud equivalente puede estimarse en -4%.

Puede observarse que los coeficientes de la línea son estadísticamente significativos.

Eliminando logaritmos y arreglando, obtenemos:

$$L_{\text{equiv}} = 12.52 (\text{UC OR})^{-0.2} \quad (d)$$

donde:

- L_{equiv} = Longitud equivalente de tubería recta horizontal por codo de 90° en pies.
- UC OR = Velocidad lineal corregida en pies/segundo.

CAIDA DE PRESION POR CODO DE 90°

En la tabla No. 5, se han resumido los resultados experimentales de caída de presión en codos de 90°. Los datos tabulados se obtuvieron restando del AP calculado para tubería recta por medio de la ecuación (a).

TABLA No. 5

(TAPS 1 -2) Caída de presión por codo de 90°, en cm Hg	(TAPS 1 - 3) Caída de presión por dos codos de 90° en cm Hg	(TAPS 1 - 4) Caída de presión por dos codos de 90° en cm Hg
3.1	4.8	9.7
2.26	4	9.1
6.35	7	8.4
5.3	6.2	10.8
3.3	5.3	8.9
4.6	7.5	10.9
3.1	6	10.3
3.15	5	8.6
4.1	6	9.5
3.3	5.2	8
3.5	4.3	6.2
5.33	6.3	8.8
3.5	4.3	7.2
2.45	3.4	6.4

FIGURA # 2

■ NUMERO DE REYNOLDS VRS. FACTOR DE FANNING

Factor de fanning (FAN)

