

METODOLOGIA PARA EL ESCALAMIENTO DE AGITADORES MECANICOS UTILIZADOS EN PROCESOS CON FLUIDOS NO-NEWTONIANOS

Carlos E. Oliveros T.¹, Fernando Alvarez M.², Esther C. Montoya R.³

RESUMEN

Se determinó experimentalmente la tasa promedio de cortante (TCP) generada por dos rotores utilizados para el desmucilaginado mecánico del café en Colombia: El CENICAFE III y El COLMECANO. Los valores experimentales de TCP fueron comparados con datos estimados con un modelo teórico obtenido asumiendo que el campo de flujo generado por el rotor se asemeja al flujo tipo Couette (TCP^c) y un modelo propuesto por Oliveros (1993,1995). Se utilizó la prueba de χ^2 (con 5% de significancia) para comparar los valores experimentales y teóricos y se observó que hay diferencias entre ellos. A partir del modelo TCP^c se obtuvo una expresión semi-teórica para estimar la TCP generada por el rotor COLMECANO con alta confiabilidad ($r^2 = 0,982$). A una misma velocidad de rotación el agitador COLMECANO genera mayores valores de TCP que el rotor CENICAFE III, luego debe generar mayores tasas de desmucilaginado.

La potencia requerida para agitar suspensiones de café en baba-mucilago+agua adicionada (1 L/kg de cps), en el rango de 300 a 1.200 rpm, utilizando los rotores CENICAFE III y COLMECANO, fué medida experimentalmente y estimada teóricamente con dos modelos: el modelo propuesto por Oliveros (1993,1995) y un modelo obtenido asumiendo que el campo de flujo generado por los rotores es del tipo

¹ Investigador Científico III. Ingeniería Agrícola, Centro Nacional de Investigaciones de Café, CENICAFE, Chinchiná, Caldas, Colombia.

² Profesor Asociado. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Apartado 1779.

³ Investigador Científico I. Biometría, Centro Nacional de Investigaciones de Café, CENICAFE, Chinchiná, Caldas, Colombia.

Couette (modelo P^c). Los valores experimentales y estimados fueron comparados por medio de la prueba de χ^2 (al 5% de significancia) observándose diferencias entre ellos. Mediante un análisis de regresión lineal simple aplicado a los valores obtenidos con el modelo P^c se obtuvo una expresión semi-teórica la cual permite estimar con alta confiabilidad la potencia para agitar las suspensiones de café en baba-mucilago+agua ($r^2 = 0,982$) con el rotor COLMECANO. A una misma velocidad de rotación, el rotor COLMECANO requiere menos potencia que el CENICAFE III para agitar suspensiones de café en baba-mucilago+agua (1 litro de agua/kg de cps).

*Se utilizó el concepto del valor Co del proceso de desmucilaginado mecánico como criterio de escalamiento, propuesto por Oliveros (1993), en el cual se establece que el producto TCP*t (t es el tiempo de tratamiento) es un parámetro adimensional relacionado con el porcentaje de remoción de mucilago (para remover el 95% del mucilago en café variedad Colombia el valor Co es 11.595). Con base en este criterio y las expresiones para estimar la TCP y la potencia se escaló el agitador COLMECANO para 600, 1.000 y 2.000 kg de cereza/h, operando por tandas. La potencia teórica para operar en forma continua se estimó adaptando para desmucilagadores el modelo propuesto por Bruin et al (1978) para extrusores. La potencia a instalar en los equipos para las diferentes capacidades se obtuvo considerando las pérdidas por disipación viscosa (13%) y en la transmisión de potencia (10%). La metodología propuesta en este estudio para el escalamiento de los agitadores COLMECANO permite dimensionar los desmucilagadores, definir las condiciones de operación para obtener un rendimiento específico y estimar la potencia requerida con buena confiabilidad.*

Palabras clave: desmucilaginado, escalamiento, reología, café, potencia, tasa cortante promedia

ABSTRACT

Scaling procedure for mechanical agitators used in operations with non-newtonian fluids.

Average shear rate (TCP) generated by two rotators used in demucilaging of pulped coffee beans in Colombia (CENICAFE III and COLMECANO) was measured. Theoretical values of TCP were estimated by means of a model obtained assuming the flow field generated by the agitators behaving such as Couette flow and a theoretical model proposed by Oliveros (1993,1995). Experimental and predicted TCP data were compared using a χ^2 test (5% of significance). Differences between theoretical and experimental values were observed. Based on the TCP^c model a semi-theoretical expression for the COLMECANO agitator was derived ($r^2 = 0,982$). At the same speed of rotation and water consumption COLMECANO generates more TCP than CENICAFE III agitator.

Power required in demucilaging of pulped coffee beans required by COLMECANO and CENICAFE III agitators in the range of speed of rotation from 300 to 1.200 rpm was measured. Power consumption values were also predicted using a model developed assuming flow field generated behaving such as Couette flow in a wide gap (P^C model) and a theoretical model proposed by Oliveros (1993, 1995). Experimental and predicted power consumption values were compared by means of a χ^2 test (5% of significance). Differences between experimental and theoretical values of power were observed. Based on the P^C model a semi-theoretical expression for the COLMECANO agitator was derived. At the same speed of rotation and water consumption less power is required to rotate COLMECANO than CENICAFE III agitator.

Taking into account the «Co» value for demucilaging of pulped coffee beans of Colombia variety (11.595), proposed by Oliveros (1993), and semi-theoretical expressions for TCP and power consumption scaling of the COLMECANO agitator, operating in batch form for capacities of 600, 1.000 and 2.000 kg of coffee cherries/h was performed. Power required to operate in continuous form (P^{CF}) was estimated after adapting the model proposed for extruders by Bruin et al. (1978). Total power to operate demucilaging machinery (DESLIM models) was estimated adding losses due to viscous dissipation (13%) and power transmission (10%).

Theoretical and experimental procedure proposed in this paper can be used for scaling purpose of demucilaging machinery.

