

PREDICCIÓN TEÓRICA DEL CONSUMO DE POTENCIA Y DE LA TASA PROMEDIA DE CORTANTE APLICADA EN EL DESMUCILAGINADO MECÁNICO DEL CAFÉ

CARLOS E. OLIVEROS¹
SUNDARAM GUNASEKARAN²

RESUMEN

Se evaluó el desempeño de un desmucilagador mecánico desarrollado en el Centro Nacional de Investigaciones del Café CENICAFE. Se obtuvo modelos teóricos para estimar consumo de potencia y la tasa promedia de cortante aplicada («average shear rate») durante el proceso de desmucilagado en un prototipo desarrollado en CENICAFE (denominado modelo RMM-CENICAFE B). El campo de flujo generado por las barras rotatorias del desmucilagador fué asumido equivalente al originado por discos sumergidos en un medio fluido infinito. Se utilizó el enfoque fundamental propuesto por Kármán (1921) para resolver la ecuación de Navier-Stokes. Debido a la alta tasa de deformación aplicada por el agitador y a la naturaleza pseudoplástica de la suspensión (Oliveros, 1993) se asumió que ésta se comporta como un fluido Newtoniano. Valores de viscosidad aparente en el segundo «plateau» Newtoniano fueron obtenidos para cada tratamiento. Los modelos teóricos obtenidos predicen bien el consumo de potencia y la tasa promedia de cortante aplicada.

***Palabras clave:* Desmucilagado mecánico del café, predicción de potencia en desmucilagado, predicción de tasa de cortante promedia, agitación de suspensiones.**

1 Ph.D. Investigador Científico III. CENICAFE.

2 Ph.D. Profesor Asociado Universidad de Wisconsin-Madison.

ABSTRACT

THEORETICAL PREDICTION OF POWER CONSUMPTION AND AVERAGE SHEAR RATE APPLIED IN MECHANICAL DESMUCILAGING OF COFFEE BEANS.

Performance of a mechanical demucilaging machine developed at CENICAFE, Colombia, was evaluated. Theoretical models to estimate power consumption and average shear rate applied by rotating bars during the demucilaging process of depulped coffee beans (Colombia and Caturra varieties) using a prototype developed at CENICAFE (called MRM-CENICAFE B model) were derived from the flow motion analysis of rotating disks in an infinite medium (depulped coffee beans-mucilage suspensions). The fundamental approach proposed by Kármán (1921) to simplify the Navier-Stokes equations was used. At the high average shear rate values applied by the MRM-CENICAFE B, suspensions behave like a Newtonian fluid, due to the alignment of coffee beans with the tangential direction of the flow field. Therefore, theoretical analysis was performed assuming suspensions behaving as Newtonian fluids. An apparent viscosity for suspensions at the second Newtonian plateau was used for the predictions of power and average shear rate. Good agreement between theoretical and experimental values of power consumption and average shear rate was noted.

Key words: *Coffee mechanical demucilaging, power demucilaging prediction, average shear rate prediction, agitation of suspensions.*

INTRODUCCION

Las cerezas de café son material altamente perecible. Una vez cosechadas deben ser procesadas con el fin de obtener un material estable, de alta calidad, en condiciones ambientales naturales. El proceso de poscosecha utilizado para producir los denominados **café suaves** comprende las siguientes operaciones: **Despulpado** (para eliminar la capa mas externa del grano); **Fermentación** (para eliminar el mesocarpio o mucílago, una capa de aproximadamente 0.4 mm de espesor promedio, rica en pectinas y azúcares (ver Figura 1); **Secado** (para reducir el contenido de humedad desde 53% hasta 10-12% (base húmeda). El proceso de fermentación permite la obtención de café de alta calidad cuando es realizado bajo control. Sin embargo, frecuentemente se deja de exportar importantes cantidades de café debido a defectos de calidad en taza atribuibles a la sobrefermentación del café. La agitación mecánica del café ha sido utilizada para desprender el mucílago. Sin embargo, como fué señalado por Oliveros (1993) el consumo específico de potencia observado en los desmucilaginadores mecánicos utilizados actualmente es relativamente alto. Para

mejorar estas tecnologías, o para desarrollar nuevas con ventajas sobre las existentes, se requiere analizar el campo de flujo generado por los agitadores. Las propiedades reológicas de la suspensión café pergamino húmedo (C.P.H.)-mucílago son necesarias para este análisis.

Härröd (1986) presenta una revisión general de los modelos propuestos para predecir consumo de potencia en operaciones de mezclado. La mayoría de estos modelos están basados en relaciones analíticas o semi-analíticas entre el número de potencia, N_p , y el número de Reynolds, R_e (Nagata; Yanagimoto y Yokoyama, 1957; Chavan y Ulbrecht, 1972; Moo-Young; Tichar y Dullien, 1972; Trommelen y Beek, 1971b; Takahashi; Arai y Saito, 1982 and Toh y Murakami, 1982).

La tasa promedio de cortante aplicada (TPC), «average shear rate», g_{prom} , es uno de los parámetros considerados para el dimensionamiento de mezcladores partiendo de pequeños modelos evaluados en condiciones de laboratorio, «scale up», (Lindley, 1991). Metzner y Otto (1957) propusieron una metodología experimental para estimar la TPC (g_{prom}) aplicada por un agitador. Diversos autores (Metzner y Otto, 1957; Calderbank y Young, 1959 y Nagata; Yanagimoto y Yokoyama, 1957) han propuesto una relación lineal entre γ_{prom} y N (ecuación 1).

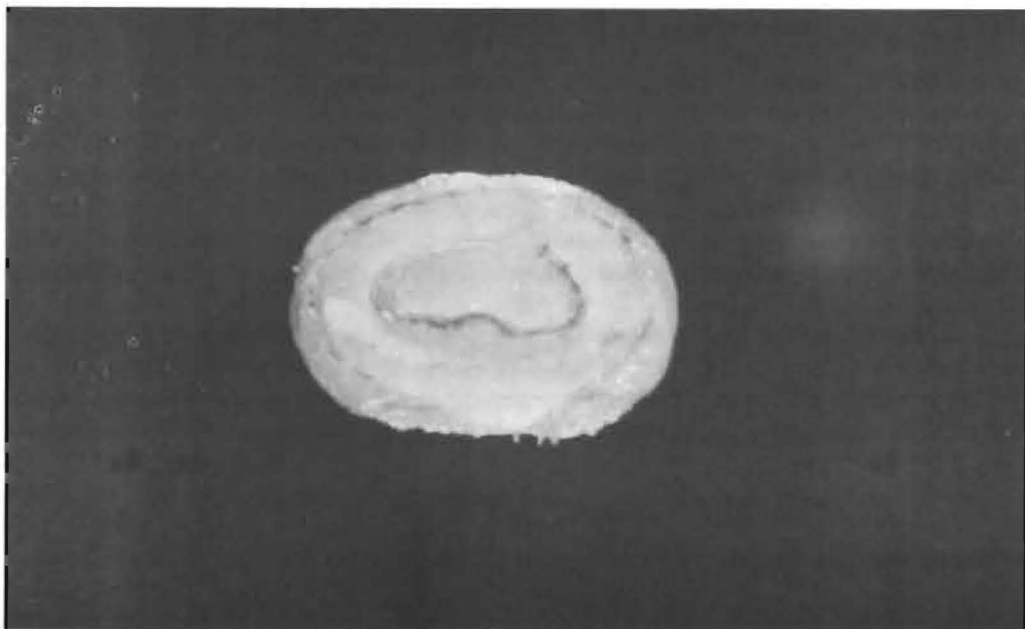


Figura 1. Café despulpado o en baba.