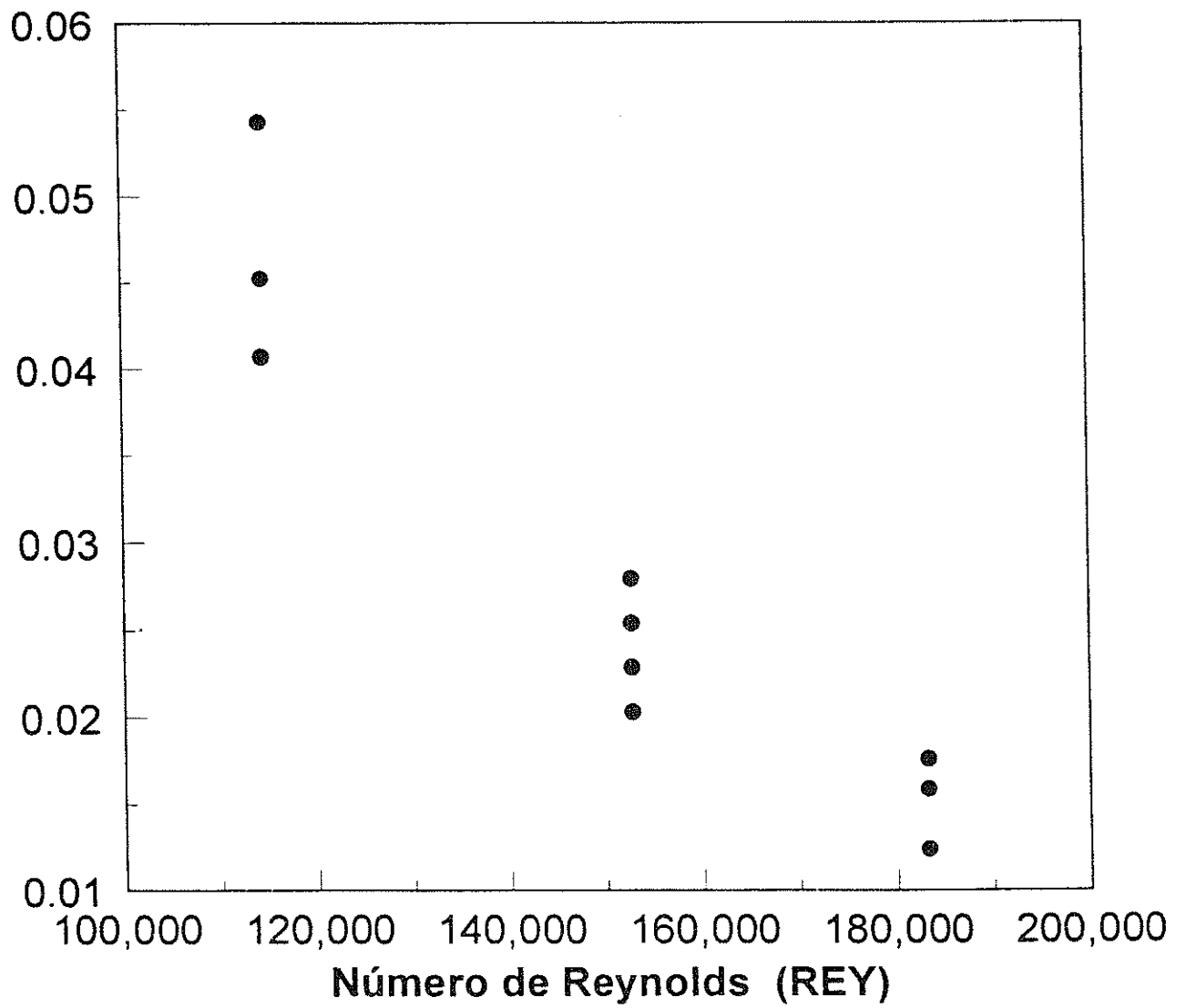


FIGURA # 3

- NUMERO DE REYNOLDS VRS. FACTOR DE FANNING CORREGIDOS

Factor de fanning Corregido (FACOR)

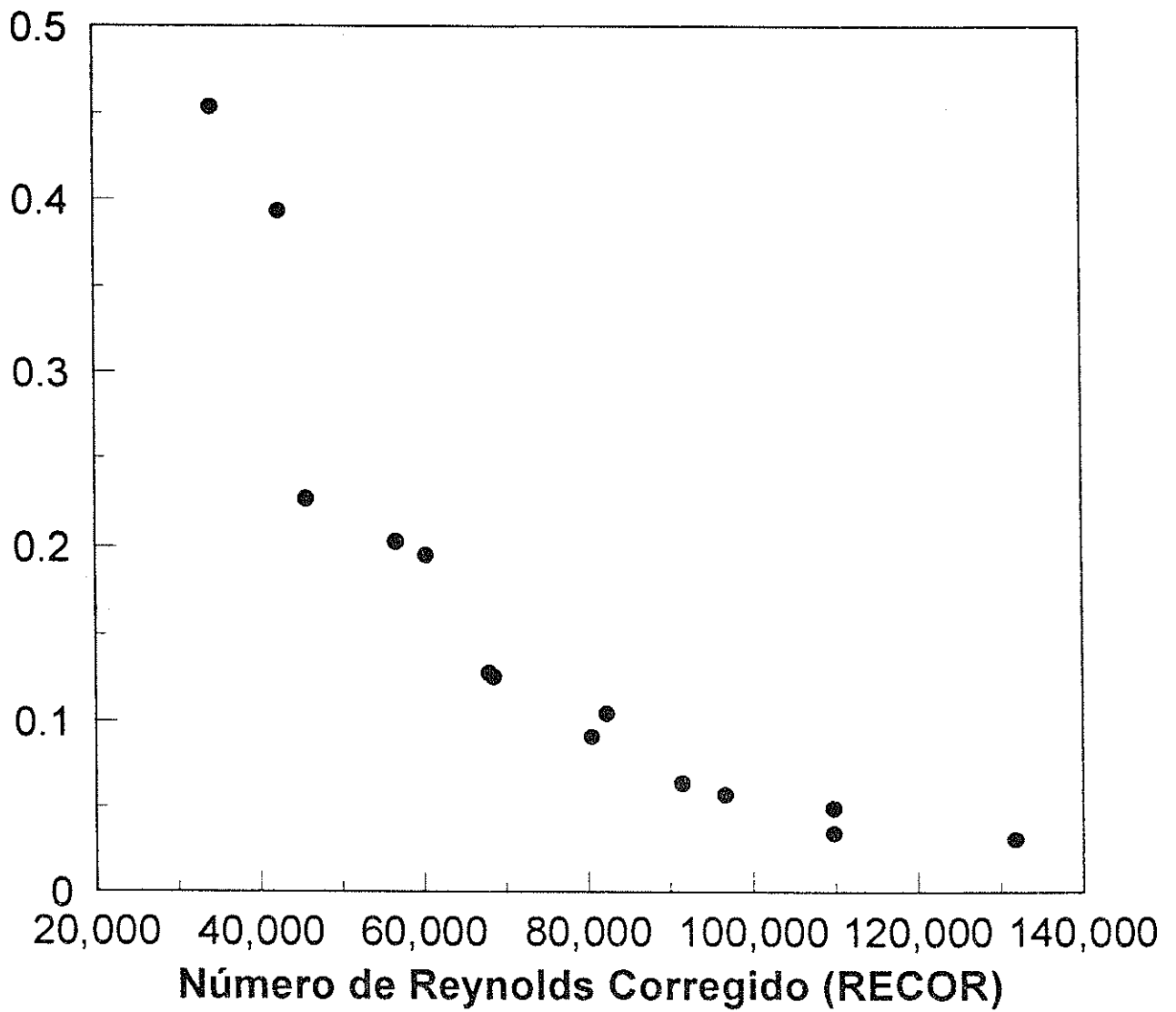


FIGURA # 4

- NUMERO DE REYNOLDS VRS. FACTOR DE FANNING, TOMANDO EN CUENTA LA PARTICULA DE CAFE

Factor de fanning (FANp)