Key-words: demucilaging, scaling, rheology, coffee, power, average shear rate

INTRODUCCION

El desmucilaginado mecánico es una alternativa tecnológica que permite obtener ventajas sobre el método tradicional de la fermentación natural del mucílago, tales como:

- mayor control del proceso. El café cereza se procesa el mismo día del recibo, con lo cual se evitan los riesgos que se presentan en el proceso convencional,
- incremento en la relación cereza/seco por la recuperación de granos que por su tamaño, por carecer de suficiente mucílago (granos con

mancha de hierro, granos secos, etc) ó por mal ajuste de las despulpadoras no son despulpados y en el proceso convencional hacen parte de las guayabas y medias caras y posteriormente son retirados en el canal de correteo o el canal semi-sumergido, lo cual implica pérdidas económicas, altos consumos de agua y mano de obra adicional,

- manejo de la contaminación generada por el beneficio húmedo del café (BHC). En el BHC, realizado con despulpado en seco y transporte no-hidráulico de la

pulpa, el consumo específico de agua promedio es muy superior a 10,0 L/kg de cps. No se dispone actualmente de tecnología que permita manejar los efluentes líquidos resultantes, altamente diluïdos, y que simultáneamente genere ingresos adicionales. El proceso de BHC con la utilización del desmucilagador mecánico con los equipos DESLIM 600, DESLIM 1.000 y DESLIM 3.000, denominados inicialmente El Granjero en lugar de DESLIM (Oliveros, 1995), permite retirar el mucílago y lavar el café con consumos de agua inferiores a 1,0 L/kg de cps con lo cual se obtiene un mucílago altamente viscoso el cual al mezclarse con la pulpa (con un tornillo sinfin) se retiene en más del 50% lo que permite manejar más del 80% de la contaminación generada por el BHC. Adicionalmente, de acuerdo a lo referido en el párrafo anterior, el BHC con desmucilagador mecánico permite obtener ingresos adicionales (ingresos marginales) lo cual facilita la adopción del beneficio ecológico por los caficultores colombianos,

- reducción en los costos de la infraestructura requerida para el BHC. Los equipos DESLIM en las versiones 600, 1.000 y 3.000, con o sin zaranda antes del desmucilagador, son construídos actualmente por más de 12 firmas

en Colombia a precios relativamente bajos. Debido a lo compacto de su diseño los equipos pueden ser instalados sobre remolques, equipos móviles, y ser utilizados en diferentes puntos de recibo en las fincas ó llevados de un lugar a otro, lo cual podría dar origen, en un futuro cercano, a reducciones adicionales en los tamaños de los beneficiaderos y a la creación de empresas eficientes de servicios para el beneficio húmedo del café.

No se dispone actualmente de herramientas científicas para el diseño de los desmucilagadores utilizados en café. El objetivo de este trabajo fué desarrollar una metodología teórica-experimental aplicable al escalamiento de rotores utilizados en el desmucilagador mecánico del café (CENICAFÉ III y COLMECANO) y de equipos de agitación en general (mezcladores, por ejemplo). Adicionalmente, se presentan y comparan resultados teóricos y experimentales obtenidos en el escalamiento de desmucilagadores con rotor COLMECANO con capacidades de 600, 1.000 y 3.000 kg de cereza/h.

REVISION DE LITERATURA

Härröd (1986) presenta una revisión general de los modelos propuestos para estimar el consumo de potencia en operaciones de mezclado. La mayoría de ellos están

basados en relaciones analíticas o semi-analíticas entre el número de potencia, N_p , y el número de Reynolds Re (3,5,7,9,15,17,18).

Basado en la ecuación general de movimiento de Navier-Stokes, Oliveros (1993,1995) obtuvo una expresión teórica de potencia (ecuación 1) para el agitador del desmucilagador modelo CENICAFE B. Valores teóricos y experimentales fueron comparados (ver Figura 1) observando excelente predicción del modelo (desvío absoluto inferior al 10%).

$$P_D = 1.94 \rho_s (\omega^5 \nu_s)^{\frac{1}{2}} (R_o^4 - R_i^4) \quad (1)$$

Una expresión semiteórica para estimar la potencia en un agitador cilíndrico con barras soldadas a su superficie, válida cuando el número de Taylor (Ta)⁴ es inferior al Ta_{critico} , es citada por Härröd (1986).

$$P = \frac{4\pi^3 \left[\frac{\phi_r}{\phi_t} \right]^2}{\left[1 - \left[\frac{\phi_r}{\phi_t} \right]^2 \right] Re} \rho N^3 d_k^4 l + 251 (N \phi_t)^{1.79} n^{0.68} \mu_a^{0.68} (\phi_t - \phi_r)^{-0.31} l \quad (3)$$

$$^4 Ta = \frac{1}{2} Re^2 n^2 (d_i - d_s)^3 d_s^2 (d_i + d_s) d_i^4 \quad (2)$$

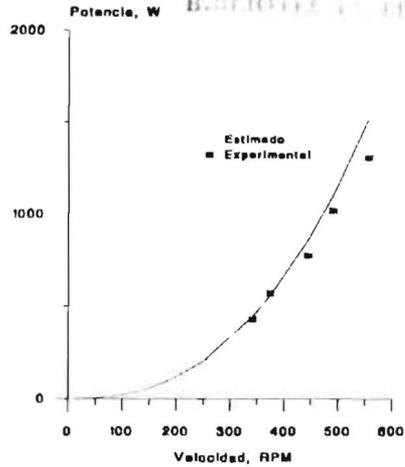


FIGURA 1. Valores experimentales y teóricos (ecuación 1) obtenidos con el desmucilagador CENICAFE B

El primer término del lado derecho de la ecuación (3) estima la potencia para mantener el flujo tipo Couette. El segundo término, válido en el rango de Re 20-2.300 y viscosidad aparente de 0,1-1,5 Pa.s, permite la estimación de la potencia requerida para rotar las barras soldadas al cilindro rotante.

La tasa promedio de cortante aplicada «average shear rate», $\dot{\gamma}_{prom}$ ó TCP, es uno de los parámetros considerados para el escalamiento de mezcladores «scale-up» (Lindley, 1991). Metzner y Otto (1957) proponen una metodología experimental para estimar la tasa

promedia de cortante aplicada por un agitador. Diversos autores (Calderbank, 1959 y Metzner y Otto, 1957) han propuesto una relación lineal entre $\dot{\gamma}_{prom}$ y la velocidad de rotación de un agitador (ecuación 4).

$$\dot{\gamma}_{prom} = KN \quad (4)$$

Partiendo de la ecuación general de movimiento de Navier-Stokes, Oliveros (1993,1995) obtuvo una expresión fundamental de $\dot{\gamma}_{prom}$ para un agitador de múltiples paletas (modelo CENICAFE B, ver ecuación 5). Los valores teóricos fueron comparados con datos experimentales obtenidos siguiendo la metodología propuesta por Metzner y Otto (1957)

observándose un desvío absoluto máximo del 10% en el rango de velocidad de rotación considerado (300 a 600 RPM).

$$\dot{\gamma}_{prom} = 0.309 \left[\frac{\omega^3 \rho}{\mu_a} \right]^{\frac{1}{2}} (R_o + R_i) \quad (5)$$

Chavan y Ulbrecht (1972) proponen una expresión teórica para estimar la $\dot{\gamma}_{prom}$ generada por una cinta helicoidal de diámetro ϕ_r y ancho w , rotando a una frecuencia N en un tanque de diámetro ϕ_t con fluidos inelásticos no-Newtonianos.