$$\dot{\gamma} = KN$$

Análisis del flujo de fluidos

En la Figura 2 se muestra un diagrama del agitador utilizado en el equipo RMM-CENICAFE modelo B, diseñado con base en el equipo ELMU utilizado en Centro América (Cleves, 1981). El agitador consiste de juegos de barras de bronce, cuatro barras de 9.53 mm de diámetro y 123 mm de longitud por juego, separadas 48 mm entre centros. El cilindro interior de 40.2 mm de radio externo fué adicionado para mejorar la eficacia de eliminación de mucilago y para reducir el daño mecánico en los granos de café.

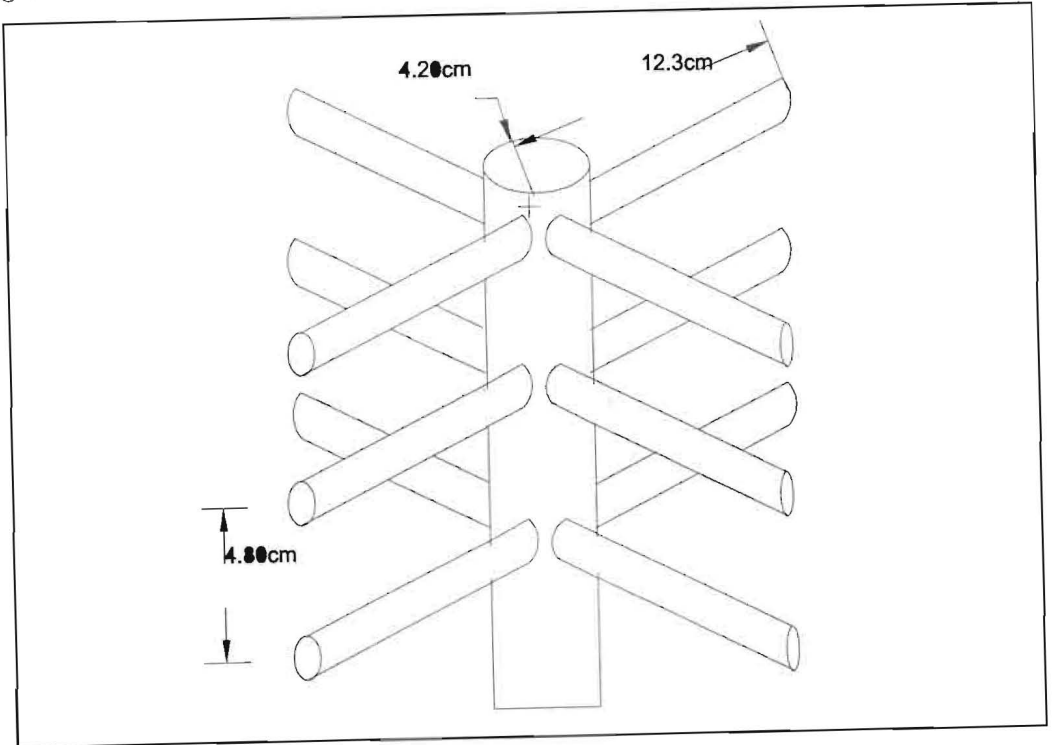


Figura 2. Agitador del desmucilagador MRM-CENICAFE modelo B

Análisis del flujo tipo Couette

La potencia requerida para mover el agitador del desmucilagador puede definirse como la potencia debida al flujo tipo Couette (PC) más la potencia requerida para rotar las barras (PD).

$$P = P^C + P^D \quad (2)$$

La expresión matemática para P^C puede obtenerse a partir del análisis del campo de flujo, asumiendo que las suspensiones café despulpado (CD)-mucílago siguen la ley de potencia (Oliveros, 1993). En las condiciones de flujo tipo Couette la ecuación de Navier-Stokes es significativamente simplificada aún tratándose de fluidos no-Newtonianos (Bird; Stewart y Lightfoot, 1960).

$$P^C = 2\pi KH R_i^2 \omega^{n+1} \left[\frac{2s R_o^{2s}}{R_o^{2s} - R_i^{2s}} \right]^n \quad (3)$$

Los parámetros reológicos K y n ($s = 1/n$) para suspensiones de CD-mucílago, variedades Caturra y Colombia, fueron obtenidas por Oliveros (1993). De acuerdo a lo observado por el autor, se necesita mayor potencia para agitar suspensiones de café pergamino que de café recién despulpado. La potencia debida al flujo tipo Couette, P^C es relativamente pequeña y comparada con valores experimentales de potencia durante el proceso de desmucilaginado puede ser descartada. Con base en este análisis se puede concluir que la potencia para mover el agitador de un desmucilaginator tipo RMM-CENICAFE es debida principalmente para rotar las barras.

Campo de flujo generado por la acción de las barras rotatorias

La mayor remoción de mucílago ocurre pocos segundos después de agitada la masa (Oliveros, 1993). Esta alta remoción de mucílago genera rápidamente una suspensión de CL-mucílago altamente viscosa. El desmucilaginator RMM-CENICAFE opera a relativamente alta velocidad (más de 300 rpm), y, como será posteriormente mostrado, produce una tasa de deformación alta. Bajo estas condiciones ($\gamma_{prom} > 100 \text{ s}^{-1}$) la suspensiones de CL ó CD - mucílago se comportan como fluidos Newtonianos (en el segundo «plateau» Newtoniano). La viscosidad aparente se estimó a 100 s^{-1} .

Los perfiles de velocidad generados por la acción de barras rotantes, con $d/D \approx 1$, son muy similares a los producidos por la rotación de discos en un medio infinito. Las condiciones de borde son similares: máxima velocidad tangencial en la superficie generada por las barras rotantes; velocidad axial asintótica y cero velocidad radial lejos de la acción de las barras debido al vanecimiento de la vorticidad (Sherman, 1990).