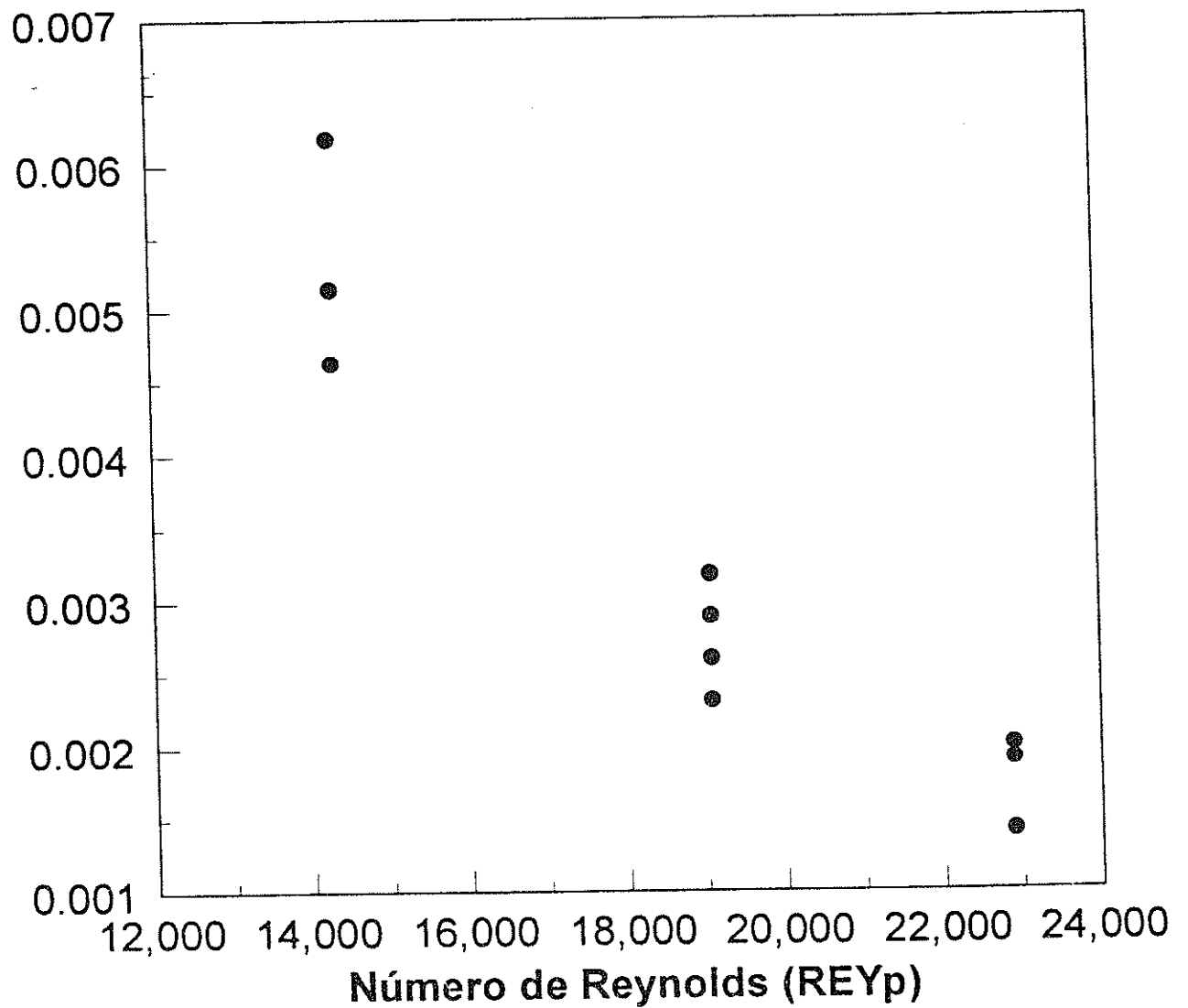


FIGURA # 5

- NUMERO DE REYNOLDS VRS. FACTOR DE FANNING CORREGIDOS, TOMANDO EN CUENTA LA PARTICULA DE CAFE

Factor de fanning Corregido (FACORp)

