

Determinación del nivel de dilución apropiado en el proceso de clarificación y diseño de un sistema de control automático

Efficient Dilution Levels of Diluted Press Liquor in the Palm-Oil Clarification Process and the Design of an Automated Control System to Maintain

AUTORES

Édgar E. Yáñez A.

Investigados Asociado. Líder del Programa de Plantas de Beneficio. Cenipalma.

edgar.yanez@cenipalma.org

Óscar M. Díaz R.

Investigador Auxiliar. Cenipalma. odiaz@cenipalma.org

Jesús A. García N.

Investigador Titular. Director de la División de Procesos y Usos. Cenipalma. jgarcia@cenipalma.org

José F. Granados

Director de la Planta de Aceites S.A. jfcogranado@hotmail.com

Edgar F. Castillo M.

Director del Programa de Fábricas. Cenicaña. efcastil@yahoo.com

Palabras CLAVE

Velocidad de sedimentación, Reología, Eficiencia de sedimentación, Licor de prensas

Settling rate, Rheology, Settling efficiency, Press liquor

Recibido: 7 octubre 2008
Aceptado: 28 enero 2009

Resumen

En este trabajo se evaluaron ocho niveles de dilución del licor de prensa (LP) en el proceso de clarificación del aceite en un rango entre 0,8 y 1,4, medidos en el licor de prensa diluido (LPD) como %volumen aceite / %volumen agua. Esta evaluación permitió establecer, dentro del rango indicado, una relación óptima de dilución de 1,4 ($\%vol_{\text{aceite}} / \%vol_{\text{agua}}$), que en relación con el nivel de dilución convencional de 1,0 ($\%vol_{\text{aceite}} / \%vol_{\text{agua}}$), incrementó la eficiencia de separación en 50%. Este valor permite reducir el consumo de agua en el proceso de clarificación en aproximadamente 29%, lo cual significa casi un 10% menos en el consumo total de agua por tonelada de aceite de palma. Un menor consumo de agua en el proceso de clarificación y en general en el proceso de extracción de aceite significa menores volúmenes en los equipos de clarificación y mayores tiempos de residencia, así como una reducción en la generación de efluentes del proceso. Se realizó un análisis reológico de las muestras de LPD, los cuales permitieron clasificar el tipo de fluido como No-newtoniano-Seudoplástico y analizar el efecto de la dilución sobre la viscosidad del licor de prensas diluido. Con lo anterior se diseñó y evaluó un sistema de control que permite garantizar una dilución adecuada ($1,4 \%vol_{\text{aceite}} / \%vol_{\text{agua}}$) y ajustada a las condiciones reales de procesamiento, que permite una rápida separación de aceite, un incremento global en la eficiencia del proceso y la reducción del impacto ambiental por disminución en el consumo de agua y generación de efluentes.

Summary

In this study were evaluated eight levels of dilution for liquid coming out of the Press (LP) in the palm oil clarification process in a range between 0.8 and 1.4, measured as $\%vol_{\text{oil}} / \%vol_{\text{water}}$ in the diluted press-liquor (LPD). This assessment



led to the establish, within the range considered, an optimal dilution of 1.4 (%vol_{aceite} / %vol_{agua}), which one in relation to the conventional dilution level of 1.0 (% vol_{aceite} / %vol_{agua}), increased the oil recovery efficiency by 50%. This value can reduce water consumption in the clarification process in approximately 29%, which means almost 10% less in total water consumption per tone of palm oil. In general, a lower consumption of water during the oil extraction process means lower sizes in clarifications equipment and larger residence times, as well as a reduction in the generation of effluents. Rheological analysis was conducted on samples taken from LPD, which led to classify the type of fluid as Non-Newtonian-Seudoplastic and analyze the effect of the dilution on the viscosity for the diluted press-liquor. That results was used to design and to evaluate a control system that ensures the appropriate dilution (1.4 % vol_{aceite} / %vol_{agua}) during current conditions of processing, which allows a quick separation of oil, an overall increase in the process efficiency and reducing environmental impact by decrease the water consumption and effluents generation.



Introducción

La generación de efluentes líquidos es la principal carga contaminante del proceso de extracción de aceite (Mora *et al.*, 1998). Como es usual en procesos agroindustriales, el consumo de agua y, a su vez, la generación de efluentes es alta. En el caso del aceite de palma se generan entre 0,7 y 0,8 m³ de efluentes por tonelada de racimo de fruta fresca (RFF) (Yáñez *et al.*, 2003). Estos efluentes, por tanto, requieren grandes áreas en los sistemas de tratamiento, con el fin de reducir el aporte contaminante final y así cumplir con la reglamentación gubernamental.