El análisis del flujo de fluidos inducido por las barras rotantes fué realizado asumiendo que cada conjunto de barras rotantes genera un campo de flujo equivalente al campo de flujo producido por la acción de discos rotando en un medio infinito. Adicionalmente, como se indicó anteriormente, debido a la geometría del sistema y a las condiciones de operación del equipo (alta tasa de deformación en cualquier parte del sistema) se asumió que las suspensiones se comportan como fluidos Newtonianos. Se utilizó el enfoque fundamental propuesto por Kàrmàn (1921) para la solución de la ecuación de Navier-Stokes y obtener el gradiente de velocidad tangencial en la

superficie de las barras rotantes ($\partial\omega/\partial z_{z=0}$). Conociendo este valor se puede estimar la potencia requerida para rotar cada conjunto de barras y la tasa promedio de cortante aplicada.

Se consideró el enfoque teórico propuesto por Sherman (1990) para la solución del estado transitorio. El conjunto de ecuaciones de balance de momentum en las direcciones radial, tangencial y axial y de continuidad para el caso de la rotación de un disco en condiciones transitorias obtenidas son, respectivamente³:

$$u'' + (1-\Gamma) \left(\frac{\xi u'}{2} - u \right) + \Gamma^2 w u - \Gamma^2 u^2 + v^2 = \Gamma(1-\tau)^2 u_{,\tau} \quad (4)$$

$$v'' + (1-\Gamma) \frac{\xi v'}{2} + \Gamma^2 w v' - 2\Gamma u v = \Gamma(1-\tau)^2 v_{,\tau} \quad (5)$$

$$w'' + (1-\Gamma) \left(\frac{\xi w'}{2} - \frac{3w}{2} \right) + \Gamma^2 w w' + \Gamma^2 u^2 = \Gamma(1-\tau)^2 w_{,\tau} \quad (6)$$

$$w - 2u = 0 \quad (7)$$

Con las siguientes condiciones de borde,

$$\begin{aligned} u(0,0) = 0v(0,0) = 0w(0,0) = 0 \\ u(6,1) = 0v(6,1) = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

Conforme se puede observar en las ecuaciones (4) a (7), la condición de estado estacionario se alcanzará cuando $\tau \rightarrow 1$. Bajo estas condiciones las ecuaciones (4) a (7) serán iguales al conjunto propuesto inicialmente por Kármán (1921). El dominio en este caso es $0 \leq \tau \leq 1$ y $0 \leq \xi \leq \xi_{\max}$ donde ξ_{\max} aunque no se puede anticipar su valor se asume igual a 6 (Sherman, 1990). Con valores de ξ_{\max} inferiores a 6 no se alcanza el valor asimptótico esperado, 0.887, (Landau y Lifshitz, 1987; Sherman, 1990).

3 $\Gamma = 1 - \exp(-\omega t)$

Se utilizó el enfoque propuesto por Sherman (1990) para el manejo de la no-linealidad y el acoplamiento del conjunto de ecuaciones (4) a (7). Se utilizó el enfoque explícito para trabajar el estado transitorio. Este enfoque es incondicionalmente estable y el grado de precisión depende del incremento de tiempo utilizado (Δt). Las primeras y segundas derivadas fueron aproximadas por medio del método de las diferencias finitas. El gradiente de velocidad tangencial se obtuvo por medio de la siguiente ecuación (9).

$$v'_{(t)} = \frac{v_2}{h} \tag{9}$$

Con base en las consideraciones citadas anteriormente, las ecuaciones (4) a (7) se pueden reemplazar por el siguiente conjunto de ecuaciones lineales, \Re es u' y S es v' . Para el momentum en la dirección radial,

$$u_{n-1} \left[\frac{1}{h^2} - \frac{\xi_n}{4h(1-\Gamma)} - \frac{\Gamma^2 w_n}{2h} \right] + u_n \left[-\frac{2}{h^2} - (1-\Gamma) - 2\Gamma^2 u_n - \Gamma(1-\tau)^2 RM \right] + \tag{10}$$

$$u_{n+1} \left[\frac{1}{h^2} + \frac{\xi_n(1-\Gamma)}{4h} + \frac{\Gamma^2 w_n^*}{2h} \right] + w_n R_n^* \Gamma^2 =$$

$$\left[-\Gamma(1-\tau)^2 RM u^*(\Gamma - \Delta\Gamma) + v_n^{*2} - \Gamma^2 (v_n^{*2} - R_n^* w_n^*) \right]$$

Para el momentum en la dirección tangencial,

$$u_{n-1} \left[\frac{1}{h^2} - \frac{\xi_n}{4h(1-\Gamma)} - \frac{\Gamma^2 w_n}{2h} \right] + u_n \left[-\frac{2}{h^2} - (1-\Gamma) - 2\Gamma^2 u_n - \Gamma(1-\tau)^2 RM \right] + \tag{11}$$

$$u_{n+1} \left[\frac{1}{h^2} + \frac{\xi_n(1-\Gamma)}{4h} + \frac{\Gamma^2 w_n^*}{2h} \right] + w_n R_n^* \Gamma^2 =$$

$$\left[-\Gamma(1-\tau)^2 RM u^*(\Gamma - \Delta\Gamma) + v_n^{*2} - \Gamma^2 (v_n^{*2} - R_n^* w_n^*) \right]$$

Para la ecuación de continuidad,

$$u_{n-1} + (-1)u_n + \left(\frac{1}{h}\right)w_n + \left(-\frac{1}{h}\right)w_n = 0 \quad (12)$$

Las ecuaciones (10) a (12) pueden ser representadas por la siguiente expresión lineal más general,

$$Ax_{n-1} + Bx_n + Cx_{n+1} = D \quad (13)$$

La matriz $\mathbf{A}_{(3 \times 3)}$, contiene los coeficientes de u_{n-1} , v_{n-1} , w_{n-1} , la matriz $\mathbf{B}_{(3 \times 3)}$ contiene los coeficientes de u_n , v_n , w_n , la matriz $\mathbf{C}_{(3 \times 3)}$ contiene los coeficientes de u_{n+1} , v_{n+1} , w_{n+1} y el vector columna \mathbf{D} los restantes términos en las ecuaciones (10) a (12). Se utilizó el programa de computador SPNDSK, citado por Sherman (1990), para resolver el conjunto de ecuaciones (10) a (12). Como fué citado anteriormente, se asumió un máximo valor de ξ igual a 6. Similares valores de u, v, w se obtuvieron dividiendo ξ_{\max} en 60 y 120 pasos. Tendencias similares se observaron para el caso del tiempo adimensional τ . El valor de $v'(z=0)$ para cada simulación se obtuvo usando la ecuación (9). Este valor es necesario para obtener el torque necesario para rotar el disco, como se indica en la ecuación (14),

$$M_z = 2 \int_{R_i}^{R_o} 2\pi r^2 \sigma_{z\theta} dr \quad (14)$$

La relación matemática entre potencia, torque, y velocidad angular, considerando ambos lados del disco, (P^D), obtenida fue,

$$P^D = 1.94 \rho_s (\omega^5 v_s)^{\frac{1}{2}} (R_o^4 - R_i^4) \quad (15)$$

Potencia requerida para mover el agitador

La potencia teórica requerida para agitar una suspensión de CD-mucilago en un RMM-CENICAFÉ-B puede ser estimada considerando la potencia requerida para rotar el cilindro interior (P^C) y la potencia requerida para rotar las capas delgadas de suspensión (P^D) generadas por la acción de las barras rotantes.