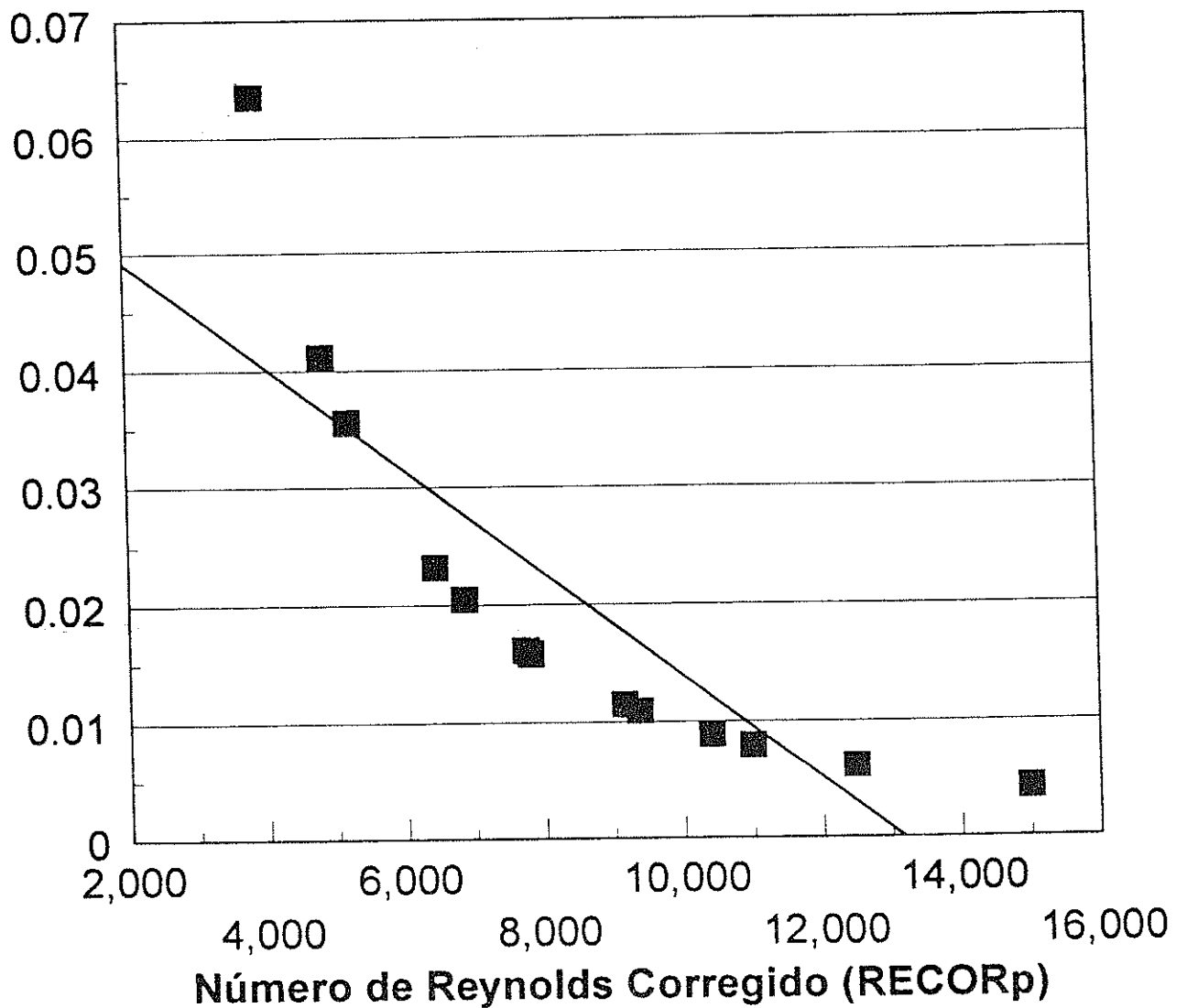
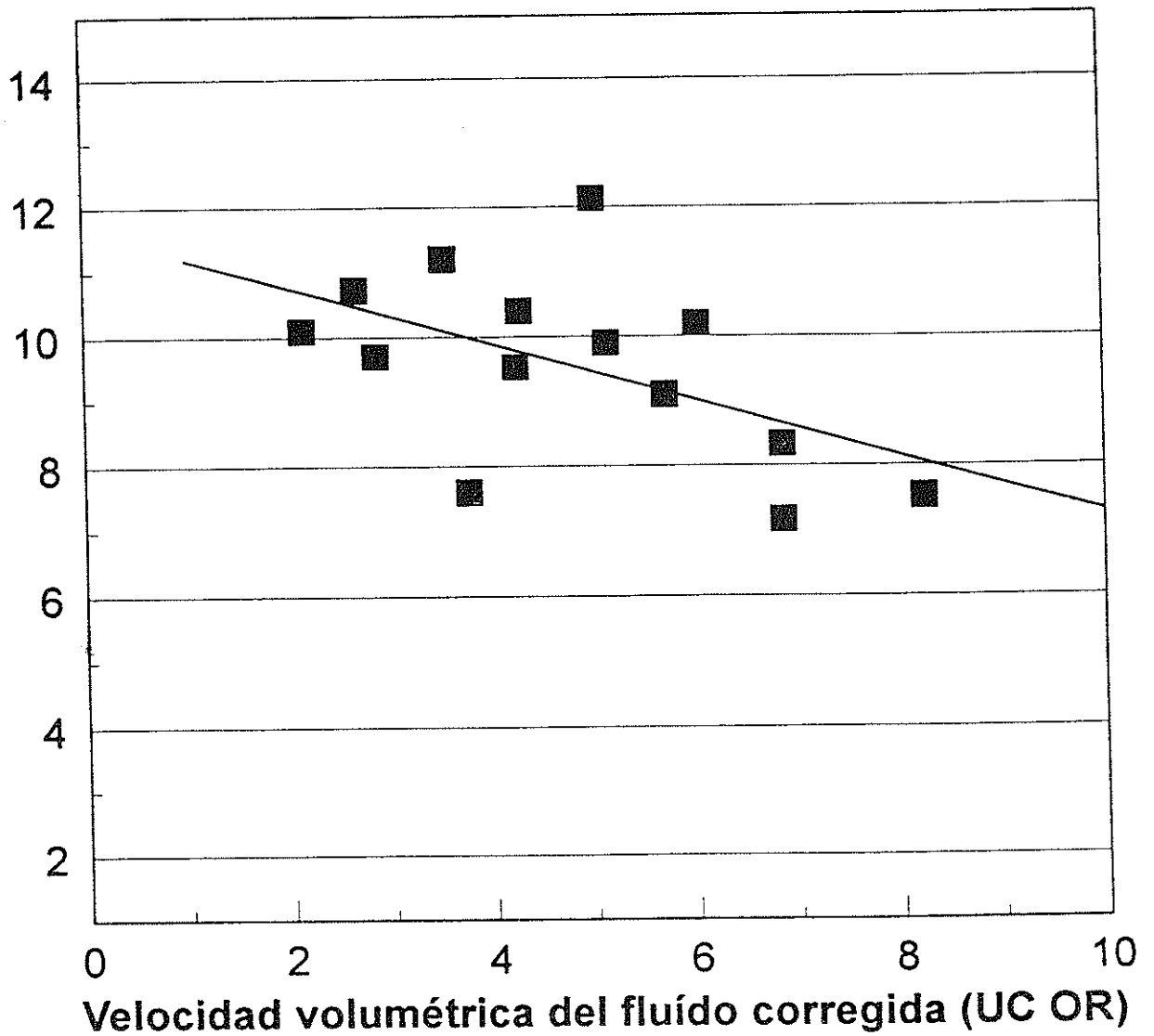