Con lo anterior, un interés permanente del sector palmicultor ha sido reducir el impacto ambiental de su agroindustria, para lo cual ha fijado estrategias tecnológicas que propendan por este objetivo. Es así como su centro de investigación, Cenipalma, en asocio con el Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales (Ceiam), de la Universidad Industrial de Santander, planteó un proyecto que busca reducir el consumo de agua en el proceso de extracción de aceite, optimizando su recuperación.

El proceso de clarificación de aceite en plantas de beneficio es realizado mediante un sistema de decantación estático, que está basado principalmente en la diferencia de densidades del aceite y del medio donde está mezclado (licor de prensas) para promover su separación. El factor de dilución con agua es

el responsable en gran medida de la eficiencia de la clarificación. Éste favorece la separación del aceite, debido a la reducción en la viscosidad, teniendo en cuenta lo expuesto por la Ley de Stokes.

Hoy en día, la pérdida de aceite en clarificación ocupa el segundo lugar en importancia sobre la eficiencia global del proceso de extracción de aceite de palma.

El sistema de clarificación más popularizado en Colombia, por su economía y simplicidad de operación, es el sistema estático, que hoy en día emplea casi el 100% de las plantas de beneficio a nivel nacional. Los parámetros de diseño empleados en este sistema fueron estimados para características de fruto producidos hace 40 años, sin realizar modificación alguna o ajuste a las condiciones actuales. La dilución del licor de prensa es el factor con mayor variación en el proceso y es responsable, en gran medida, de la eficiencia en la clarificación.

Por lo anterior, es necesario establecer el nivel de dilución adecuado ante las variaciones en las características del fruto y la capacidad de procesamiento, para garantizar una alta recuperación de aceite en el proceso de clarificación. Esto garantiza una dilución adecuada y ajustada a las condiciones reales de procesamiento, que permiten una rápida separación de aceite, un incremento global en la eficiencia del proceso y la reducción de pérdidas, así como la posibilidad



de usar equipos más pequeños de clarificación y la reducción del impacto ambiental, por la disminución en el consumo de agua del proceso.

Metodología

Con el fin de cumplir con los objetivos propuestos, el desarrollo metodológico consideró los siguientes tres aspectos:

- Determinar el nivel adecuado de dilución, basado en el estudio de la velocidad y eficiencia de sedimentación del LPD.
- Realizar un análisis reológico del licor de prensas diluido.
- Diseñar y evaluar un sistema de control automático para el nivel de dilución.

Determinación de la eficiencia y la velocidad de sedimentación del licor de prensas a diferentes niveles de dilución

La prueba consistió en el montaje de ensayos de sedimentación de licor de prensa diluido a diferentes composiciones volumétricas, en un baño termostataado a temperatura controlada de 90° C. Se propuso un diseño de bloques completamente al azar (DBCA) y se evaluaron ocho tratamientos con once repeticiones, para ser analizadas por varianzas a 5% de significancia. Esta metodología fue diseñada y evaluada en trabajos anteriores para el estudio del efecto de campos magnéticos sobre la separación del aceite en la clarificación (Cenipalma, 2004).

Para determinar la eficiencia y velocidad de separación se midió la tasa de separación de aceite volumétrica durante una hora. La eficiencia de separación fue determinada como el porcentaje de aceite separado en la prueba, respecto al total contenido en la muestra, el cual fue determinado por el análisis con centrifuga durante 10 min. a 3500 r.p.m.

Los tratamientos evaluados de dilución del licor de prensas están en el rango de 0,8 a 1,4 (%vol_{aceite}/ %vol_{agua}) con un paso del 0,1, incluyendo dilución cero como testigo móvil para cada repetición.

La eficiencia de separación se calculó como el volumen de aceite recuperado sobre el total del aceite contenido en la muestra, expresado de la siguiente forma:

$$\% e = \frac{\text{Vol. aceite Recuperado (ml)} * 100}{\text{Vol. muestra} * 100 \text{ vol. Aceite}}$$

La velocidad de separación se consideró como el volumen de aceite separado por unidad de tiempo, que para la metodología aplicada fue considerado como la medición de esta variable para los primeros 10 min. de iniciado el ensayo, expresado de la siguiente forma:

$$\text{Vel. separación} = \frac{\text{Vol. Aceite Recuperado (ml)}}{\text{tiempo (min)}}$$

Estudio reológico para las mezclas licor de prensa-agua

Se utilizó un reómetro y un viscosímetro Brookfield DV III, para evaluar los tratamientos en un rango de 0,8 a 1,4 (%vol_{aceite}/ %vol_{agua}), con un paso de 0,2, con tres repeticiones para cada uno. Esto permitió obtener las curvas de fluidez y de viscosidad a partir de las cuales se pudo caracterizar reológicamente el fluido licor de prensa diluido (LPD). La temperatura a la cual se desarrolló la prueba fue de 45° C, aproximadamente.