$$P = 2\pi K_s H R_i^2 \omega^{n+1} \left[\frac{2R_o^{2s}}{R_o^{2s} - R_i^{2s}} \right]^n \quad (16)$$

$$1.94 \rho_s (\omega^5 v_s)^{\frac{1}{2}} (R_o^4 - R_i^4) \left(\frac{H}{S_d} - 1 \right)$$

Tasa promedio de cortante

La tasa promedio de cortante es el criterio de escalonamiento (scale-up) a utilizar en el diseño de equipos tipo RMM-CENICAFE B. Se siguieron dos procedimientos para estimarla. Teóricamente, asumiendo que el proceso de desmucilaginado ocurre principalmente en la superficie del disco rotante, la capa de suspensión rotada por la acción de las barras. Considerando que el estado estacionario se alcanza rápidamente, como fué demostrado por Oliveros (1993), la tasa promedio de cortante en la superficie de la capa rotante puede obtenerse como $\partial v/\partial z|_{z=0}$ cuando $t \geq 1$.

$$L\gamma_{av} = \frac{\int_{Ri}^{Ro} \left(\frac{\omega^3 \rho}{\mu_a} \right)^{\frac{1}{2}} v'(z) r dr}{Ro \int_{Ri} dr} \quad (17)$$

En consecuencia, la tasa promedio de deformación se puede obtener por medio de la ecuación (18),

$$\dot{\gamma}_{av} = 0.309 \frac{\omega^3 \rho}{\mu_a} -^{\frac{1}{2}} (Ro + Ri) \quad (18)$$

MATERIALES Y MÉTODOS

Cinco frecuencias de rotación del agitador (5.45, 6.07, 7.67, 8.33 y 9.16 Hz) y un caudal de agua (1 L.min⁻¹) fueron aplicados. En los ensayos se utilizó café despulpado, *Coffea arabica*, variedades Caturra y Colombia. Se construyó un dispositivo experimental, Figura 3, para medir el consumo de potencia y la tasa promedio de cortante. El equipo consta de las siguientes partes:

- transductor de torque diseñado utilizando un transformador lineal diferencial variable (LVDT) con un rango máximo de 0.25 mm y una unidad electrónica DTR-451 fabricada por Schaevitz la cual suministra el voltaje requerido, 3 V AC, amplifica y demodula la señal proveniente del transformador. El LVDT se utilizó para medir el desplazamiento de una pequeña viga de acero en voladizo (38.51x6.78 mm de sección transversal y 107.6 mm de longitud) producido por la fuerza reactiva. El rango de la celda de carga del transductor fué 0 a 70 N con una precisión de 0.167 N (asumida equivalente al error standard de estimación de la carga) y la sensibilidad de 0.0774 mV/N. Se observó excelente correlación entre la carga aplicada y la medida ($r^2 = 0.999$) y relativo bajo desplazamiento de zero («zero shift», 0.03 N),

- computador, conectado a un «datalogger» Helios I con software Labtech Notebook, producido por la Fluke, para la adquisición y el procesamiento de datos,
- balanza electrónica Sartorius modelo 1264 MP, rango 0 a 3 kg y sensibilidad de 0.1 g, con convertidor digital/análogo Sartorius modelo 7087,
- bomba peristáltica marca Watson-Marlow modelo 502S/R con un máximo caudal de 1.820 L.min⁻¹ con tubo de 8 mm a 170 rpm,
- variador de frecuencia (0 a 70 Hz) y un motor de 4.8 HP.

Consumo de potencia

Se midió la potencia a las frecuencias de rotación citadas anteriormente utilizando el dispositivo de medición construido para este fin. Se utilizó una frecuencia de barrido de 1 s durante 90 s y 120 s de agitación. El tiempo de agitación se determinó considerando la frecuencia de agitación siendo máximo a la más baja frecuencia. La deflexión máxima en la viga en todos los experimentos fué significativamente inferior al límite elástico del material. Para cada tratamiento se obtuvo la relación potencia-tiempo.

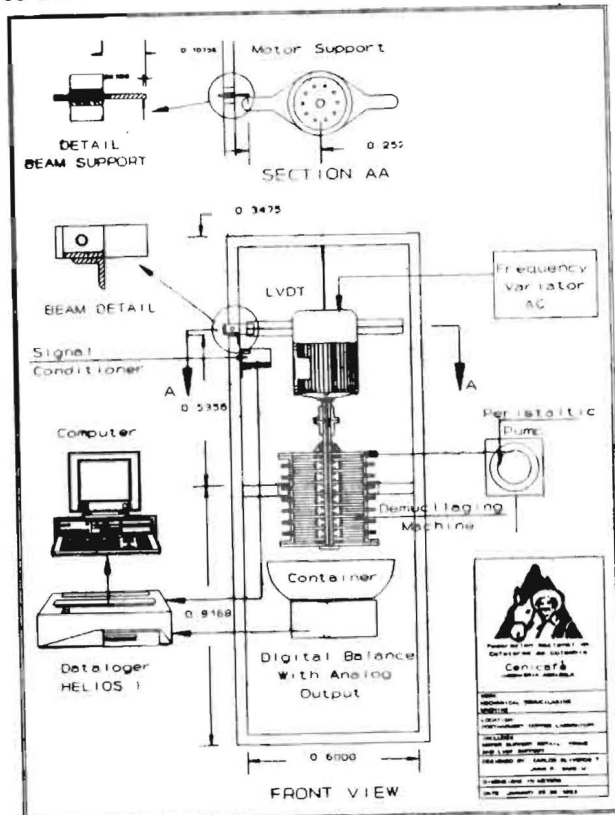


FIGURA 3. Dispositivo experimental

Tasa promedio de cortante (TPC)

Se asumió que el desprendimiento del mucílago se debe a la acción de los esfuerzos cortantes que ocurren en el plano de rotación de las barras. Se utilizaron dos procedimientos para estimar la TPC: **teóricamente**, utilizando la ecuación (18), y **experimentalmente**, siguiendo la metodología propuesta por Metzner y Otto (1957). La TPC y la frecuencia de rotación se pueden relacionar como se indica a continuación (Nagata, 1971),

$$\dot{\gamma}_{prom.} = K_N N \tag{19}$$

Donde K_N es una constante obtenida experimentalmente.