$$\dot{\gamma}_{prom} = \frac{\int_{\frac{\phi_t}{2}}^{\frac{\phi_r}{2}} \dot{\gamma} dr}{\int_{\frac{\phi_t}{2}}^{\frac{\phi_r}{2}} dr} \quad (6)$$

En la ecuación (6) $\dot{\gamma}_i = [1-2(w/\phi_r)] \dot{\gamma}_r$. Para $\dot{\gamma}$ proponen la siguiente expresión.

$$\dot{\gamma} = \frac{2\pi N r}{\frac{\phi_t}{2} - r} \quad (7)$$

MATERIALES Y METODOS

Los ensayos fueron realizados en el Centro Nacional de Investigaciones de Café (CENICAFE) en Chinchiná (Caldas). Con base en los resultados obtenidos por Oliveros (1993) no se

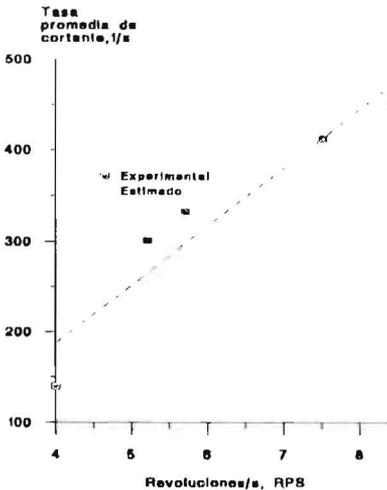


FIGURA 2. Valores teóricos y experimentales de $\dot{\gamma}_{prom}$

consideró el posible efecto de la variedad de café en la tasa cortante promedio ni en el consumo específico de potencia. Se utilizó café cereza variedad Colombia, proveniente de la subestación de Naranjal. A cada lote de café en cereza le fueron retirados los flotes sumergiéndolo en agua. A partir de este material se obtuvo la muestra de café en baba a utilizar en cada ensayo, 8 kg.

Potencia. Se midió la potencia requerida para agitar suspensiones de café en baba-agua + mucílago (1 litro de agua/kg de cps) en ocho velocidades de rotación en el rango de 600 a 1.300 RPM con los rotores CENICAFE III y COLMECANO. Se realizaron 8 repeticiones en cada velocidad de rotación. Se utilizó un rotor CENICAFE III de 17,7 cm de diámetro con 4 hileras de barras de bronce de 9,53 cm de diámetro, 10 barras/hilera, colocadas en forma alterna (ver Figura 3). El rotor COLMECANO utilizado consta de 10 discos de aluminio de 13,5 cm de diámetro externo con 8 álabes (ó dedos) de 2,5 cm de longitud (ver Figura 4).

El dispositivo experimental utilizado en la medición de potencia a las velocidades de rotación indicadas anteriormente es similar al empleado por Oliveros (1993,1995); consta de los siguientes elementos:

- un sistema de medición de torque

(SMT) compuesto por: un transformador lineal diferencial variable (LVDT) modelo MHR 005, sensibilidad 316,2 mV/mm, rango de $\pm 0,125$ mm; un acondicionador de señales marca Shaevitz®, el cual genera los 3,0 VAC a 2.500 Hz para el LVDT y además recibe, amplifica y demodula (convierte a VDC) la señal proveniente del transformador (el LVDT se utilizó para medir la deformación del extremo libre de una pequeña viga de acero colocada en voladizo de 70 mm de longitud y sección de 6,2x25,0 mm, ocasionada por el torque resistivo); un multímetro digital marca Leader, referencia LDM-851, con sensibilidad de 1 mV, para leer la señal proveniente del acondicionador (VDCout),

- un variador de frecuencia con rango 0 a 70 Hz,

- un cilindro de acrílico de 38 cm de diámetro y 45 cm de altura (ó cámara de desmucilaginado) en el interior del cual se agitan las suspensiones café en baba-agua + mucílago,

- un motor eléctrico de 3,53 kW (4,8 HP),

- estructura metálica para soportar los elementos citados anteriormente.

Se asumió que a las velocidades

de rotación establecidas los agitadores CENICAFE III y COLMECANO generan un campo de flujo similar al originado por discos sumergidos en un fluido infinito. Los valores experimentales de potencia se compararon con las predicciones teóricas obtenidas con las ecuaciones (1) y (3).

Tasa promedio de cortante aplicada. ($\dot{\gamma}_{prom}$ ó TCP). Se utilizó la metodología siguiente, propuesta por Metzner y Otto (1957) empleando un fluido Newtoniano de viscosidad conocida:

Para cada agitador, se obtuvo el

número de potencia, N_p ($P/\rho D^5 N^3$), en función del número de Reynolds, R_c ($ND^2\rho/\mu_a$), en el rango de 600 a 1.300 RPM, utilizando un fluido Newtoniano.

Se determinó el número de potencia para las suspensiones café en baba-agua+mucílago a las velocidades de rotación mencionadas.

Con los valores obtenidos anteriormente se calcularon los correspondientes valores de número de Reynolds.

Para cada valor de R_c se obtuvo la viscosidad aparente (μ_a) a partir de la siguiente expresión:

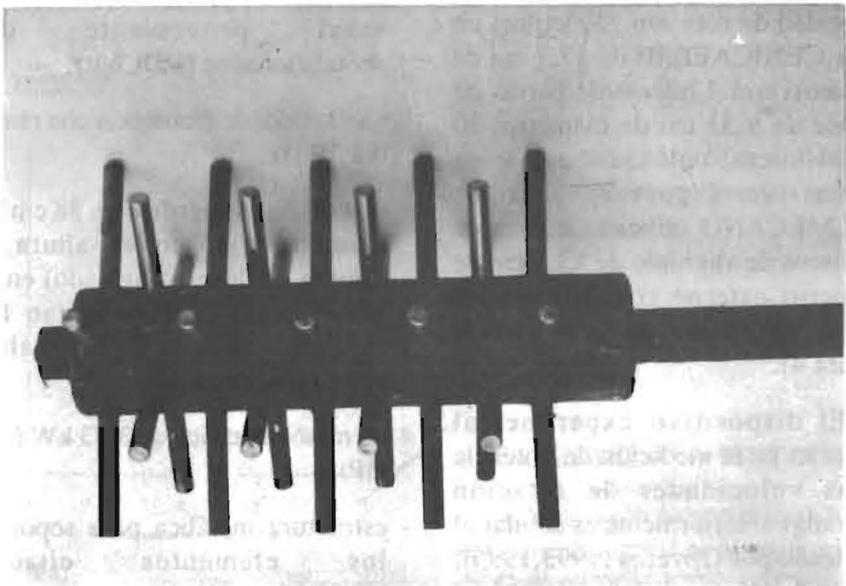


FIGURA 3. Rotor CENICAFE III

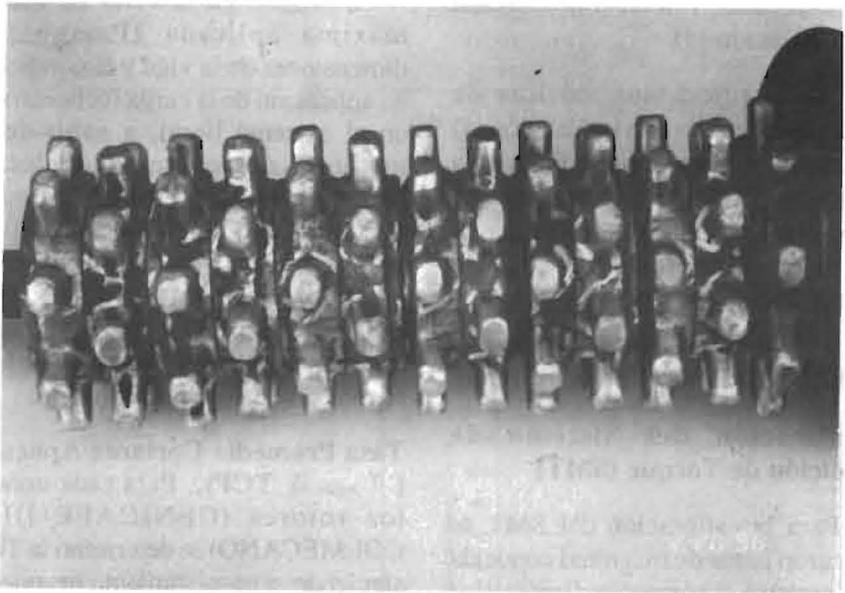


FIGURA 4. Rotor COLMECANO

$$\mu_a = \frac{D_o^2 N \rho}{R_e} \quad (8)$$

Se determinó la relación esfuerzo cortante vs. tasa de cortante (τ vs. $\dot{\gamma}$) para el fluido no-Newtoniano (Oliveros, 1993).

La tasa promedio de cortante, TCP ó $\dot{\gamma}_{prom}$, se estimó a partir de los valores anteriores por medio de la siguiente ecuación:

$$\dot{\gamma}_{prom} = \left(\frac{\mu_a}{K} \right)^{\frac{1}{n-1}} \quad (9)$$

La viscosidad del fluido

Newtoniano (se trabajó con soluciones de miel de purga en agua) se midió con un viscosímetro marca Brookfield modelo DV III con adaptador para muestras pequeñas modelo SSA15/7RPY con rango de 160 a 10^8 mPa.s. El volumen requerido en cada muestra fué de 3,3 mL. La adquisición de datos y su manejo se realizó por medio del «software» Reocalc desarrollado por la Brookfield Engineering Labs, Inc®.

Los valores experimentales de $\dot{\gamma}_{prom}$ se compararon con las predicciones teóricas obtenidas con la ecuación (5). Con los valores de $\dot{\gamma}_{prom}$ y N para cada rotor se obtuvo

una expresión similar a la indicada en la ecuación (4).

Las predicciones teóricas de potencia obtenidas con la ecuación (1) y de tasa cortante promedia con la ecuación (5) fueron comparadas con los valores experimentales utilizando la prueba de χ^2 al 5% de significancia.

RESULTADOS Y DISCUSION

Calibración del Sistema de Medición de Torque (SMT)

Para la calibración del SMT se aplicaron pesos de magnitud conocida y se registró el correspondiente valor de voltaje de salida (VDCout). Los valores de fuerza (F) y voltaje generado en el LVDT (VDCout) fueron ajustados a un modelo lineal, obteniéndose un alto ajuste ($r^2 = 0.993$), como se muestra en la Figura 5.

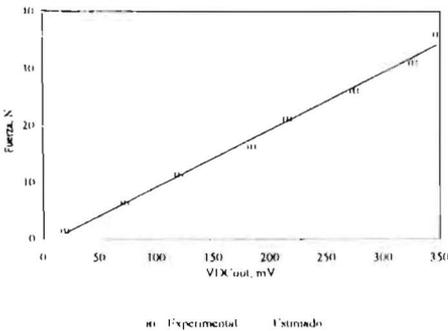


FIGURA 5. Curva de calibración del SMT

Con base en el valor de fuerza máxima aplicada (F_{max}), las dimensiones de la viga y la condición de aplicación de la carga (concentrada en el extremo libre), a partir de la mecánica clásica de materiales se obtuvo un valor de esfuerzo a tensión máximo (σ_{max}) de 14 MPa el cual es muy inferior al valor admisible para este material (400 MPa). En consecuencia, la viga en las experimentaciones realizadas está en el rango lineal de deformación.

Tasa Promedia Cortante Aplicada (γ_{prom} ó TCP). Para cada uno de los rotores (CENICAFE III y COLMECANO) se determinó el TCP siguiendo el procedimiento propuesto por Metzner y Otto (1957) obteniéndose las relaciones entre TCP y N (frecuencia) mostradas en la Tabla 1. Los valores experimentales de TCP fueron comparados con los estimados con la ecuación propuesta por Oliveros (ecuación 5) y con una expresión, ecuación (10), derivada considerando que un rotor con relación diámetro rotor/diámetro del tanque ó carcaza (ϕ_r/ϕ_t) < 1 genera un campo de flujo similar al producido por un cilindro rotando en el interior de otro estático: **flujo tipo Couette** (ver Figuras 6 y 7). En la ecuación (10) s es el inverso del índice de flujo (n) ó $s = 1/n$.

$$\gamma_{prom} = \frac{\omega R_i^{1.25}}{(R_o^{2s} - R_i^{2s})(R_o - R_i)} \left[1 - \left(\frac{R_o}{R_i} \right)^{2s} \right] \quad (10)$$

TABLA 1. Modelos de TCP (s^{-1}) para los rotores CENICAFE III y COLMECANO.

Agitador	TCP ó γ_{prom}	r^2
CENICAFE III	8,34 N - 71,77 (11)	0,972
COLMECANO	9,74 N - 60,07 (12)	0,982

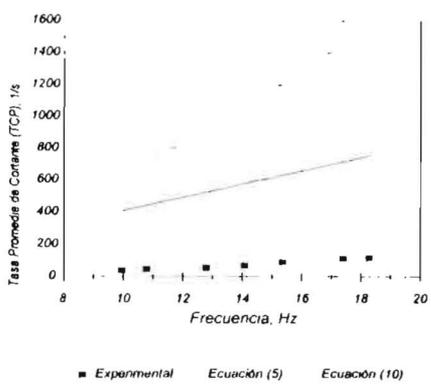
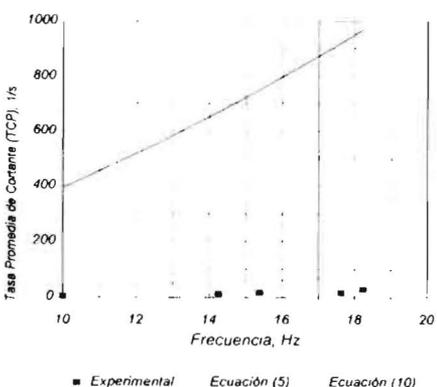


FIGURA 6. Valores experimentales y estimados de Tasa Promedia de Cortante (TCP) aplicados por el rotor CENICAFE III.

