

PÉRDIDAS DE PRESIÓN EN EL TRANSPORTE HIDRÁULICO DE CAFÉ POR TUBERÍA PVC DE 88 mm

RESUMEN

Este documento plantea modelos matemáticos para el transporte hidráulico de café a través de tubería PVC de 88 mm (3 pulg.), gráficos y tablas, que permiten establecer el comportamiento del fluido en cuanto a la pérdida de presión a lo largo de tuberías verticales y horizontales, lo mismo que codos a 90°, dispuestos en diferentes posiciones. El análisis estadístico realizado permite determinar los valores más probables de las cantidades calculadas, a partir del grupo limitado de datos obtenidos, para rangos de velocidad de transporte entre 1,0 y 2,5 [m/s] y de concentración de sólidos en la mezcla agua-café entre 10 y 40%.

PALABRAS CLAVES: Transporte hidráulico de café, pérdida de presión.

ABSTRACT

This document shows mathematical models for the hydraulic conveying of coffee through PVC pipes of 88 mm (3 in), graphics and charts that allow to establish pressure losses along vertical and horizontal pipes, as well as 90° elbows in different positions. The statistical analysis allowed to determine the most probable values, starting from a limited group of data obtained for ranges of velocities varying from 1,0 to 2,5 [m/s] and solids/water concentrations between 10 and 40%.

KEYWORDS: Hydraulic conveying, conveying of coffee, pressure losses.

NELSON ENRIQUE ÁVILA JIMÉNEZ

Ingeniero Mecánico.
Universidad Tecnológica de Pereira
avila@utp.edu.co

CATALINA BECERRA LOTERO

Ingeniera Mecánica.
Universidad Tecnológica de Pereira
cataing@utp.edu.co

YAMAL MUSTAFÁ IZA

Ingeniero Mecánico, M. Ing.
Profesor Asociado
Universidad Tecnológica de Pereira
yamal@utp.edu.co

JUAN RODRIGO SANZ URIBE

Ingeniero Mecánico, Ph.D.
Investigador Científico II
CENICAFÉ
Juanr.sanz@cafedecolombia.com

1. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial el transporte de líquidos y gases a través de conductos tubulares cerrados es muy común como consecuencia de los adelantos de la tecnología industrial. Desde el siglo XIX se han aplicado métodos de transporte de sólidos en conductos tubulares, a distancias cada vez mayores. Para el caso particular del transporte hidráulico de café por tubería, la información es muy escasa, por lo que es difícil hacer predicciones sobre la pérdida de energía en tuberías y accesorios. Uno de los documentos más ilustrativos en este sentido es el escrito por Federico Sierra [11], donde se describe el maltrato sufrido por los granos de café cuando se transporta por tuberías y se emplea para su impulsión una bomba del tipo sumergible. En dicho trabajo se plantean también modelos matemáticos que describen la pérdida de presión en este tipo de transporte.

Para la evaluación de estas pérdidas, se construyó una red hidráulica, que permitió, por medio de métodos experimentales, recopilar la cantidad de información necesaria para comprender el comportamiento del fenómeno físico. La red hidráulica se diseñó con base en las normas técnicas establecidas principalmente por la norma *ASME test code* [12], y fue dotada de instrumentos de medición de flujo en la tubería, concentración de sólidos en la mezcla y pérdida de presión estática a lo largo de la línea de tubos. Se instalaron elementos como: bomba sumergible para la impulsión de la suspensión,

una válvula reguladora de flujo que permite obtener velocidades de la mezcla entre 1,0 y 2,5 [m/s], elementos de separación de sólidos en el fluido transportador y un dosificador de café para tener control sobre la concentración de sólidos entre 10 y 40%.

En primera instancia, se realizó un estudio observacional y analítico del problema, y posteriormente se procedió a una recolección de datos e información para realizar un análisis estadístico que mostró la incertidumbre de la información obtenida. A partir de ésta, se ejecutó un análisis de regresión y seguidamente se generaron modelos matemáticos de potencia que expresan las pérdidas de presión en función de la concentración de café en el agua y de la velocidad de la mezcla. En el caso de los codos a 90° las caídas de presión se expresan por medio de la determinación del coeficiente de pérdidas para cada condición del régimen de flujo.

Con esta investigación se pretendió generar información técnica confiable para usar en el diseño de sistemas de transporte hidráulico de café por tubería PVC presión de 88 mm de diámetro nominal, muy comunes en las fincas cafeteras con producciones medianas y grandes.