Diseño y evaluación de un sistema de control automático para la dilución del licor de prensa

El sistema de control tiene como fin mantener constante la relación de dilución volumétrica aceite/agua en el proceso de clarificación, dada la influencia de esta variable en la dinámica de separación de aceite y lodos. Con este propósito se planteó el diseño de un sistema tipo *Feedback*, con monitoreo centralizado y elementos finales de fácil acceso a las empresas.

Los parámetros considerados por este sistema fueron los siguientes:

- Variable controlada: relación de dilución aceite/agua.
- *Set Point*: mejor relación de dilución aceite/agua encontrada.
- Variable manipulada: flujo de agua.
- Perturbación: variación en el flujo de licor de prensa.

La evaluación del sistema de control se dividió en dos partes:

Tiempo de respuesta a la perturbación:

Se plantearon cuatro niveles que corresponden a la operación de una, dos, tres y cuatro prensas de similar capacidad de procesamiento, lo que equivale a valorar la perturbación generada en el sistema al trabajar al 25, 50, 75 y 100% de la capacidad máxima de la planta. El ensayo consistió en realizar cambios en el nivel de flujo cada 12 min., durante los cuales se tomaron cada tres minutos muestras al licor de prensa diluido para determinar su composición volumétrica. Los cambios en los niveles de operación se realizaron desde el 100% de la capacidad máxima hasta el 25% de la misma, para luego repetirse el procedimiento en el sentido ascendente hasta el 100% de la capacidad máxima del proceso.

Para determinar la confiabilidad del nivel de dilución durante el proceso normal:

Se realizó una prueba consistente en realizar un seguimiento a la composición del licor de prensa diluido cada 20 min., durante tres días, en turnos normales de trabajo. De esta manera se estableció el nivel de corrección y aseguramiento del nivel de dilución establecido en el *Set Point*.

Resultados y análisis

Determinación de la eficiencia y la velocidad de sedimentación del licor de prensas a diferentes niveles de dilución

Teniendo en cuenta la metodología desarrollada para los ensayos de sedimentación de los diferentes niveles de licor de prensa, se hizo el montaje en un baño termostático que llevó a escala de laboratorio las condiciones de clarificación estática del proceso de beneficio del fruto de palma (Figura 1).

Los datos obtenidos para eficiencia de separación de aceite para cada nivel de dilución, presentan cinco grupos evaluados con la prueba estadística LSD a una confiabilidad del 95% (Figura 2).

El grupo "d" presentó los valores de eficiencia más altos para todo el experimento (Figura 2). Este grupo está conformado por las diluciones 1,2, 1,3 y 1,4 (%vol_{aceite}/%vol_{agua}). Se observa que, respecto al nivel de dilución utilizado tradicionalmente de 1,0 (%vol_{aceite}/%vol_{agua}), el tratamiento 1,4 presentó un

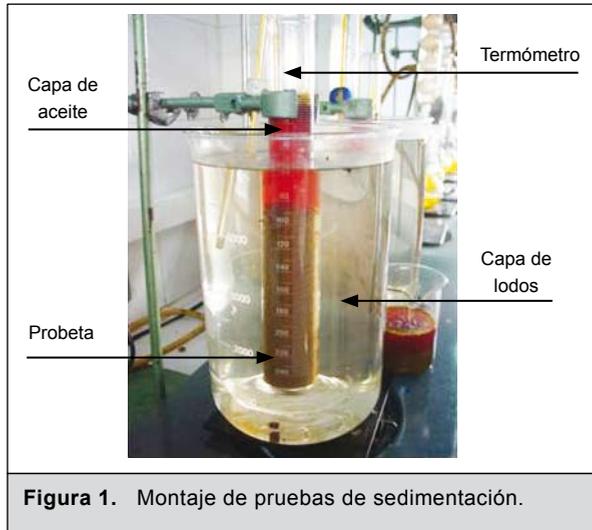


Figura 1. Montaje de pruebas de sedimentación.