FIGURA 7. Valores experimentales y estimados de Tasa Promedio de Cortante (TCP) aplicados por el rotor COLMECANO.

Utilizando la prueba de χ^2 se evaluó la bondad del ajuste de los modelos (5) y (10) a los valores experimentales de TCP. Los valores de χ^2 fueron calculados mediante la siguiente expresión.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \left| \frac{(TCP_{exp} - TCP_{est})^2}{TCP_{est}} \right|_i \quad (13)$$

En la Tabla 2 se muestran valores calculados de χ^2 para las TCP estimadas en cada rotor con los modelos (5) y (10). La hipótesis nula se rechaza, hay diferencias entre valores de TCP estimados y los experimentales al nivel del 5%.

TABLA 2. Valores de $\chi^2_{\text{calculados}}$ para la TCP estimada con las ecuaciones (5) y (10).

Rotor	Modelo	$\chi^2_{\text{calculado}}$
CENICAFE III	Ecuación (5)	3.573,2*
	Ecuación (10)	173,56*
COLMECANO	Ecuación (5)	6.521,1*
	Ecuación (10)	87,96*

* significativa al 5%

Los resultados mostrados en la Tabla 2 indican que hay diferencia entre los valores de TCP estimados con los modelos (5) y (10). El modelo basado en el análisis del flujo tipo Couette, ecuación (10), exhibe tendencia similar a la observada experimentalmente y presenta menores desvios que el modelo (5), ver Figuras 6 y 7. Con base en lo anterior se ajustaron los valores experimentales de TCP y los estimados con la ecuación (10) por medio de un análisis de regresión lineal simple obteniéndose el siguiente modelo semiteórico con un coeficiente de determinación (r^2) de 0,982.

$$TCP_{prom} = 2.517 * TCP^{simetric} - 60.07 \quad (14)$$

En la Figura 8 se muestran valores de TCP experimentales y estimados con las ecuaciones (10) y

(12) para el rotor COLMECANO. Con fines de comparación se incluyen valores de TCP estimados para el rotor CENICAFE III (ecuación 11).

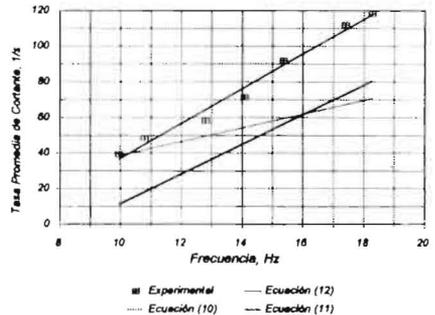


FIGURA 8. Valores experimentales y estimados de TCP para el rotor COLMECANO, ecuaciones (10) y (12). Valores de TCP estimados para el rotor CENICAFE III (ecuación 11).

Los valores de TCP para los rotores CENICAFE III y COLMECANO, mostrados en la Figura 8, indican que, a una misma

relación diámetro rotor/diámetro carcasa, velocidad de rotación y consumo específico de agua, el rotor COLMECANO genera mayor TCP que el CENICAFE III luego se espera que se produzca mayores esfuerzos cortantes. Esta característica debe permitir obtener mayores tasas de desmucilaginado.

Potencia en Desmucilaginado. Los valores de VDC_{out} (en mV) obtenidos con el multímetro fueron convertidos a Fuerza (F, en Newtons) utilizando la ecuación de calibración del sistema (ecuación 15, $r^2 = 0,9932$).

$$F = 0.10108VDC_{(out)} - 0.89214 \quad (15)$$

Valores de potencia requeridos para agitar suspensiones de café en baba-mucilago+agua con el rotor COLMECANO de 13,5 cm de diámetro son mostrados en la Figura 9. Adicionalmente, para cada valor

de RPM se calculó la potencia utilizando el modelo propuesto por Oliveros (1993), ecuación (1), y el modelo propuesto en este estudio el cual está basado en el análisis de flujo tipo Couette, ecuación (16).

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

Los valores de x^2 calculados y tabulados mostrados en la Tabla 3 indican que los valores de potencia estimados con los modelos (1) y (16) difieren de los experimentales a un nivel del 5% de significancia. Para el caso del rotor COLMECANO, el modelo (1) estima mejor los valores de potencia en el rango de 600 a 850 rpm (diferencia máxima de 25,9%). El modelo (16) exhibe similar tendencia a la observada experimentalmente. Los valores experimentales y los estimados con

TABLA 3. Valores de x^2 para las estimaciones de potencia del rotor COLMECANO obtenidas con los modelos (1) y (16).

Rotor	Modelo	X^2
CENICAFE III	Ecuación (1)	364,03*
	Ecuación (16)	29,800*
COLMECANO	Ecuación (1)	6.529,2*
	Ecuación (16)	1.041,52*

* Significativa al 5%

el modelo (16) fueron ajustados mediante un modelo lineal simple obteniéndose la siguiente expresión ($r^2 = 0,982$).

$$P = 3,09 P^c + 30,56 \quad (17)$$

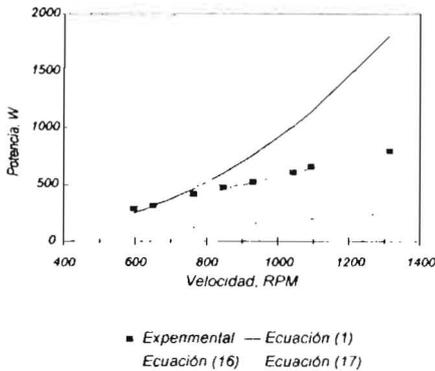


FIGURA 9. Valores experimentales de potencia y estimados con los modelos (1), (16) y (17). Rotor COLMECANO (13,5 cm de diámetro)

En la Figura 10 se muestran valores experimentales y teóricos de potencia para el agitador CENICAFE III, ecuaciones (1) y (16), para agitar suspensiones de café baba-mucílago+agua. Adicionalmente se incluyen valores estimados con un modelo potencial (empírico) obtenido al ajustar los valores experimentales de potencia y los estimados con la ecuación (1), $P = 5.35 P$ (ecuación 1)^{0.76}, $r^2 = 0,9966$. De acuerdo a lo observado en la gráfica, el modelo propuesto por Oliveros, ecuación (1),

predice mejor los valores de potencia que el modelo tipo Couette (diferencia máxima de 68,7% en todo el rango considerado, 300 a 1.100 rpm, y de 28,7% en el rango de 300 a 800 rpm).