2. COMPONENTE TEÓRICO

Los transportadores hidráulicos llevan materiales a lo largo de tuberías o canales teniendo en el agua el fluido principal, en estos transportadores la pulpa (material

transportado y agua) es movida por la presión creada por una diferencia natural en el nivel o por medio de aparatos mecánicos (bombas o elevadores hidráulicos) a través de canales o tuberías y bajo sistemas de gravedad [8].

2.1 Transporte de sólidos en suspensión. Cuando se transportan sólidos suspendidos en un fluido (suspensión), pueden ser clasificados de acuerdo a la forma que son arrastradas las partículas sólidas, en: homogéneos cuando los sólidos son uniformes; y heterogéneos o mezclas multicomponentes, cuando otras formas de masa también están contenidas en dicho fluido.

En las mezclas heterogéneas las partículas se mueven con el flujo por medio de dos procesos diferentes: en suspensión, si las partículas son pequeñas y la velocidad de flujo es alta; por saltos (esto es, moviéndose a lo largo de una serie de brincos cortos intermitentes) si las partículas son grandes o la velocidad de flujo es baja. En los materiales que forman las mezclas heterogéneas y siguen un régimen sin depósito, que es una condición de flujo forzado, ninguna de las partículas puede quedar estacionaria sobre la tubería y todas se mueven junto con el flujo, con un cierto retraso que depende de su tamaño según Elie Condolios y Edmond E. Chapus en [5].

El flujo de fluidos a través de conductos cerrados, involucra pérdidas de energía, debidas principalmente a la naturaleza de las paredes de los tubos (rugosidad), en el caso de secciones rectas de tuberías. En accesorios, como codos a 90°, más bien se producen perturbaciones de la corriente que origina remolinos y vórtices que intensifican las pérdidas [10].

2.2 Mezclas multicomponentes. La especificación de las medidas de diferentes masas y pesos puede hacerse, ya sea analizando los valores para la mezcla total o las cantidades de masa y peso para cada clase o fracción de masa.

La masa específica de mezcla se define como

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow \epsilon^3} \frac{\sum_i^n \Delta m_i}{\Delta V} = \lim_{\Delta V \rightarrow \epsilon^3} \frac{\sum_i^n \rho_i \Delta V_i}{\Delta V} \quad (1)$$

En la ecuación anterior el subíndice i se refiere a todas las sustancias en la mezcla, Δm_i y ρ_i son la masa y la densidad de la i -ésima fracciones, respectivamente, y es ΔV_i el volumen total de la i -ésima fracción.

La fracción de masa de la i -ésima componente no tiene unidad y está definida por

$$w_i = \frac{\rho_i \Delta V_i}{\rho \Delta V} = \frac{\Delta m_i}{m} \quad (2)$$

y tal como se puede ver, w_i no puede ser mayor que 1. La concentración de masa se define como:

$$C_i = \frac{\Delta m_i}{\Delta V} = \frac{\rho_i \Delta V_i}{\Delta V} \quad (3)$$

y tiene unidades de (M/L³).

Hay que anotar que mientras la masa específica de cada material en la mezcla ρ_i , será una propiedad del material, w_i y C_i no son propiedades de la mezcla sino variables que cambian en el espacio y el tiempo según Streeter [10].

2.3 Presión estática local. En un fluido en movimiento, como en un fluido estacionario, la presión estática local es el esfuerzo de compresión en el punto considerado. Es igual a la presión sobre una superficie que se mueve con el fluido o a la presión normal sobre una superficie estacionaria paralela a la corriente. Cuando una corriente pasa sobre un sólido liso, plano, estacionario, la presión normal ejercida sobre la superficie de ese sólido es, en cada punto, la presión estática local del fluido en dicho punto, porque en la vecindad inmediata de la superficie la corriente sólo puede ser paralela a la superficie. En la práctica, esta presión se mide haciendo un pequeño agujero perpendicular a la superficie, teniendo cuidado de evitar cualquier rebaba saliente en los bordes, y conectando la abertura así practicada a un indicador de presión. Éste agujero se denomina orificio piezométrico, como se describe en [9].