RESULTADOS

Consumo de potencia

En la Figura 4 se muestran datos experimentales de consumo de potencia durante el desmucilaginado. Cada valor corresponde al promedio de cinco ensayos. Como se espera, el consumo de potencia, CP, aumenta cuando la frecuencia aumenta. Los máximos valores de CP se obtuvieron al inicio de cada tratamiento. Esta respuesta podría deberse a la alta cantidad de mucílago desprendida en los primeros segundos de procesamiento⁴. Después de 10 s de procesamiento, cuando la mayor parte del mucílago ha sido retirado del sistema, la viscosidad del medio continuo (mucílago+agua adicionada) disminuye y el CP disminuye.

Durante la agitación de suspensiones altamente concentradas ocurren cambios frecuentes en la estructura y esto se refleja en su comportamiento reológico (Cheng, 1980). Las partículas tienden a alinearse con la dirección principal del campo de flujo reduciendo la viscosidad aparente de la suspensión (mecanismo que explica el comportamiento pseudoplástico y tixotrópico observado en suspensiones altamente concentradas). Los cambios en el consumo de potencia mostrados en la Figura 4 podrían ser atribuirse a los cambios frecuentes en la estructura de la suspensión durante el proceso de desmucilaginado.

4 La viscosidad del mucílago concentrado ($n_m = 0.23$ y $K_m = 30.1 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$) en los rangos de tasa de cortante trabajados es relativamente alta (Oliveros, 1993).

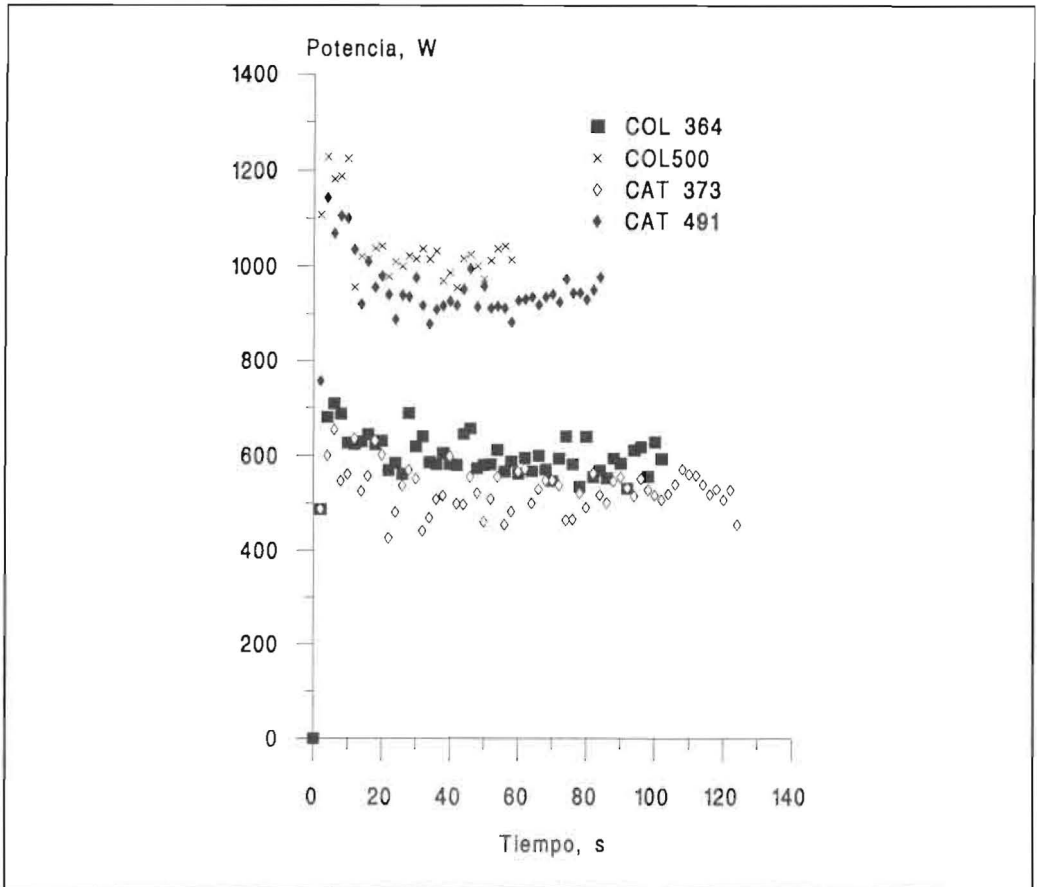


FIGURA 4. Consumo de potencia durante el proceso de desmucilaginado mecánico. Variedades Caturra y Colombia.

En la Figura 4 se observa que al inicio del proceso se requiere de mayor potencia con café variedad Colombia que con café Caturra. Este comportamiento podría deberse a que el café variedad Colombia pierde mucílago más fácilmente que el variedad Caturra, bajo similares condiciones de tasa de deformación promedio, generándose suspensiones con mayor viscosidad aparente (Oliveros, 1993).

Valores promedios experimentales de consumo de potencia, durante los primeros 10 s, son comparados en la Figura 5 con valores teóricos obtenidos utilizando la ecuación (16). Como puede observarse, el enfoque teórico asumido permite predecir el consumo de potencia durante el desmucilaginado mecánico con buena confiabilidad. La máxima diferencia entre valores experimentales y teóricos, obtenida a la mayor velocidad de agitación, fue inferior al 10%.