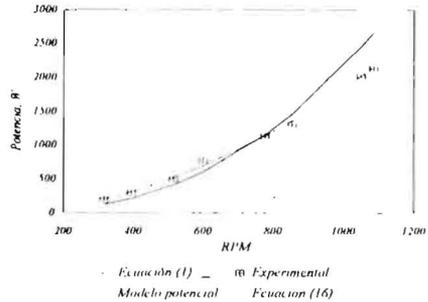


FIGURA 10. Valores experimentales y teóricos de potencia requerida para agitar suspensiones de café en baba y mucílago+agua. Rotor CENICAFE III

La potencia requerida para agitar las suspensiones café en baba-agua + mucílago también fue estimada utilizando el modelo citado por Härröd (1986) para equipos similares a un desmucilagador mecánico (cilindro con barras rotantes ó «votator-type scraped surface»), ecuación (3): *la potencia total requerida (Pt) es la suma de la potencia para mantener el flujo rotacional en el espacio anular (Pa) + la potencia para mover los álabes (Pb)*. Los valores de Pt mostrados en la Figura 11 para un desmucilagador con rotor COLMECANO de 13,5 cm de diámetro y

8 agitadores, operando por tandas, indican que el modelo (3) sobreestima considerablemente los valores de potencia.

Las predicciones de potencia mostradas en las Figuras 9 y 10 sugieren que el campo de flujo creado por el agitador CENICAFE es similar al originado por discos mientras que para el caso del agitador COLMECANO se aproxima al flujo tipo Couette. Aunque no se logró estimar la potencia con los modelos inicialmente propuestos con un error máximo de 10%, como estaba previsto inicialmente, utilizando el modelo semiteórico (ecuación 17) se puede estimar con alta confiabilidad la potencia para accionar un rotor COLMECANO operando por tandas o «baches».

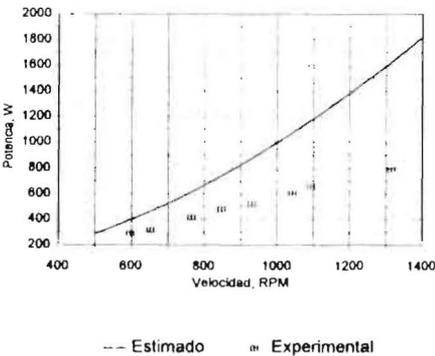


FIGURA 11. Valores experimentales y estimados de potencia con el modelo citado por Härröd (1986), ecuación (3). Para el rotor COLMECANO: $d_r = 0,135$ m, $n = 8$, $dt = 0,220$ m.

Escalamiento del desmucilagador con rotor tipo COLMECANO. El procedimiento para escalar el rotor COLMECANO se inició a partir del valor Co (11) el cual es el producto de la tasa cortante promedia por el tiempo de tratamiento (ecuación 18). En el caso de café variedad Colombia, Oliveros (1993) reporta un valor de 11.595 para remover el 95% del mucílago del grano.

$$Co = \gamma_{prom} t \tag{18}$$

Para un rendimiento C (kg de café en cereza/h), área del tornillo sinfín normal al flujo (A , m^2) y altura de la cámara de desmucilaginado (H , m), ver Figura 12, el tiempo de residencia (t) en el desmucilagador se puede estimar por medio de la siguiente ecuación (densidad del café en baba de 800 kg/m^3 y factor de llenado del tornillo, $0,30$).

$$t = \frac{8,35 \times 10^6 AH}{C} \tag{19}$$

Con base en la ecuación de potencia para el rotor COLMECANO (ecuación 17) y las ecuaciones 10, 14, 18 y 19 se generaron los valores de altura de la cámara de desmucilaginado para diferentes diámetros del rotor, capacidades y velocidad de rotación mostrados en las Tablas 4 a 7, **en condiciones de operación por tandas ó por**

«baches» . Cálculos preliminares mostraron que no se obtiene ventajas importantes (reducción de potencia, por ejemplo) cuando se reduce el diámetro de la carcasa. Sólomente

cuando el diámetro del rotor se redujo a 10,0 cm se disminuyó el diámetro de la carcasa, conservando el radio hidráulico inicial (carcasa de 0,222 m de diámetro).

TABLA 4. Altura de la cámara de desmucilaginado (m). Diámetro del rotor de 14,5 cm.

Capacidad (kg/h)	700 RPM	900 RPM	100 RPM
600	0,1233	0,1044	0,0905
1.400	0,2055	0,1740	0,1509
1.400	0,2876	0,2435	0,2111
2.000	0,4109	0,3479	0,3017

TABLA 5. Potencia (W) para rotar el agitador COLMECANO. Diámetro de 14,5 cm.

RPM	600 kg cc/h	1.000 kg cc/h	1.400 kg cc/h	2.000 kg cc/h
700	243,5	385,3	539,5	770,7
900	283,1	451,2	631,7	902,2
1.100	317,0	508,2	711,3	1.016,7

TABLA 6. Altura de la cámara de desmucilaginado (m). Diámetro del rotor de 13,5 cm

Capacidad (kg/h)	700 RPM	900 RPM1.	100 RPM
600	0,1388	0,1188	0,1039
1.000	0,2313	0,1980	0,1731
1.400	0,3238	0,2770	0,2420
2.000	0,4630	0,3960	0,3460

Los valores de altura de cámara de desmucilaginado mostrados en la Tabla 6, para operación tipo «bache» son inferiores a los utilizados en los equipos DESLIM 600,

DESLIM 1.000 y DESLIM 3.000 (de operación continua, en los cuales se realiza adicionalmente el lavado del café): 0,25, 0,275 y 0,50 m, respectivamente.