2.4 Velocidad límite y su relación con el transporte de sólidos en suspensión. Como su nombre lo indica, la velocidad límite es la mínima velocidad de flujo para que no exista riesgo de depósito y obstrucción de la tubería. La definición más usada y de fácil determinación experimental es aquella que identifica como la velocidad a la cual los sólidos gruesos permanecen detenidos por periodos importantes en el fondo de la tubería (formación de dunas móviles y/o lecho fijo de fondo).

La velocidad límite en transporte hidráulico de sólidos depende fundamentalmente de las siguientes variables: granulometría de las partículas sólidas, densidad relativa de las partículas sólidas, diámetro de la tubería, concentración de sólidos en la mezcla, inclinación de la tubería. Si la velocidad de flujo de la mezcla cae por debajo de esta velocidad límite de depósito, más y más material podría ser depositado en el lecho hasta que el tubo es finalmente bloqueado [13].

2.5 Régimen de transporte. Para la correcta conducción del fluido es suficiente con mantener una corriente turbulenta, sin que se haya de tener en cuenta la influencia de la gravedad. Las partículas se depositan solamente si la mezcla circula en régimen laminar o se encuentran en reposo, de acuerdo con Herning [4], y

siguiendo el criterio descrito por Reynolds¹, se determina que para el diámetro de tubería seleccionado (88 mm), el régimen de flujo es turbulento para la velocidad mínima de transporte $\left(v = 1,0 \left[\frac{m}{s} \right] \right)$ empleada.

3. DESCRIPCIÓN DE LA RED HIDRÁULICA Y DEL PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

La Figura 2 muestra un diagrama esquemático del sistema de lazo cerrado, construido para realizar las pruebas necesarias en la investigación.

El fluido se impulsa por medio de una bomba centrífuga sumergida en un tanque, en el cual se obtiene la mezcla.

El control de la concentración de sólidos en suspensión se realizó por medio de un alimentador mecánico de velocidad variable, tipo tornillo sinfín.

El control de la velocidad de la mezcla se efectuó por medio de una válvula reguladora diseñada especialmente para este fin.

Los gradientes de presión fueron medidos usando tomas piezométricas de presión diferencial, ubicadas a más de diez (10) diámetros aguas abajo y más de un diámetro aguas arriba de cualquier accesorio para evitar variaciones por efecto de la turbulencia en las pruebas de transporte a través de secciones rectas. Para las pruebas en accesorios las tomas de presión se ubican al menos un diámetro antes y después del accesorio.

La presión es medida por medio de un manómetro diferencial provisto de un colchón de aire que evita la formación de columnas muy extensas. La velocidad media del flujo fue medida tomando muestras en la descarga de extracción del circuito por medio del tiempo de llenado de un tanque volumétrico. Las medidas de la densidad de la mezcla fueron hechas de manera indirecta muestreando la concentración y la densidad de los granos en el transcurso de las pruebas.

El manómetro diferencial, que se representa en la Figura 1, sirve para medir diferencias de presiones en líquidos solamente y se distingue del manómetro diferencial ordinario en que no precisa de líquido manométrico especial. Consta de dos tubos (1 y 2) que se conectan en sus extremos inferiores con los puntos (A y B), donde se desea hacer la medición. Por el conducto 3 se suministra aire a una presión menor a las presiones p_1 y p_2 . Las válvulas de tres pasos (4 y 5) sirven para desconectar el manómetro y para purgar el aire [6].

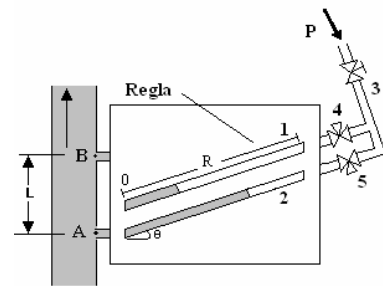


Figura 1. Esquema del manómetro diferencial inclinado.

Los elementos principales del equipo son:

1. Tanque de mezclado.
2. Bomba sumergible.
3. Tubería de conducción de mezcla agua-café.
4. Toma piezométrica.
5. Válvula reguladora.
6. Válvula cambia vías 3/2.
7. Escurridor de sólidos.
8. Tubería de recirculación de agua.
9. Sistema dosificador de café.
10. Tubería de conducción de mezcla agua-café, para toma de muestras.
11. Tanque volumétrico.