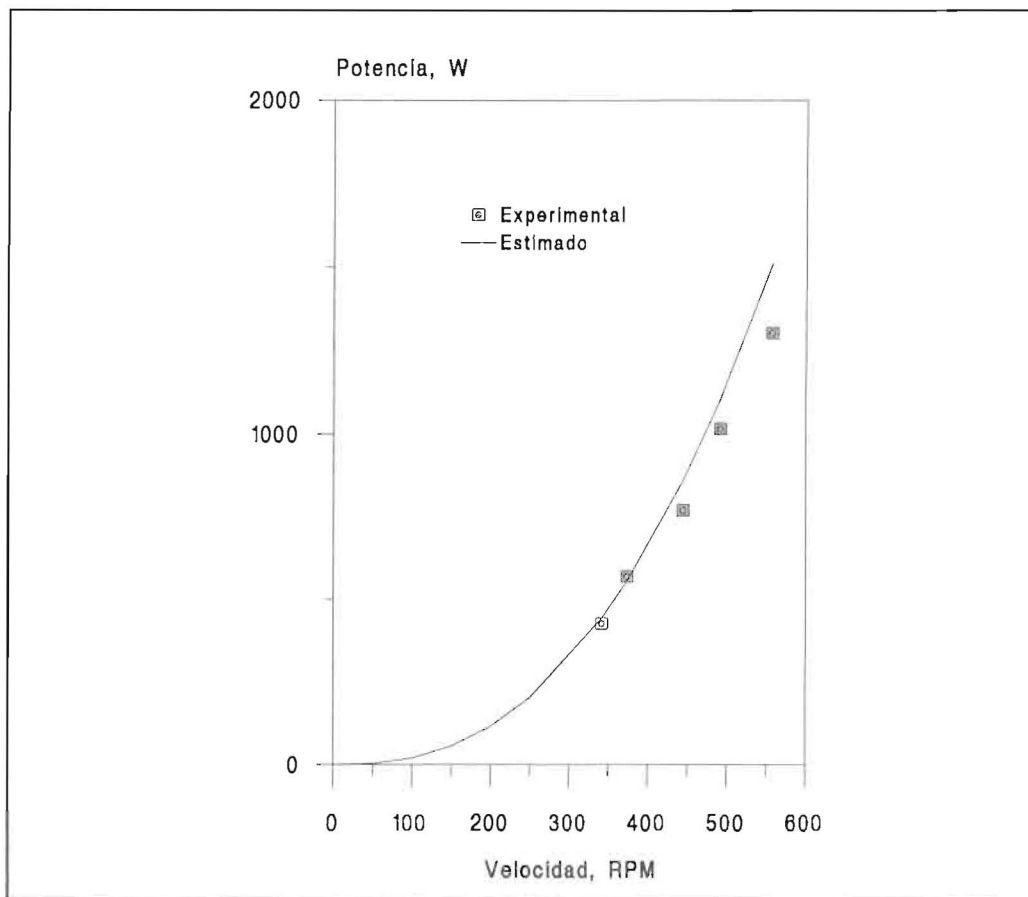


FIGURA 5. Valores experimentales y estimados de consumo de potencia. Café variedad Caturra.

Potencia requerida para agitar suspensiones de CL-Xanthan

Se midió el CP requerido para agitar suspensiones de café lavado (CL) - Xanthan (1% en peso) con concentraciones de café de 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 y 45% (v/v) y velocidades de rotación del agitador en el rango 150 a 1000 rpm. Los valores experimentales fueron comparados con valores obtenidos utilizando la ecuación (16). La viscosidad aparente de las suspensiones fué obtenida a un g_{prom} de $200 s^{-1}$. En la Figura 6 se muestran valores experimentales y teóricos correspondientes a suspensiones de 45% de concentración de partículas.

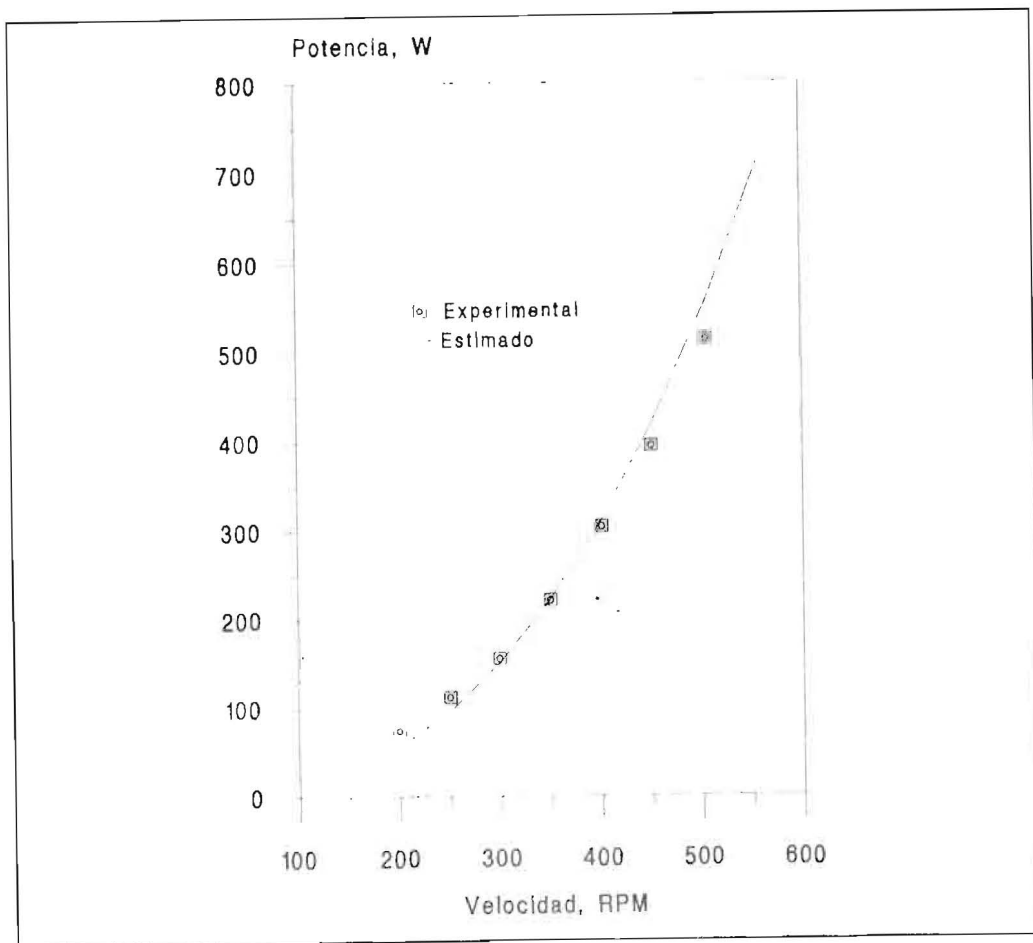


FIGURA 6. Valores experimentales y estimados de consumo de potencia requerida para agitar suspensiones de CL-Xanthan (1% en peso) a 45% de concentración.

Se utilizó el valor de viscosidad aparente, 0.84 Pa.s, reportado por Oliveros (1993). Como se puede observar en la Figura 6, el modelo teórico, ecuación (16), permite hacer excelentes predicciones del consumo de potencia requerido para agitar suspensiones de café - Xanthan (1%) con el dispositivo RMM-CENICAFE.