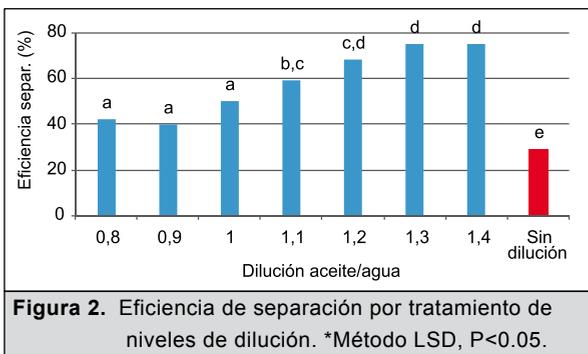


Figura 2. Eficiencia de separación por tratamiento de niveles de dilución. *Método LSD, P<0.05.

50% más de eficiencia de separación de aceite y el menor consumo de agua en el rango de dilución evaluado.

Una mayor eficiencia indica una mayor recuperación de aceite en el proceso de clarificación y, por tanto, una mayor eficiencia del proceso de extracción, lo que genera un menor contenido de aceite en los lodos de descarga, permitiendo además reducir la carga de los sistemas de tratamiento de efluentes en la planta, para hacerlos más efectivos.

Un menor consumo de agua en el proceso en clarificación y, en general en el proceso de extracción de aceite, significa menores volúmenes en los equipos de clarificación y mayores tiempos de residencia, así como una reducción en la generación de efluentes del proceso. Esto permite construir plantas de mayor capacidad de procesamiento con menor volumen en los equipos de clarificación, reduciendo los costos de implementación o ampliación e incrementando la eficiencia del proceso de clarificación.



La reducción en el consumo de agua tiene un impacto ambiental muy positivo en lo concerniente a la utilización de recursos naturales y por la menor generación de efluentes líquidos, que permitirían construir sistemas de tratamientos de menor capacidad, teniendo en cuenta el gran requerimiento de área de esta tecnología.

Durante el proceso de sedimentación de la muestra de LPD, la velocidad de separación del aceite varía con el tiempo. En los ensayos fue posible determinar que la mayor velocidad de separación se presentó durante los primeros 10 minutos de todo el proceso de sedimentación. La velocidad de separación para los niveles de dilución evaluados se presenta en la Figura 3. Estadísticamente se establecieron cinco grupos para los datos de velocidad de separación por nivel de dilución, utilizando el método LSD a un 95% de confiabilidad.

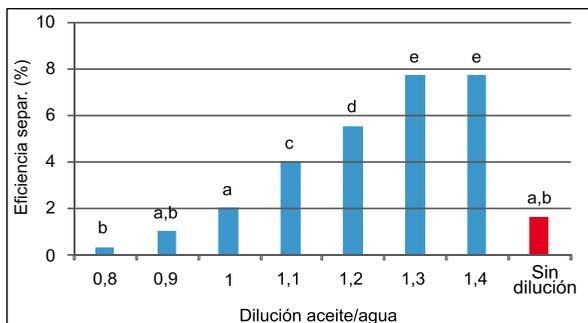


Figura 3. Velocidad de separación por tratamiento de niveles de dilución.

El grupo “e”, conformado por los tratamientos 1,3 y 1,4 (%vol_{aceite}/vol_{agua}), presenta las velocidades de separación más altas con relación a todos los tratamientos, incluyendo el tradicional 1:1 aceite/agua. Respecto a éste se obtuvieron valores superiores en aproximadamente 6 ml/min. más rápidos. En términos reales, una mayor velocidad de separación requiere el diseño y la utilización de clarificadores más pequeños con menor tiempo de residencia, favoreciendo la calidad final del aceite recuperado. Esto se expresa en una menor acidez del aceite en la construcción de nuevos equipos de clarificación con costos de fabricación inferiores a los actuales. El comportamiento de la separación de aceite presenta una tendencia inicial al incremento lineal y proporcional, hasta alcanzar un punto de inflexión en el cual esta curva se vuelve constante, evidenciando la separación del aceite libre (Figura 4).

Estas dos variables, eficiencia y velocidad de sedimentación, garantizan que al usar una nueva relación de dilución en el proceso (1,4 %vol_{aceite}/vol_{agua}), no sólo se logra optimizar el proceso de recuperación de aceite, sino que además se reduce drásticamente el consumo de agua en el proceso. Esta reducción representa el 29% del consumo de agua en clarificación, que equivale a 66 litros por tonelada de racimos y a su vez una reducción en el consumo global de agua en el proceso en un 10% aproximadamente.