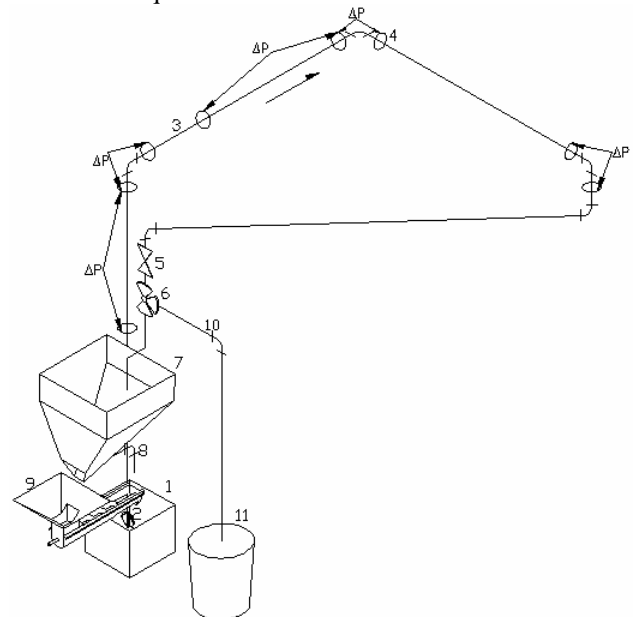


Figura 2. Componentes de la red hidráulica.

La adquisición de los datos es una etapa muy sensible para la investigación, debido a la relación directa que tiene con la veracidad de los resultados encontrados. Se realizaron 298 pruebas estimadas, concernientes a cinco puntos específicos en la red (tubería vertical y horizontal y tres codos a 90° dispuestos en diferentes posiciones) para rangos de velocidad de transporte entre 1,0 y 2,5 [m/s] y de concentración de sólidos en la mezcla agua-café entre 10 y 40%. Para cada punto, condición de velocidad y concentración se repitieron 5 veces las pruebas, tomándose datos de pérdida de presión, velocidad y concentración.

¹ Osborne Reynolds. Ingeniero británico; demostró la existencia de dos tipos de flujo viscoso en tuberías en 1883.

4. MODELOS MATEMÁTICOS USADOS

Para correlacionar los datos, los autores han utilizado el modelo tipo BOWEN [3], con el fin de predecir el gradiente de presión en el régimen de flujo turbulento manejado durante las pruebas, como una función de la velocidad de flujo y la concentración de sólidos.

$$J = \xi \times v^a \times C_w^b \quad (4)$$

Donde:

$$J = \text{gradiente de pérdida de cabeza} \frac{\text{m.c.a.}}{\text{m tubo}} .$$

ξ = Constante (Dimensional).

$$v = \text{Velocidad media de flujo} \frac{\text{m}}{\text{s}} .$$

C_w = concentración de sólidos en decimal con base en

$$\text{masa} \frac{\text{kg}_{\text{café}}}{\text{kg}_{\text{mezcla}}} .$$

a y b = constantes.

Los valores de a , b y ξ , se hallaron usando el método de regresión lineal múltiple, a partir de los valores obtenidos experimentalmente: cabeza de pérdidas (variable dependiente), velocidad y concentración de la mezcla (variables independientes).

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Pocos problemas han merecido tanta atención o han sido tan investigados como la determinación de las pérdidas de presión en tuberías. Reconocidos investigadores como Henry Darcy y Julius Weisbach, realizaron numerosos experimentos con tubos de sección circular, concluyeron que la resistencia al flujo de un fluido es:

- Directamente proporcional a la extensión de la tubería.
- Inversamente proporcional a una potencia del diámetro.
- Función de una potencia de la velocidad.
- Varía con la naturaleza de las paredes de los tubos (rugosidad), en el caso de régimen turbulento, y que: Es independiente de la posición del tubo.

Es independiente de la presión interna bajo la cual el fluido fluye.

Estas pérdidas de presión pueden ser expresadas así:

$$h_f = k \frac{L v^n}{D^u} \quad (5)$$

$$D^u \frac{h_f}{L} = k v^n$$

Si se designa, h_f/L por S_f , esto es la pérdida de presión unitaria, por metro lineal de tubería, se tiene:

$$D^u S_f = k v^n ,$$

se puede escribir:

$$D^u S_f = \varphi(v)$$

El coeficiente k tiene en cuenta las condiciones de los tubos y lleva implícitas cuestiones de cierta complejidad. En la práctica, esa expresión general de resistencia es sustituida por fórmulas empíricas establecidas para determinadas condiciones, o por la ecuación 5 presentada en [1].