Tasa promedio de cortante (g_{prom}) aplicada

Se utilizó el procedimiento experimental propuesto por Metzner y Otto (1957) para agitadores en fluidos no-Newtonianos. Se utilizó un volumen de 2.5 l de un fluido Newtoniano, miel de mapple ($\mu = 0.0688$ Pa.s y densidad promedio $\rho = 1233$ kg.m³, medidas a temperatura ambiente).

Se obtuvo la siguiente correlación entre el número de potencia (N_{pfN}), donde fN corresponde al fluido Newtoniano, y el número de Reynolds (R_e), $r^2 = 0.993$.

$$N_{pfN} = 2239.64 R_e^{-0.97} \tag{20}$$

Se obtuvo el número de potencia para el RMM-CENICAFE a diferentes velocidades de rotación utilizando café variedad Colombia (COL44-100D). A partir de cada valor de $(N_p)_{CD}$ se obtuvo el correspondiente valor de R_e . La TPC se obtuvo matemáticamente igualando los esfuerzos cortantes en fluidos Newtonianos y no-Newtonianos.

$$\tau_{jN} = \mu \dot{\gamma} = K_s [\dot{\gamma}_{prom}]^{n_s} \tag{21}$$

O en la siguiente forma explícita,

$$\dot{\gamma}_{prom} = \left(\frac{\mu}{K_s} \right)^{\frac{1}{n_s}} \tag{22}$$

Tabla 1. Número de potencia (N_p) para el RMM-CENICAFE. COL44-100D.

N(RPS)	N_p
4.20	2.05
5.40	1.00
5.92	0.86
7.69	0.58
8.61	0.50

La tasa promedio de deformación aplicada por el RMM-CENICAFE con suspensiones COL 44-100D fué obtenida. Estos valores y los de frecuencia fueron ajustados por medio de un análisis de regresión lineal ($r^2 = 0.91$).

$$\dot{\gamma}_{prom} = 97.99N - 115.9 \tag{23}$$

En la Figura 7 se muestran datos experimentales y teóricos de la tasa promedio de cortante aplicada por el RMM-CENICAFE B con suspensiones de COL 44-100D, obtenidos utilizando la ecuación (18). En general, se observa que el modelo teórico predice bien la TPC aplicada.

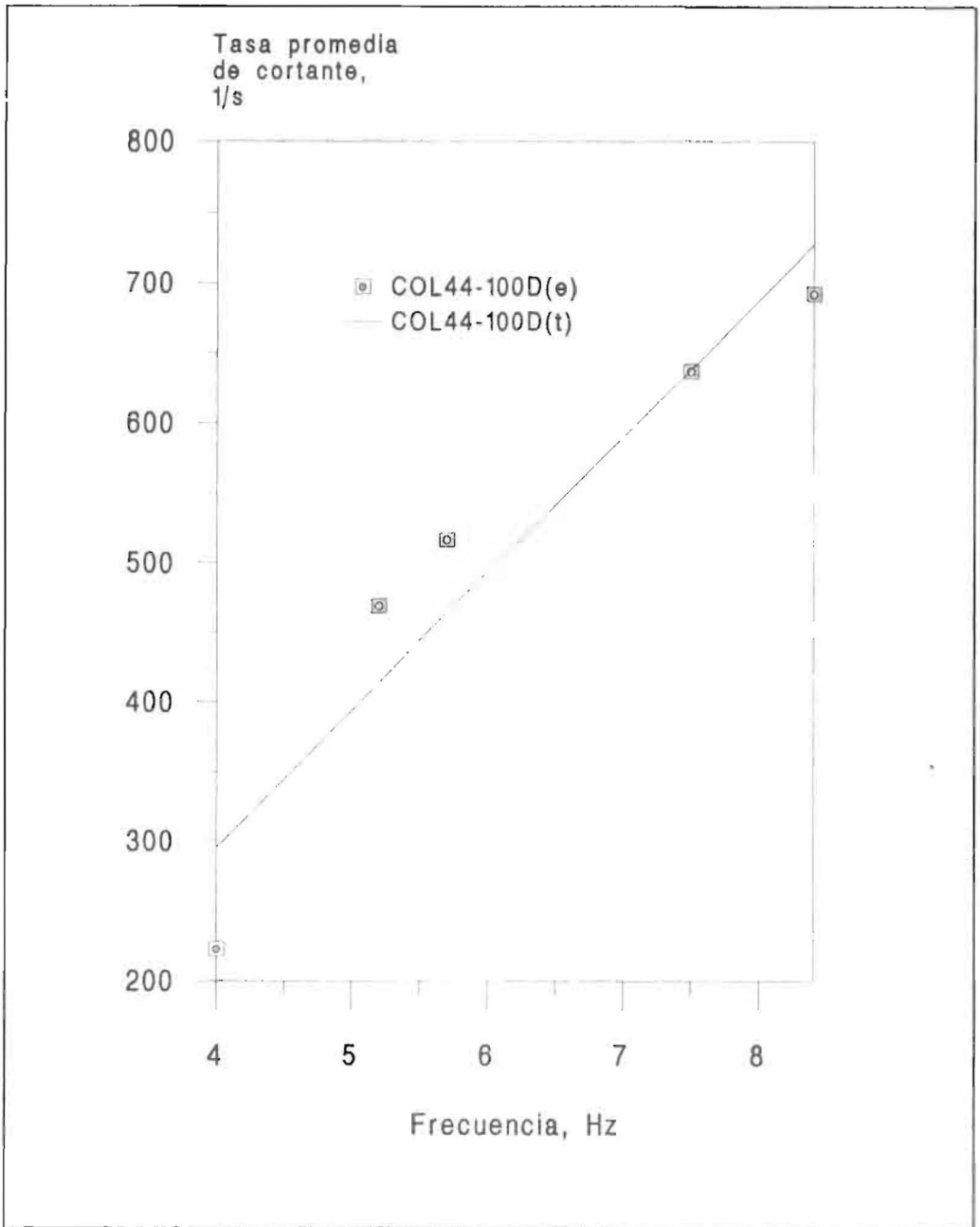


FIGURA 7. Valores experimentales (e) y teóricos (t) de la TPC aplicada ($\dot{\gamma}_{prom}$)