FIGURA # 6

- VELOCIDAD VOLUMETRICA DEL FLUIDO VRS. LONGITUD EQUIVALENTE

Longitud equivalente de la tubería (L equiv)



CONCLUSIONES

Para transportar café - agua, en tubería galvanizada de 2 pulgadas de diámetro, entre N_{RE} de 4000 a 17000, con velocidades del fluido de 2 a 8 pies/segundo, con café de un diámetro de 0.0196 pies, y una relación de café - agua de 0.300 a 0.720 lb. de café/lb. de agua, se han encontrado:

- a. El factor de fanning puede predecirse con un error de ± 0.00148 por:

$$f = 2.35 \times 10^6 / (N_{RE})^{2.1}$$

Esta ecuación es análoga en forma a las ecuaciones de flujo de un fluido en tubería, que para N_{RE} menor que 2200 (2), es:

$$f = 16/N_{RE}$$

(Ecuación de Hagen Poisevillee)

Para N_{RE} mayor que 2200 y menor de 105, la ecuación de Blasius (2):

$$f = 0.0791/N_{RE}^{(1/4)}$$

Otra aproximación para todo el intervalo de flujo turbulento (12) es:

$$f = 0.0014 + 0.125/N_{RE}^{0.32}$$

- b. La caída de presión en tubería recta horizontal, puede predecirse con un error de ± 0.30 , por:

$$\Delta P = 2.35 \times 10^6 (LU^2/U_p) (D_p P U/u)^{-2.1}$$

Esta ecuación, es análoga a la ecuación de flujo de fluidos de Hagen - Poiseville:

$$\Delta P = 32 LUu/g_c D_p^2$$

- c. La longitud equivalente de tubería recta por codo de 90°, puede calcularse a partir de la velocidad del fluido, por:

$$L_{\text{equivalente}} = 12.52 (UC OR)^{-0.2}$$

REFERENCIAS

- 1) HUGHMARK, G, Ind, Chem, Engrs, 53, 389 (1961).
- 2) BIRD, R. S; W. E. STEWART and E. N. LIGHTFOOT. "Transport".
- 3) HINKLE, BILL. Phd Thesis, Atlanta, Georgia. Institute of Technology. (June 1953).
- 4) ZENZ and OTHMER. "Fluidization and Fluid Particle Systems". Reinhold publ, corp, New York (1960), pág. 365.
- 5) SMITH, G. Trans, Inst, Chem, Eng (London) 33, 93 - 113. (1955).
- 6) Perry, J. H. "Chemical Engineers Handbook". Pág. 5.44 - 5.45, New York (1991).
- 7) DAILY, J. W. and BUGLIARRELLO, G. Tappi, 44 (7) 497. (1961).
- 8) DAILY and COL. Tappi, 44 (12) 881 (1961).
- 9) DAILY, J. W. and ROBERTS, P. R. Tappi, 49 (3) 115. (1966).
- 10) SOCKS, B. J. "Linear Regression in two Variables". IBM Corp, 1994.
- 11) BENNETR, C.A. and N. L. FRANKLIN. "Statistical analysis in Chemistry and the Chemical Insdustry". John Wiley & Sons Inc, New York, 1983.
- 12) McCABE, WARREN and SMITH JULIAN. "Unit Operation of Chemical Engineering". McGraw Hill Book, Company Inc, 1991. Pág. 67.
- 13) MICKLEY, H., SHERWOOD, T. and REED, C. "Applied Mathematics in Chemical Engineering". McGraw Hill Book, Company Inc, New York, 1992.
- 14) WORSTER and DENNY. Proc, Inst, Mech, Engrs (London) 169, 563 - 586. (1985).
- 15) ANACAFE. Manual de Beneficiado de café. Guatemala. 1985.

APÉNDICES

APENDICE 1

A continuación, se han resumido los resultados de los factores de fanning y números de Reynolds para diferentes valores de la velocidad lineal U , ploteados en la figura No. 2.

TABLA No. 6

U pies / seg.	REY	FAN
7.16	114552.92	0.040718
9.54	152737.23	0.020359
7.16	114552.92	0.054291
9.54	152737.23	0.025449
11.45	183284.67	0.015905
7.16	114552.92	0.054291
9.54	152737.23	0.027994
11.45	183284.67	0.017672
7.16	114552.92	0.045242
9.45	152737.23	0.022904
11.45	183284.67	0.012371
7.16	114552.92	0.054291
9.54	152737.23	0.025449
11.45	183284.67	0.015905

APENDICE 2

A continuación, se han resumido los resultados de los factores de fanning y números de Reynolds para diferentes valores de la velocidad lineal UC OR, ploteados en la figura No. 3.

TABLA No. 7

UC OR pies / seg.	REC OR	FAC OR
2.14	34329	0.453397
2.86	45772	0.226698
3.77	60419	0.19516
5.03	80559	0.091481
6.04	96670	0.057175
2.66	42568	0.393164
3.54	56757	0.202725
4.25	68109	0.127983
4.29	68658	0.125943
5.72	91544	0.063758
6.86	109853	0.034437
5.15	82389	0.104953
6.86	109853	0.049196
8.24	131823	0.030747

APENDICE 3

A continuación, se han resumido los resultados de los factores de fanning y números de Reynolds para diferentes valores de la velocidad lineal U, ploteados en la figura No. 4.

TABLA No. 8

U pies / seg.	REYp	FANp
7.16	14308	0.004633
9.54	19078	0.002316
7.16	14308	0.006177
9.54	19078	0.002895
11.45	22894	0.001909
7.16	14308	0.006177
9.54	19078	0.003185
11.45	22894	0.00201
7.16	14308	0.005148
9.54	19078	0.002606
11.45	22894	0.001407
7.16	14308	0.006177
9.54	19078	0.002895
11.45	22894	0.001909

APENDICE 4

A continuación, se han resumido los resultados de los factores de fanning y números de Reynolds para diferentes valores de la velocidad lineal UC ORp, ploteados en la figura No. 5.

TABLA No. 9

UC ORp pies / seg.	FAC ORp	REC ORp
2.14	0.063563	3894.8
2.86	0.035588	5205.2
3.77	0.020481	6861.4
5.03	0.011505	9154.6
6.04	0.007979	10992.8
2.66	0.041141	4841.2
3.54	0.023229	6442.8
4.25	0.016116	7735
4.29	0.015817	7807.8
5.72	0.008897	10410.4
6.86	0.006186	12485.2
5.15	0.010975	9373
6.86	0.006186	12485
8.24	0.004287	14996.8

APENDICE 5

A continuación, se han resumido los resultados de los cálculos de longitud equivalente de tubería recta por codo de 90° y velocidad volumétrica corregida, ploteados en la figura No. 6.