Debido a que el diámetro de la tubería para todos los casos es constante (88 mm), se suprime de la ecuación tomando la forma:

$$S_f = \varphi(v)$$

Para el caso de transporte de sólidos en suspensión, aparece un nuevo término C_w , quedando la ecuación de pérdidas en función de la velocidad y la concentración de sólidos como se muestra a continuación:

$$S_f = \varphi(v, C_w)$$

De esta manera, es aplicable el modelo matemático tipo BOWEN para la ecuación de potencias múltiple, que entrega los resultados ajustados a ecuaciones y diagramas, que permiten mostrar de manera sencilla y organizada la información obtenida por medio de la experimentación. Otra razón para seleccionar el modelo de potencias, es la aparente tendencia mostrada por los resultados obtenidos, que parecen seguir una trayectoria creciente de pérdida de presión, proporcional al aumento de la velocidad y la concentración de sólidos.

5.1 Ecuaciones y gráficas para transporte vertical y horizontal. Para el transporte hidráulico de una mezcla agua café por tubería vertical de PVC de 88 mm de diámetro, con velocidades de flujo entre 1,0 y 2,5 m/s y concentración de sólidos en la mezcla entre 10 y 40% las pérdidas de presión pueden ser expresadas como se muestra a continuación:

$$h_f = 9,537 v^{0,537} C_w^{0,338} \quad (6)$$

Donde:

h_f : Pérdida de cabeza en tubos [m.c.a./100 m].

v : Velocidad media de la mezcla [m/s].

C_w : Concentración de sólidos (decimal) con base en

$$\text{masa} \left[\frac{\text{kg}_{\text{café}}}{\text{kg}_{\text{mezcla}}} \right] .$$

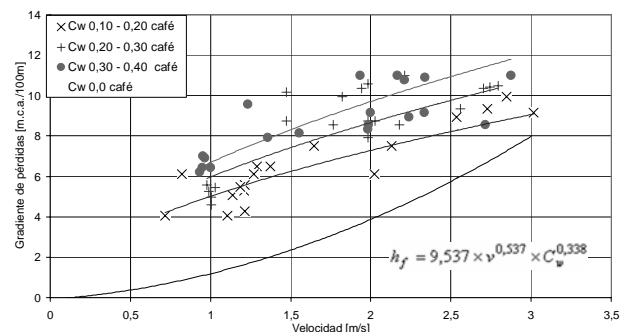


Figura 3. Gradiente de pérdidas Vs velocidad de transporte, para tubería vertical.

Para el transporte hidráulico de una mezcla agua café por tubería horizontal de PVC de 88 mm de diámetro, con velocidades de flujo entre 1,0 y 2,5 [m/s], y concentración de sólidos en la mezcla entre 10 y 40%, las pérdidas de presión pueden ser expresadas como se muestra a continuación:

$$h_f = 4,559 v^{1,039} C_w^{0,339} \quad (7)$$

Donde:

h_f : Pérdida de cabeza en tubos [m.c.a./100 m].

v : Velocidad media de la mezcla [m/s].

C_w : Concentración de sólidos (decimal) con base en

$$\text{masa} \left[\frac{kg_{café}}{kg_{mezcla}} \right].$$

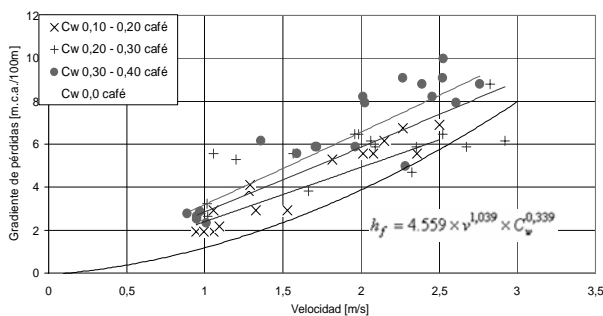


Figura 4. Gradiente de pérdidas Vs velocidad de transporte, para tubería horizontal.

Para validar la confiabilidad de las ecuaciones determinadas, el análisis estadístico de los valores experimentales, entregó como resultado: el valor del coeficiente de correlación (R^2) de 0,769 para la ecuación (6), y de 0,833, para la ecuación (7), el error estándar más alto no supera el 25%, estando asociado al logaritmo neperiano del coeficiente en la ecuación hallada. El coeficiente de variación está por debajo de 12,5%. La significancia de los datos encontrados para la velocidad y la concentración, está por debajo de 5%, lo que indica que la toma de los datos fue controlada adecuadamente.