ξ

TABLA 7. Potencia para rotar el agitador COLMECANO (W): Diámetro de 13,5 cm

RPM	600 kg cc/h	1.000 kg cc/h	1.400 kg cc/h	2.000 kg cc/h
700	236,3	373,3	522,7	746,7
900	277,1	441,3	617,8	882,6
1.100	312,7	568,0	795,4	1.136,2

Potencia requerida para rotar un agitador COLMECANO en operación continua. Teniendo en cuenta que el campo de flujo que ocurre en un extrusor con un rotor, de diámetro constante, se puede asemejar al que ocurre en el espacio anular de un rotor COLMECANO de un desmucilaginator, alta velocidad tangencial y bajas velocidades radial y axial, se consideró el enfoque propuesto para la estimación de potencia en extrusión (considerando diámetro del rotor constante) citado por Bruin, Van Zuilichem y Stolp (1978), ecuación (20), para la estimación de la potencia que se requiere para forzar la suspensión café en baba-mucílago + agua a través del espacio anular del desmucilaginator (P_v).

$$\frac{P_v}{\mu k N^2 D^3} = \pi^2 \left(\frac{L}{D}\right) \left(\frac{w}{h}\right) \left(4 \tan^2 \theta + 1 + \frac{\xi^2}{3} + \frac{B}{3 \operatorname{sen} \theta}\right) \quad (20)$$

En la ecuación (20) «B» corresponde a la siguiente expresión,

$$B = \frac{32}{\pi} \left(\frac{h}{d}\right) \left(\frac{l}{d}\right) \left(\frac{w}{L}\right) k \operatorname{sen}(\theta) \quad (21)$$

En el caso de un desmucilaginator la longitud de descarga se asume igual a cero ($l=0$), luego B es cero. Debido a lo viscoso de la suspensión, se asume una relación ξ (flujo debido a la presión/flujo debido al arrastre) igual a 3. En un desmucilaginator tipo DESLIM (ver Figura 12) el café es forzado por

medio de un tornillo sinfín a través del espacio anular. El ángulo θ se asumió igual al ángulo de inclinación de la hélice del tornillo sinfín ($9,11^\circ$), luego $\tan^2 \theta = 0$. La ecuación (20) se reduce a:

$$\frac{P_v}{\mu k N^2 D^3} = 4\pi^2 \left(\frac{L}{D}\right) \left(\frac{w}{h}\right) \quad (22)$$

La potencia teórica para operar un rotor COLMECANO en operación continua se asume igual a la potencia requerida para mantener

el flujo Couette + la potencia para mantener el flujo axial (P_j). En las Tablas 8 y 9 se presentan valores de potencia para diferentes capacidades, velocidades de rotación y diferente diámetro del rotor. El diámetro de la carcasa se mantuvo constante en ambos casos (0,222 m). Adicionalmente, se asume que a las tasas de cortante aplicadas por el rotor la suspensión se comporta como un fluido Newtoniano en el segundo «plateau». En este caso se estimó un valor de 1,0 Pa.s a 120 s^{-1} (Oliveros 1993, 1995).

TABLA 8. Valores de P^v (W) para un rotor COLMECANO ($\phi = 13,5 \text{ cm}$).

RPM	Capacidad (kg cc/h)			
	600	1.000	1.400	2.000
700	80,4	223,2	406,2	803,6
900	94,8	252,6	486,3	1.010,5
1.100	123,8	288,8	577,6	1.155,0

TABLA 9. Valores de Potencia total (W) para un rotor COLMECANO ($\phi = 13,5 \text{ cm}$).

RPM	Capacidad (kg cc/h)			
	600	1.000	1.400	2.000
700	316,7	596,5	928,9	1.550,3
900	371,9	693,9	1.104,1	1.893,1
1.100	436,5	856,8	1.373,0	2.291,2

Metodología para el escalamiento de agitadores mecánicos...

Los valores de potencia mostrados en las Tablas 7 y 8 indican que la potencia para forzar la suspensión a través del ánulo es ligeramente superior a la requerida

para mantener el flujo rotatorio (flujo tipo Couette) sólomente en los equipos con capacidad para 2.000 kg de cc/h.

TABLA 10. Valores de potencia total (W) para un agitador COLMECANO ($\phi = 12,0$ cm).

RPM	Capacidad (kg cc/h)			
	600	1.000	1.400	2.000
700	298,5	566,4	886,6	1489,9
900	354,1	664,4	1.062,8	1.834,2
1.100	419,4	761,2	1.238,8	2.099,6

Los valores de potencia mostrados en la Tabla 10 descriptivamente son ligeramente inferiores a los observados en la Tabla 9.

Para estimar el valor de potencia a instalar en un desmucilagador con rotor COLMECANO, operando con consumo de agua de 1,0 L/kg de c.p.s., a los valores citados en las Tablas 9 y 10 hay que agregarles las pérdidas de energía debidas a la disipación viscosa (disipadas como calor), las cuales se puede asumir del orden del 13% (14), y las pérdidas inherentes a la transmisión de potencia (10%).

Para el caso de equipos con capacidad para 600, 1.000 y 2.000 kg de cc/h, a 900 RPM, la potencia

a instalar, sólomente para **desmucilaginar**, sería de 457,4 W (0,75 HP), 853 W (1.5 HP) y 2.328,5 W (3,6 HP), respectivamente. En equipos construídos en CENICAFE (Oliveros, 1995), para las capacidades mencionadas, la potencia instalada para **desmucilaginar y lavar** (equipos denominados DESLIM) es 1,2 HP, 1,8 HP y 4,8 HP, respectivamente.

CONCLUSIONES

1. A una misma velocidad de rotación el agitador COLMECANO genera mayores valores de TCP que el rotor CENICAFE III. Este comportamiento podría ser atribuible a la mayor resistencia hidrodinámica del rotor

- COLMECANO, la mayor altura de los álabes (1,40 cm para el COLMECANO y 0,93 cm para el CENICAFE III) y al mayor número de álabes en el rotor COLMECANO (8 álabes ó dientes frente a 4 del CENICAFE III).
2. El rotor COLMECANO genera un campo de flujo tipo Couette. Las mejores predicciones de TCP y potencia con el rotor COLMECANO se obtuvieron con los modelos derivados con base en el análisis del flujo tipo Couette (AFC).
 3. Los valores estimados de TCP y de potencia para los rotores CENICAFE III y COLMECANO difieren de los datos experimentales. Sin embargo, para el caso del agitador COLMECANO, en el rango de 600 a 1.300 rpm, los modelos basados en el análisis del flujo tipo Couette (AFC) estiman valores de TCP y de potencia con similar tendencia a los experimentales. Para el rotor COLMECANO se obtuvo un modelo semi-teórico que permite obtener con alta confiabilidad ($r^2 = 0,982$) la TCP a partir del modelo basado en el AFC. Para el caso del rotor CENICAFE III, las mejores estimaciones de potencia se obtuvieron con el modelo propuesto por Oliveros.
 4. La TCP y el consumo de potencia de un equipo tipo DESLIM depende de variables geométricas (diámetro del rotor y de la carcasa, principalmente), de la viscosidad aparente de las suspensiones café-agua + mucílago que se obtengan y de las condiciones de operación (velocidad de rotación y agua suministrada). El comportamiento reológico de las suspensiones depende principalmente de la TCP (mayor viscosidad aparente a menor TCP), de la concentración de partículas (granos, restos de pulpa, fragmentos de granos, etc) y de la viscosidad de la fase continua (agua + mucílago). La viscosidad de la fase continua depende de la cantidad de agua utilizada: a menor cantidad de agua mayor viscosidad. En equipos en los cuales se desmucilagina con bajo consumo específico de agua ($< 1,0$ L/kg de cps) y sin separación previa del material extraño al café (restos de pulpa, granos sin despulpar, hojas, etc) los consumos específicos de potencia deben ser superiores a los que se obtengan con desmucilagadores operados con mayor consumo específico de agua y con limpieza y/o clasificación antes del desmucilagado (separación de flotes en cerezas, separación de

granos sin despulpar y pulpa en el café en baba, etc).