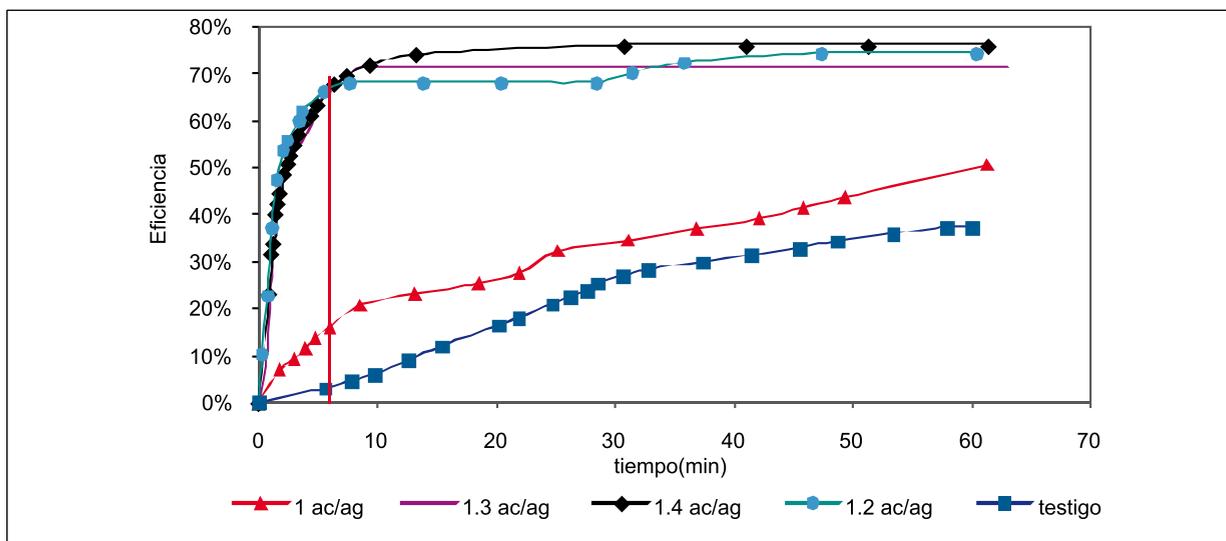


Figura 4. Curva característica de eficiencia de separación respecto al tiempo.

Convencionalmente el consumo de agua de dilución es de 232,5 L agua/Ton RFF para una relación de dilución de UNO ($\%vol_{aceite}/\%vol_{agua}$).

Considerando el impacto generado por la reducción de consumo de agua en dilución y por ende de caudal en las corrientes de proceso, se estima una reducción en efluentes del 8%, que impactaría directamente en el manejo de las lagunas de tratamiento y en los caudales de aceite perdido en efluentes. De igual forma, la reducción genera un incremento en tiempo de residencia de los actuales equipos de clarificación (diseñados con un nivel de dilución de 1 ($\%vol_{aceite}/\%vol_{agua}$) del 11,5% aproximadamente, esperando una reducción en igual proporción en el tiempo de uso de los equipos de centrifugado.

Estudio reológico para las mezclas licor de prensa-agua

El estudio reológico permite:

- Clasificar qué tipo de fluido es el LPD según su respuesta ante la inducción de un esfuerzo cortante a diferentes niveles de dilución.
- Cuantificar el efecto de la dilución sobre la viscosidad del licor de prensas diluido, para conocer y corroborar los factores que inciden en la separación del aceite. Este conocimiento aporta para el diseño de equipo y control de proceso.

En la Figura 5 se presenta la curva de fluidez, para las cuatro diluciones 1,4; 1,2; 1,0; 0,8 ($\%vol_{aceite}/\%vol_{agua}$)

del licor de prensa, a una temperatura de 44° C y un rango de velocidad de deformación entre 119 – 317 (1/S). La curva de fluidez muestra el efecto de la velocidad de deformación aplicada al fluido, sobre el esfuerzo cortante generado como respuesta.

Se observa que para todos los tratamientos, el esfuerzo cortante es directamente proporcional a la velocidad de deformación, lo cual es característico de los fluidos *no-newtonianos pseudoplásticos*. Lo anterior es resultado del efecto que puede generar la agitación lenta y controlada en clarificadores, por “aspas” que imponen un esfuerzo de corte para mejorar la separación del aceite, debido a la reducción en su viscosidad.

Por otro lado, en la Figura 6 se grafica la viscosidad (cp) respecto a la velocidad de deformación, para los cuatro niveles de dilución planteados.