5.2 Coeficiente de pérdidas en el flujo a través de accesorios. Casi todos los sistemas de tuberías contienen además de tubos rectos, componentes adicionales (ensanchamientos, contracciones, válvulas, codos o curvas, conexiones en T, etc.), elementos que contribuyen a la pérdida de presión global del sistema, estas pérdidas se denominan **pérdidas menores**. En estos elementos los efectos debidos a la fricción son pequeños, y mas bien estos accesorios producen una perturbación de la corriente que origina remolinos y desprendimientos que intensifican las pérdidas; específicamente en codos a 90° las pérdidas para agua sola se debe a la turbulencia producida por la creación de un fluido secundario, que se superpone al flujo principal y a un desprendimiento de la capa límite [7].

Uno de los métodos más comunes para determinar las pérdidas menores o caídas de presión es especificar el **coeficiente de pérdida** k_L , como

$$\Delta p = k_L \frac{1}{2} \rho v^2$$

De modo que
$$\Delta p = k_L \frac{v^2}{2g}$$

O bien, como

$$k_L = \frac{h_l}{\left(\frac{v^2}{2g}\right)} = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2} \rho v^2}$$

La anterior ecuación contempla las pérdidas en función del cuadrado de la velocidad, lo cual es inexacto para el caso de transporte de sólidos en suspensión, dado que el valor real de k_L depende bastante de la geometría del componente considerado y también de las propiedades del fluido, es decir

$$k_L = \phi(\text{geometria, propiedades fluido})$$

A los diferentes rangos de velocidad 1,0 a 2,5 [m/s] y concentración 10 a 40%, para los accesorios en este caso codos a 90° dispuestos en diversas posiciones, las pérdidas de presión pueden ser expresadas siguiendo el modelo: $h_f = \sum k \frac{v^n}{2g}$, con los siguientes coeficientes de

n y k :

Concentración / Posición	10 – 20 %		20 – 30%		30 – 40%	
	n	k	n	k	n	k
Vertical, fluido en dirección ascendente	1.885	1.161	1.383	1.710	1.745	1.716
Horizontal	1.848	1.102	1.421	1.679	1.659	1.709
Vertical, fluido en dirección descendente	1.578	1.490	1.085	2.532	1.452	2.158

Tabla 1. Resumen de los valores n y k .

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El proceso de toma de decisiones, se encaminó a determinar un modelo representativo del fenómeno estudiado, encontrando un modelo simplificado de la situación real, que no es necesariamente completo o exacto en todas sus relaciones y se concentra en las correspondencias fundamentales entre pérdida de energía, velocidad de transporte y concentración de sólidos en la mezcla, ignorando las variables irrelevantes. Éste modelo es entendido con mayor facilidad que el suceso empírico (observado), permitiendo diseñar instalaciones de transporte hidráulico de café, con mayor facilidad y con un mínimo de esfuerzo y pérdida de tiempo.

El análisis estadístico de las mediciones realizadas, se hizo útil en cuanto a que permitió determinar los valores más probables de las cantidades calculadas, a partir del grupo limitado de datos, determinando analíticamente la incertidumbre del resultado final, valiéndose para ello de la estimación de valores como el error estándar, el coeficiente de variación, coeficiente de correlación y

nivel de significancia de los datos manejados, para lo cual cabe anotar que solo en el caso del transporte por tubería horizontal, se encontró un valor que no es altamente significativo.

La construcción de la red hidráulica, basada en las normas técnicas establecidas para el diseño de este tipo de instalaciones, se logró exitosamente, para ello se manejaron rangos de velocidad probados desde 1,0 hasta 2,5 [m/s], en donde el flujo permanecía turbulento; basado en los criterios descritos por Reynolds, evitando de esta manera tener precipitación de sólidos a lo largo de las líneas de tubería.

Se ha hallado una nueva ecuación con relación a la pérdida de presión que incluye el efecto de cambios en la concentración de sólidos en la mezcla. Esta ecuación permite la predicción de los gradientes de pérdida de carga para un rango de velocidades y concentración en transporte de mezcla por tubería PVC de 88 mm. de diámetro.

Las gráficas obtenidas para las cuatro velocidades y los tres intervalos de concentración, mostradas en las figuras 3 y 4 tienen en común que su línea de tendencia tanto para transporte horizontal como vertical, se aproxima de forma asintótica con el aumento de la velocidad, a la pérdida de carga del agua limpia.