Resumen

LISTA DE SIMBOLOS

A,B,C	Matriz (3x3)
A,a	constantes
D	Matriz (1x3)
D	Diámetro, m
D _i	Diámetro del cilindro rotante, m
D _o	Diámetro de la pared interior del cilindro estacionario, m
H	Altura de la capa de café despulpado, m
h	Incremento discreto de altura, m
K	Índice de consistencia, Pa.s ⁿ
K _m	Índice de consistencia del mucílago, Pa.s ⁿ
K _N	Constante
L _t	Longitud del tubo, m
M _z	Momento alrededor del eje z, N.m
N	Frecuencia, or rps
N _P	Número de potencia, P/(D ⁵ N ³ r)
n	Índice de flujo
n _m	Índice de flujo del mucílago
n _s	Índice de flujo de la suspensión
P	Potencia, W
P ^C	Potencia debida a flujo Couette, W
P ^D	Potencia para rotar el disco, W
Q	Caudal, m ³ s ⁻¹
R	Radio, m
R _i	Radio interno, m
R _o	Radio externo, m
r	Posición radial, m
S	Cualquier variable o su derivada
T	Torque, N.m
Ta	Número de Taylor, $(2\pi N)^2(D_o - D_i)^3 D_i^2 / (8\nu^2(D_o + D_i))$
Ta _{cri}	Número de Taylor crítico
u	Velocidad radial escalada
u*	Velocidad radial, m.s ⁻¹
v	Velocidad tangencial escalada, m.s ⁻¹
v*	Velocidad tangencial, m.s ⁻¹
w	Velocidad axial escalada
w*	Velocidad axial, m.s ⁻¹
Γ	1 - exp(-ωt)
γ	Tasa de deformación (shear rate), s ⁻¹
γ _{ave}	Tasa promedio de deformación, s ⁻¹
γ _w	Tasa de deformación en la pared, s ⁻¹
Δt	Incremento de tiempo, s
δ	Longitud característica (ν/ω) ^{1/2} , m
λ	Factor de dependencia de tiempo

κ	Factor de congestionamiento
η_s	Viscosidad de la suspensión, Pa.s
ρ_s	Densidad de la suspensión, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
μ_a	Viscosidad Newtoniana aparente de la suspensión, Pa.s
τ	Tiempo, adimensional
ν	Viscosidad cinemática, $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$
ν_s	Viscosidad cinemática de la suspensión, $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$
ω	Velocidad angular, $\text{radianes}\cdot\text{s}^{-1}$
\mathfrak{N}	Cualquier variable o su derivada

Descripción de abreviaciones usadas en el texto o en leyendas de figuras

CD	Café despulpado
L	Café lavado
CAT	Variedad Caturra
COL	Variedad Colombia
CC	Concentración, % v/v
fN	Fluido Newtoniano
RMM	Removedor mecánico de mucílago
PT	Tiempo posterior a la cosecha, h
CCM	Contenido de cereza madura, %
TPC	Tasa promedia de cortante, 1/s

BIBLIOGRAFIA

- BIRD, R.B., Stewart, and LIGHTFOOT, E.N. Transport phenomena. New York: John Wiley, 1960. 780 p.
- CALDERBANK, P.H. and MOO B., Young. The prediction of power consumption in the agitation of non-Newtonian fluids. En: Transactions of the Institute of Chemical Engineers. Vol. 37 (1959); p. 26-33. p. 26-33.
- CLEVES, S.R. El beneficio del café. En: Noticiero del café. Vol. 17, No. 200 (1981); p. 3-4.
- CROSS, M.M. and KAYE, A. Techniques for the viscometry and suspensions. En: Polymer Engineering and Science. Vol. 26, No. 2 (1986); p.121-126.
- CHASE, W.C., DONATELLI, A.A. and WALKINSHAW, J. Effects of freeness and consistency of hardwood and softwood pulp suspensions. En: Tappi Journal. (may., 1989); p. 199-204.

- CHAVAN, V.V. and ULBRECHT, J. Power correlation for helical ribbon impellers in inelastic non-Newtonian fluids. En: *Chemical Engineering Journal*. No. 3 (1972); p.9-11.
- CHENG, D.C.H. Further observations on the rheological behavior of dense suspensions. En: *Powder Technology*. Vol. 37 (1984); p.255-273.
- HÄRRÖD, M. Scraped surface heat exchangers. En: *Journal of Food Process Engineering*. Vol. 9 (1986); p. 1-62.
- HOOGENDOORN, C.J. and DEN HARTOG, A.P. Model studies on mixers in the viscous flow region. En: *Chemical Engineering Science*. Vol. 22 (1967); p. 1689-1699.
- KARMAN, T. Von. Über laminare and turbulente reibung. En: *Zeitschrift fuer Angewandte Mathematike un Mechanik*. No. 1 (1921); p. 233-252.
- LANDAU, L.D. and LIFSHITZ, E.M. *Fluid mechanics*. New York: Pergamon Press, 1987. p. 539.
- LINDLEY, J.A. Mixing processes for agricultural and food materials. Part 2, Highly viscous liquids and cohesive materials. En: *Journal of Agricultural Engineering Research*. Vol. 48 (1991); p.229-247.
- METZNER, A.B. and OTTO, R.E. Agitation of non-Newtonian Fluids. En: *AICHE Journal*. Vol.3 (1957); p.3-10.
- MOO-YOUNG, M.; TICHAR, K. and DULLIEN, F.A.L. The blending efficiencies of some impellers in batch mixing. En: *AICHE Journal*. Vol. 18 (1972); p.178-182.
- MOONEY, M. The viscosity of a concentrated suspension of spherical particles. En: *Journal of Colloid Science*. No. 6 (1951); p.162-170.
- NAGATA, S., YANAGIMOTO, T. and YOKOYAMA, T. A study on the mixing of high-viscosity liquid. En: *Kagaku Kogaku*. Vol. 21 (1957); p.278-286.
- NIENOW, A.W.; EDWARDS, M.F. and HARNBY, N. *Introduction to mixing problems*. London: Butterworths, 1985. p. 1-22.
- OLIVEROS, C.E. Analysis of mechanical demucilaging of depulped coffee beans. 1993. Thesis (Ph.D.). University of Wisconsin-Madison.

- RUHSTON, J.H.; COSTICH, E.W. and EVERETT, H.J. Power characteristics of mixing impellers. En: Chemical Engineering Progress. Vol. 8 (1950); p.395-404; Vol. 9 (1950); p. 467-476.
- SHERMAN, F.S. Viscous flow. New York: MacGraw Hill publisher, 1990. p.
- TAKAHASHI, K., ARAI, K. and SAITO, S. Effects of geometrical variables of helical ribbon impellers on mixing of highly viscous Newtonian liquids. En: J. of Chem. Eng.of Japan Vol. 15 (1982); p.77-79.
- TOH, M. and MURAKAMI, Y. Effecto of scraping angle, or thichness or tip angle of blades on power consumption of a fluid-loaded hinged scraper blade. En: Journal of Chemical Engineering of Japan. Vol. 15 (1982); p. 242-244.
- TROMMELEN, A.M. and BEEK, W.J. The mechanism of power consumption in a votator-type scraped-surface heat exchanger. En: Chemical Engineering Science. Vol. 26 (1971); p. 1977-1986.