Se observa que a medida que aumenta el valor de la relación de dilución ($\%vol_{aceite}/\%vol_{agua}$), es decir, con menor contenido de agua, se incrementa la viscosidad del fluido. La ley de Stokes, que rige los fenómenos de sedimentación estática, establece que la velocidad de separación es inversamente proporcional a la viscosidad, y proporcional al cuadrado del tamaño de partícula de las gotas de aceite.

Teniendo en cuenta lo anterior y considerando los resultados de la caracterización reológica, en la cual la relación de dilución 1,4 ($\%vol_{aceite}/\%vol_{agua}$) presentó los mejores resultados de separación,

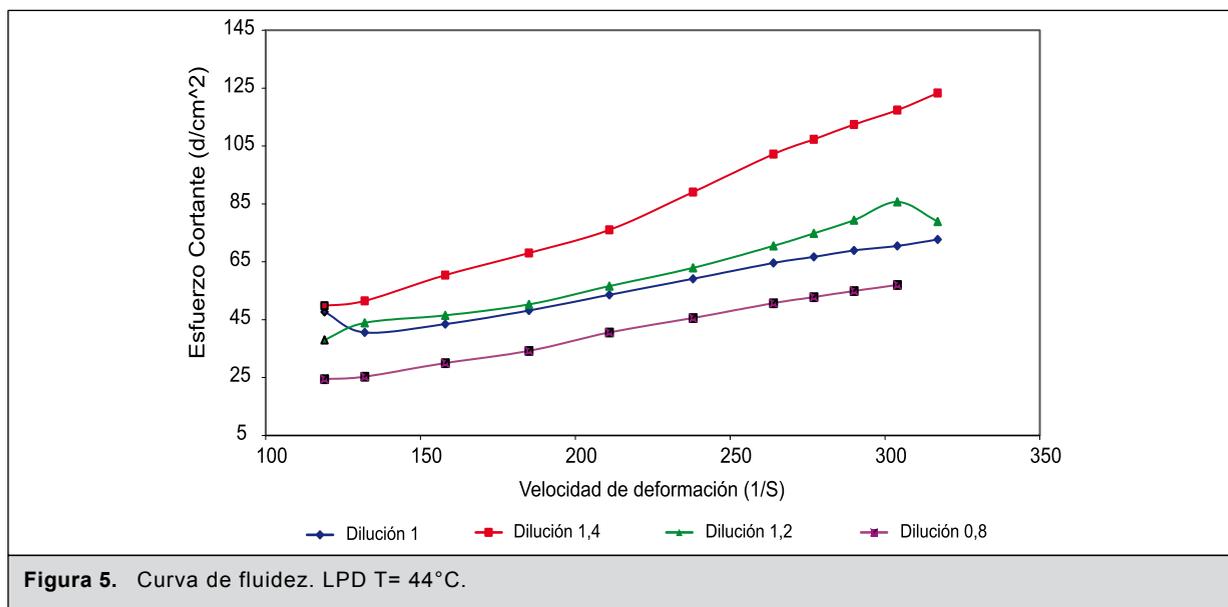


Figura 5. Curva de fluidez. LPD T= 44°C.