El modelo de potencias obtenido para representar las pérdidas de presión en transporte de la mezcla por tubería vertical, presenta un error promedio respecto a los valores experimentales de 10%, y en transporte horizontal 15%.

De la Tabla 1 se puede concluir que los coeficientes k de pérdida de presión obtenidos para los tres intervalos de concentración en los codos, muestran un claro comportamiento de incremento de k con el aumento de la concentración al igual que se observa que el coeficiente de pérdida mayor, se presenta en el codo vertical con el fluido en dirección descendente, seguido por el codo vertical con el fluido en dirección ascendente y finalmente el coeficiente menor se presentó en el codo en posición horizontal.

Los autores sugieren a los Ingenieros y Extensionistas, encargados de construir equipos de transporte hidráulico de café, tener en cuenta los siguientes aspectos en la realización de los cálculos de diseño:

Manejar la información contenida en este documento, únicamente en transportadores que manejen velocidades entre 1,0 y 2,5 [m/s] y concentración de sólidos entre 10 y 40 %.

Aplicar la información presentada únicamente en transporte hidráulico de café despulpaado.

Emplear los resultados presentados en este documento solamente en instalaciones donde la tubería PVC de 88 mm. esté dispuesta en posición vertical, horizontal y los

codos en posición vertical con el fluido en dirección ascendente, horizontal y vertical con el fluido en dirección descendente.

Evaluar las condiciones más extremas de trabajo que se puedan presentar en cada instalación, para construir equipos suficientemente robustos que soporten las exigencias impuestas por los usuarios, en caso de no poder determinar la concentración de la mezcla transportada, emplear la concentración límite de 40% para la realización de los cálculos.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] ALVAREZ, Azevedo. Manual de Hidráulica. Sexta Edición. México: Editorial Harla, 1975. Pág. 44-45, 107,180.
- [2] BERNAL, César Augusto. Metodología de la investigación para administración y economía. Colombia: Prentice may, Marzo de 2000. Pág. 64-135.
- [3] H. B Lokon. P. W. Jonson. and R.R Horsley. 8th International Conference on the Hydraulic Transport of Solids in Pipes. Johannesburg South Africa. August. 25 th-27 th, 1982. A Sacale up Model for Predicting head loss gradients in iron ore slurry pipelines, Royal Melbourne Institute of Technology, Australia pp 103-110.
- [4] HERNING, Fritz. Transporte de Fluidos por Tuberías. España: Editorial Labor, 1975. Pág. 23-27, 75-79.
- [5] KARASSIK, Igor J. Manual de bombas: diseño y aplicación, especificaciones, operación y mantenimiento. México: McGraw-Hill inc., 1983. Pág. 251-274.
- [6] MATAIX Claudio, Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas. Segunda edición. México: Editorial Mexicana, 2003. Pág. 56.
- [7] MUNSON, Bruce R. Et All. Fundamentos de mecánica de fluidos. México. Editorial Limusa S.A., 2002. Pág. 447 – 533.
- [8] OCAMPO GIL, Luís Hernando. Sistemas de Transporte de Materiales. Pereira, Colombia: Sección de publicaciones U.T.P. Abril de 2000. Pág. 176.
- [9] PERRY, John H. Manual del Ingeniero Químico. Tercera Edición. México: McGraw Hill, 1979. Tomo II. Pág.2001, 595.
- [10] STREETER, Víctor; WYLIE, Benjamín y BEDFORD, Keith. Mecánica de Fluidos. Novena Edición. Colombia: McGraw – Hill, 2000. Pág. 355.
- [11] SIERRA G., Federico. Evaluación de la Pérdida de Calidad de la Semilla de Café Variedad Caturra Durante su Beneficio. Palmira, 1988, Pág. 114 Tesis: Ingeniero Agrícola. Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira. Departamento de Ingeniería Agrícola.
- [12] PTC. 8.2. Performance Test Code, Centrifugal Pumps. U.S.A. The American of Mechanical Engineers. 1965. 19 – 25 p.
- [13] Transporte hidráulico de sólidos. [en línea]. [citado en 2006-03-03]. Disponible en Internet: <http://www.Metalurgia.uda.cl/apuntes/ptapia/mecanica%20II/transporte%20hidraulico%20de%20sólidos.pdf>