TABLA No. 10

Longitud equivalente Pies de fluido	UC OR pies/seg.
10.1	2.14
9.7	2.86
7.6	3.77
12.13	5.03
10.2	6.04
10.73	2.66
11.2	3.54
9.53	4.25
10.4	4.25
9.1	5.72
7.17	6.86
9.9	5.15
8.33	6.86
7.53	8.24

APÉNDICE 6

CALCULO DE MUESTRA:

Fueron tomados los datos de la corrida No. 4.

a) Factores de fricción:

$$FAN = f = H_f D / LU^2 / 2g$$

$$D = \text{Diámetro de tubería} = 2.067 / 12 \text{ pies}$$

$$L = \text{Longitud de tubería} = 21.334 \text{ pies}$$

$$P = \text{Densidad del líquido} = 62.40 \text{ lb/pies}^3$$

$$\Delta P = \text{Caída de presión} = 11 * 27.85 = 306 \text{ lb/pies}^2$$

$$H_f = \text{Caída de cabeza} = \frac{\Delta P}{P} = 306 / 62.4 = 4.92 \text{ pies-lb/lb}$$

$$U = \text{Velocidad volumétrica} = 100 \text{ gal/min} * 0.0955 = 9.55 \text{ pies/seg.}$$

$$FAN = 4.92 * 2.067 * 64.4 / 12 * 21.334 * 9.55 = 0.025449$$

b) Número de Reynolds:

$$REY = D U P / u$$

$$u = \text{Viscosidad del líquido} = 0.000672 \text{ lb/pie-seg.}$$

$$REY = 2.067 * 9.55 * 62.4 / 12 * 0.000672 = 152737.23$$

c) Factor de fricción corregido y número de Reynolds corregido:

$$REL = \text{Relación de café - agua} = 0.372 \text{ lb de café/lb de agua}$$

$$UC OR = U * REL = 9.55 * 0.372 = 5.03 \text{ pies/seg.}$$

$$FAC OR = 2.067 * 4.92 * 64.4 / 12 * 21.334 * (5.03)^2 = 0.091481$$

$$REC OR = 2.067 * 5.03 * 62.4 / 12 * 0.000672 = 80559$$

- d) Factores de fricción y número de Reynolds, tomando en cuenta la partícula de café:

$$\begin{aligned}D_p &= \text{Diámetro de la partícula de café} = 0.0196 \text{ pies} \\FAN_p &= 4.92 * 0.0196 * 62.4/21.334 * (9.55)^2 = .002895 \\REY_p &= 0.0196 * 9.55 * 62.4/0.000672 = 19078 \\FAC OR_p &= 0.0196 * 4.92 * 64.4/21.334 * (5.03)^2 = 0.011505 \\REC OR_p &= 0.0196 * 5.3 * 62.4/0.000672 = 9154.6\end{aligned}$$

- e) Caída de presión por codo de 90 grados:

$$\begin{aligned}L &= 31.835 \text{ pies} \\ \Delta P &= L P U^2 f/2g D_p \\ f &= \text{Factor de fricción} = 0.009904 \text{ (figura 6.4)} \\ \Delta P &= 31.835 * 62.4 * 25.3 * 0.009904/64.4 * 0.0196 = \\ & \quad 396 \text{ lb/pies}^2 \\ \Delta P \text{ experimental} &= 25.0 \text{ cm Hg} \\ \Delta P \text{ calculado} &= 14.2 \text{ cm Hg} \\ \Delta P \text{ por dos (2) codos} &= 10.8 \text{ cm Hg} \\ \Delta P \text{ por codo de 90 grados} &= 5.40 \text{ cm Hg}\end{aligned}$$

- f) Longitud equivalente de tubería recta por codo de 90 grados.

$$\begin{aligned}L \text{ equivalente} &= \Delta P D_p 2g/U^2 P f \\ L \text{ equivalente} &= 5.40 * 0.0196 * 64.4/25.3 * 62.4 * 0.009904 = \\ & \quad \mathbf{12.13 \text{ pies}}\end{aligned}$$

PROPIEDAD DE...
UNIVERSIDAD DE...
FACULTAD DE...
CARRERA DE...