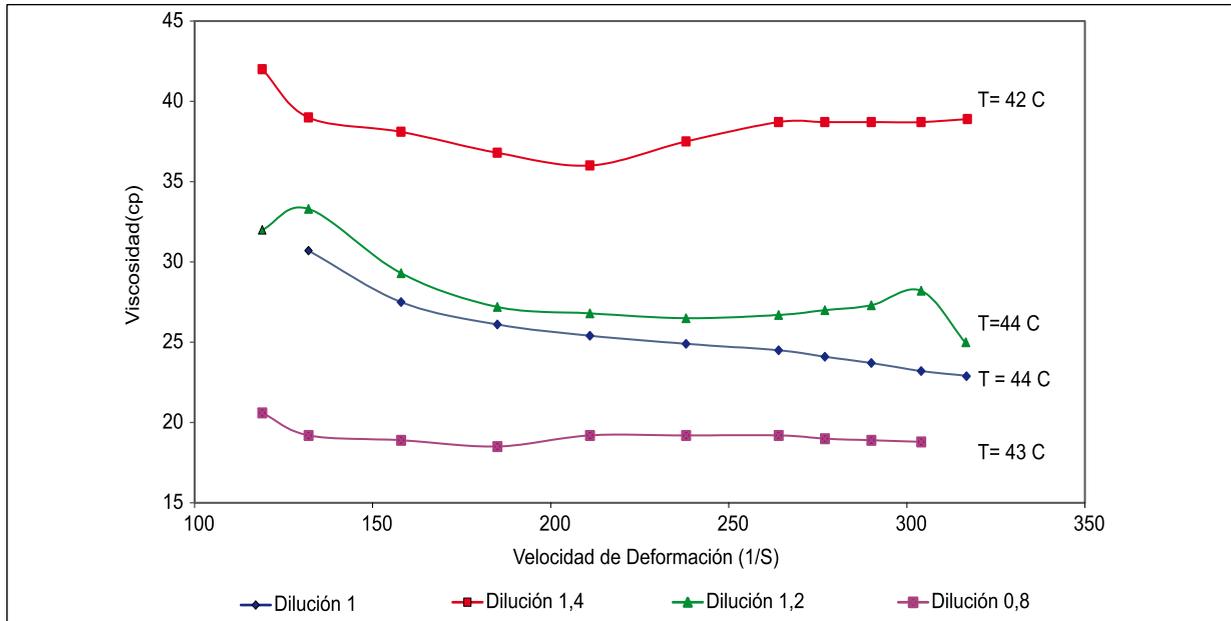


Figura 6. Curva de viscosidad LPD, T= 44° C.

pero el más alto de viscosidad, se observa que el efecto determinante en la separación para este tipo de fluidos, al nivel de dilución evaluado, es el tamaño de partícula, la cual se favorece en casos de menor dispersión de las gotas de aceite en el resto del fluido, para una mayor concentración de las mismas en el medio.

Diseño y evaluación de un sistema de control automático para la dilución del licor de prensa.

a) Diseño del sistema de control de dilución del licor de prensa. La acción del sistema de control tipo feedback está sujeta a las perturbaciones generadas por los cambios de flujo en el licor de prensa (Figura 7).

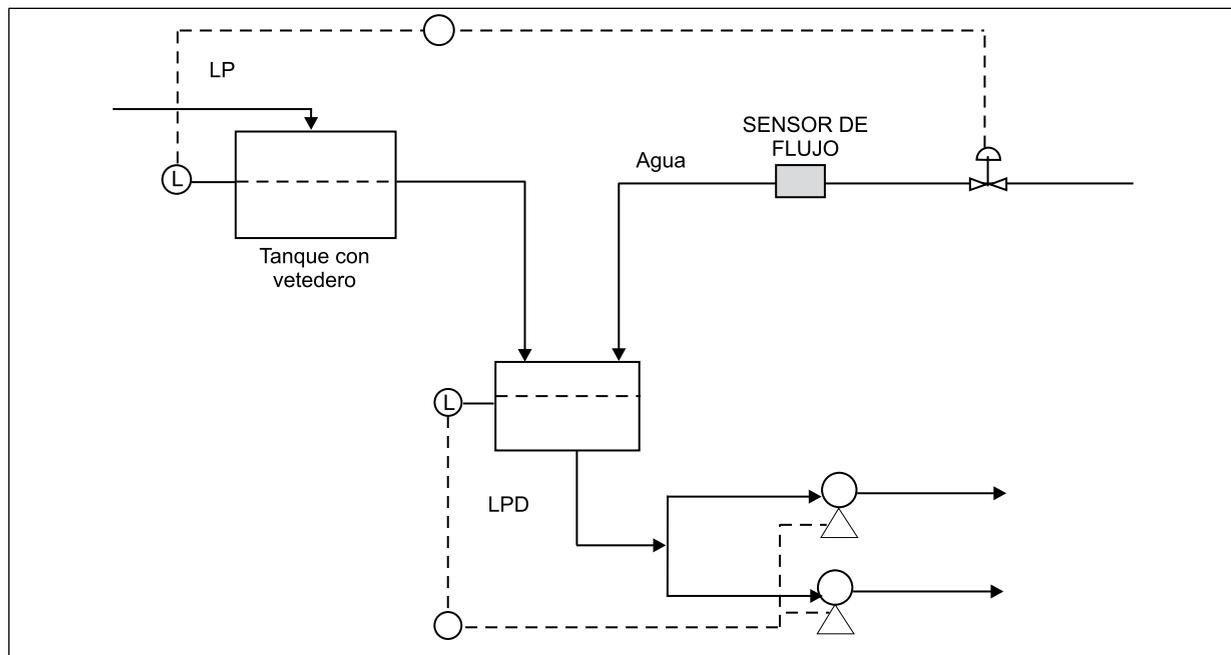


Figura 7. Diagrama de diseño del sistema de control.