5. El valor Co (número de Oliveros $= \gamma_{prom,t}$) es un criterio apropiado para el diseño de desmucilaginosos mecánicos de café. Con base en este valor se puede definir la geometría y las condiciones de operación de cualquier dispositivo mecánico (siempre que se conozca la TCP). Para el caso de los equipos DESLIM se observó que las estimaciones geométricas y de operación estimadas con base en este criterio de diseño, para desmucilagar, son similares a las requeridas en la práctica.
6. La potencia teórica requerida para accionar un equipo tipo DESLIM se puede estimar considerando la potencia para mantener el flujo rotatorio (flujo Couette) y la potencia requerida para forzar la suspensión a través del espacio anular. La potencia para mantener el flujo Couette se puede estimar por medio del modelo semi-teórico derivado a partir del análisis de flujo Couette. La potencia para mantener el flujo axial se puede estimar a partir del modelo propuesto por Bruin, Zuilichem y Stolp (1978) adaptado para el

caso de un desmucilaginoso tipo DESLIM, ecuación (22). La potencia real, potencia a instalar, se puede estimar adicionándole al valor teórico las pérdidas por disipación viscosa (13%) y las pérdidas en la transmisión de potencia (10% para el caso de bandas tipo B).

Lista de términos utilizados

A	Area, m ²
C	Capacidad, kg/h
Co	Parámetro adimensional propuesto por Oliveros para escalar agitadores mecánicos ($\gamma_{prom,t}$)
d	Diámetro de la descarga en un extrusor, m
d _k	Diámetro del cilindro descrito por los álabes rotantes, m
d _s	Diámetro del rotor, m
d _s	Diámetro de la carcasa, m
F	Fuerza, N
H	Altura de la cámara de desmucilaginoso, m
h	Distancia entre el diámetro interno del agitador y la carcasa, m
K	Índice de consistencia, Pa.s ⁿ
k	Número de agitadores en el rotor

L	Longitud de la cámara de desmucilaginado, m	Letras Griegas	
n	Número de álabes ó índice de flujo	ζ	Relación entre el flujo debido a la presión y el flujo debido al arrastre
N	Velocidad de rotación, revoluciones/s	ρ_s	Densidad de la suspensión, kg/m ³
Np	Número de potencia (P/ $\rho N^3 D^5$)	ω	Velocidad angular, rad/s
P	Potencia, W	$\dot{\mu}_s$	Viscosidad cinemática, m ² /s
PD	Potencia para rotar discos, W	γ	Tasa cortante, l/s
Pv	Potencia para forzar las suspensiones a través del espacio anular, W	μ_s	Viscosidad aparente, Pa.s
Re	Número de Reynolds ($Nd_s^2, \rho/\mu_s$)	θ	Angulo de inclinación de la helice,
R_i	Radio interior, m	°	
R_o	Radio exterior, m		
s	Inverso del índice de flujo (1/n)		
t	Tiempo, s		
TC	Tasa de cortante, l/s		
TCP	Tasa cortante promedia, l/s		
VDC _{out}	Voltaje (DC) en la salida del sistema de medición de torque		
W	Ancho de la cinta helicoidal (ecuación 6) ó paso del tornillo sinfin (ecuaciones 20 a 22).		

BIBLOGRAFIA

BRUIN S., D.J. and VAN ZUILICHEM; STOLP, W. A review of fundamental an engineering aspects of extrusion of biopolymers in a single-screw extruder. *En: Journal of Food Process Engineering.* Vol. 2 (1978); p.1-37.

CALDERBANK, P.H. and MOO-YOUNG, M.B. 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.

- CHAVAN, V.V. and ULBRECHT, J. Power correlation for helical ribbon impellers in inelastic non-Newtonian fluids. *En: Chemical Engineering Journal*. Vol. 3 (1972); p.309-311.
- DAVIES, E.D. and MERRIAM, A.J. Cafepro: Máquina para remover químicamente el mucilago del café recién despulpado. *En: Turrialba*. Vol. 3 (1953); p.151-155.
- HÄRRÖD, M. Scraped surface heat exchangers. *En: Journal of Food Process Engineering*. Vol. 9 (1986); p.1-62.
- HOGG, R.V. and LEDOLTER, J. Engineering statistics. New York: MacMillan, 1987. 420p.
- LINDLEY, J.A. Mixing process for agricultural and food materials: Part 2, highly viscous 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.
- NAGATA, S.; YANAGIMOTO, T. and YOKOYAMA, T. A study on mixing of high-viscous liquid. *En: Kagaku Kogaku*. Vol. 21 (1957); p.278-286.
- OLIVEROS T., C.E. Analysis of mechanical demucilaging of coffee beans. Madison, Wi., 1993. 199 p. Tesis (Ph.D. Ingeniería Agrícola). University of Wisconsin-Madison.
- _____. Predicción teórica del consumo de potencia y de la tasa promedio de cortante aplicada en el desmucilaginado mecánico del café. *En: Cenicafé*. Vol. 46 (1995), p.112-122.
- _____. and ROA, M.G. El desmucilaginado mecánico del café. *En: Avances Técnicos Cenicafé*. No. 216 (1995); 4p.
- PLACEK, L.; TAVLARIDES, L. and SMITH, G.W. Turbulent flow in stirred tanks. Part II. A two scale model of turbulence. *En: AIChE Journal*. Vol. 32 (1986); p.1771-1786.

- TAKAHASHI, K.; ARAI, K. and SAITO, S. Effects of geometrical variables of helical ribbon impellers on mixing of highly viscous Newtonian liquids. *En: Journal of Chemical Engineering of Japan*. Vol. 15 (1982); p.77-79.
- TCHANA, E. *et al.* Etude de l'influence des conditions de fermentation sur les caractéristiques d'un café arabica. ASIC, II Colloque, Lomé. 1985.
- TOH, M. and MURAKAMI, Y. Power consumption of a fluid-loaded floating scraper blade. *En: Kagaku Kogaku Ronbunshu*. Vol. 15 (1982); p.493-495.
- TROMMELEN, A.M. and BEEK, W.B.J. The mechanism of power consumption in a votator-type scraped surface heat exchanger. *En: Chemical Engineering Science*. Vol. 26, No. 2 (1971); p.1977-1986.