ANÁLISIS DE ERROR

- a) La variancia de cada parámetro se determinó por la siguiente ecuación (11):

$$S^2 = \frac{(X_i - X)^2}{n-1}$$

donde:

- S^2 = Variancia
- X_i = Punto experimental
- X = Promedio de puntos
- n = Número de puntos

Los límites de error, se pueden calcular por la ecuación:

$$\text{Límites} = S * T / n$$

donde:

- S = Desviación estándar
- T = T de student, con límites de confianza de 95%

De las ecuaciones anteriores, se calculó la variancia en los siguientes parámetros:

- $\Delta P = \pm 0.3 \text{ cm Hg}$
- $D_p = \pm 0.216 \text{ pies}$
- $L = \pm 0.0021 \text{ pies}$
- $UC \text{ OR} = \pm 0.13 \text{ pies/seg}$
- $u = \pm 0.00715 \text{ lb/pies-seg}$

- b) La variancia de cada parámetro influye sobre el número de Reynolds y el factor de fanning, de las ecuaciones (a) y (b).

Para encontrar esta variancia, se adoptó el método siguiente (13):

$$Q = F(q_1, q_2, \dots, q_n)$$

$$dQ = \frac{dF}{dq_1} dq_1 + \frac{dF}{dq_2} dq_2 + \dots + \frac{dF}{dq_n} dq_n$$

$$Q = F_1 q_1 + F_2 q_2 + \dots + F_n q_n$$

$$f = \frac{P \cdot 2g \cdot D_p}{L \cdot UCOR^2 \cdot P} \quad N_{RE} = \frac{D_p \cdot P_p \cdot UCOR}{U}$$

$$f = 2g \left[\left(\frac{D_p}{L} \cdot UCOR^2 \cdot P \right) \Delta (\Delta P) + \left(\frac{P}{L} \cdot UCOR^2 \cdot P \right) \Delta (D_p) - \left(\frac{P \cdot D_p}{L^2} \cdot UCOR^2 \cdot P \right) \Delta (L) - \left(2 \cdot \frac{\Delta P \cdot D_p}{L} \cdot UCOR \cdot P \right) \Delta (UCOR) \right]$$

$$f = \pm 0.00148$$

$$N_{RE} = \pm 323$$

- c) La línea que se ajustó a los puntos experimentales en la figura No. 5, nos da una variancia en f , predecido por la ecuación (a) de 10.8%.

Comparando con la variancia para cada punto, vemos que la ecuación es estadísticamente significativa.

APÉNDICE 7

A continuación, se han resumido los cálculos para obtener el diámetro de la partícula de café: (4)

$$D_p = 6 V_p/S_p$$

donde:

- D_p = Diámetro de la partícula de café.
- V_p = Volumen de la partícula de café.
- S_p = Superficie de la partícula de café.

Considerando la partícula de café como una elipse, tenemos:

$$S_p = \pi a b$$

- **Haciendo rotar la elipse sobre el eje de las abscisas, obtenemos el volumen de la elipse por procedimientos matemáticos conocidos**
(6):

$$V_p = \pi a^3 / 2b^2 (b^2 - a^2/3)$$

Sustituyendo valores, tenemos que el diámetro de la partícula de café es:

$$D_p = 6 \text{ mm} = 0.0196 \text{ pies}$$

APÉNDICE 8

EQUIPO UTILIZADO EN BENEFICIOS

- 1.- Caracterización de etapas típicas.
 - a. Recepción:
 - a.1. En sacos, a bandas de transporte y, luego, a básculas (0 - 100 Kg.).
 - a.2. En sacos, después de pesar un camión y, luego, a tolva de distribución con transportador a cangilones.
 - b. Clasificación:
 - b.1. Separación de basura, hojas, ramas, en parrillas de metal.
 - b.2. Clasificación por flotación, utilizando sifón para alimentación de pulperos.
 - c. Despulpado:
 - c.1. Pulperos mecánicos, manuales y motorizados, en paralelo, según capacidad de producción, predominando los de cilindro horizontal sobre los de vertical.
 - d. Separación:
 - d.1. Por zarandas
 - d.2. Por cribas
 - e. Desmucilaginado:
 - e.1. Por fermentación natural, en pilas.
 - e.2. Por desmucilaginado mecánico:
 - e.2.1. Horizontal continua (Pinhalense)
 - e.2.2. Vertical continua
 - e.2.3. Vertical por tandas
 - f. Lavado/Clasificación:
 - f.1. Bombas lavadoras (transporte)
 - f.2. Lavadoras mecánicas
 - f.3. Correteo en canales abiertos de cemento
 - g. Presecado:
 - g.1. En patios, en parihuelas, en lámina
 - g.2. En presecadores mecánicos verticales

h. Secado:

h.1. En patios, en regiones donde la época seca coincide con la cosecha, en parihuelas y en láminas.

h.2. Secado mecánico

h.2.1. Secadores rotatorios (guardiolas)

h.2.2. Secadores verticales

h.2.3. Secadores de camas