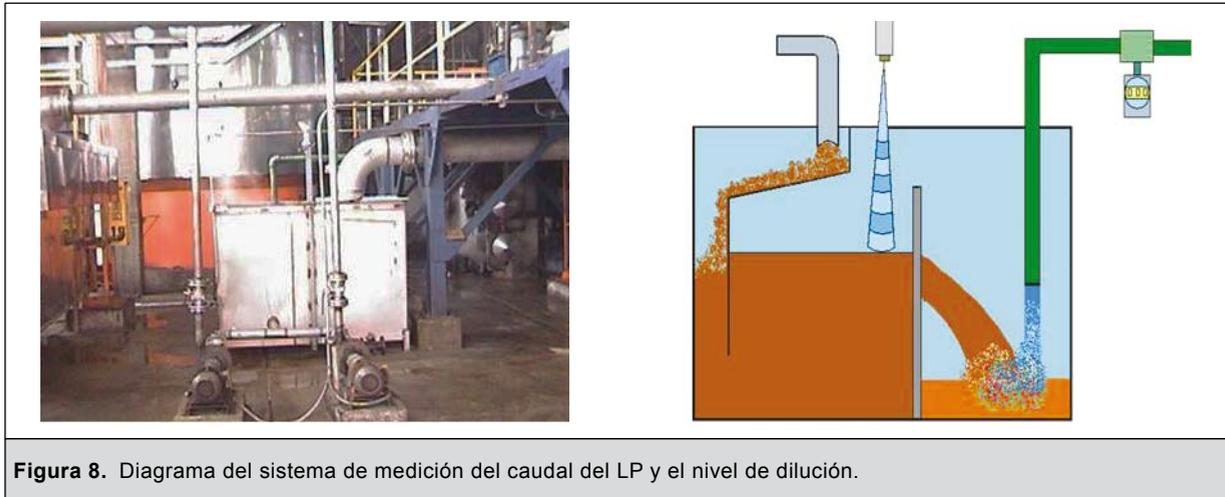


Figura 8. Diagrama del sistema de medición del caudal del LP y el nivel de dilución.



Figura 9. Vertedero para la medición de caudal LP.

El funcionamiento del lazo consiste en detectar un cambio de flujo del licor de prensa mediante el nivel en el tanque, utilizando el vertedero. Para ello se instaló un sensor de ultrasonido cuya señal es llevada a un Controlador Lógico Programable (PLC, por su sigla en inglés), con el cual se calculó el flujo de aceite contenido en el licor de prensa. Con este caudal de aceite se determinó el caudal de agua de dilución requerido en ese instante, enviando una señal para manipular una válvula proporcional, de tal forma que se cumpliera el requerimiento de agua.

Posteriormente, tanto el agua de dilución como el LP se mezclaron en la zona de dilución del tanque con vertedero y se bombearon al tamiz y finalmente a clarificación. Este bombeo fue controlado, utilizando variadores de velocidad en los motores de las bombas, lo cual permitió aplicar la energía necesaria para mover el caudal que en ese momento se estaba manejando y

así evitar esfuerzos innecesarios para provocar la emulsificación de las gotas de aceite (Figuras 8 a 10).

El sistema de control automático está compuesto por los elementos y equipos de medición mostrados en la Tabla 1.

Teniendo en cuenta que la dilución de 1,4 ($\%vol_{aceite}/\%vol_{agua}$) genera una reducción en el flujo de efluentes de la planta de beneficio, respecto a la dilución tradicional del 8%, se estima en la Tabla 2 el impacto de la recuperación de aceite:

La recuperación de aceite, teniendo en cuenta solamente la diferencia en los caudales de efluentes, refleja un ahorro de 0,6 Kg de aceite por Ton de RFF. Considerando el precio del aceite de palma para 2008, en promedio, reportó un valor de 2.000 \$/Kg (Fedepalma, 2008), se calcula una recuperación de 1.176 \$/Ton de RFF extra.

b) Evaluación del sistema para el control automático de la dilución del LP.

Como se mencionó en la metodología, la evaluación del sistema de control consta de dos partes: una

Tabla 1. Instrumentación y equipos necesarios en el sistema de control automático	
Instrumento	
Sensor de nivel ultrasonido	
Válvula proporcional neumática	
Tanque con vertedero	
Sensor y transmisor de flujo magnético	
Mano de obra y material de montaje	
Total	



Tabla 2. Impacto en la recuperación de aceite, debido al ajuste de dilución y control automático

Dilución (Aceite/agua)	Caudal de agua dilución (m3/Ton RFF)	Caudal de efluentes (m3/RFF)	Pérdida de efluentes (g aceite /L)	Aceite perdido Kg/Ton RFF
1	0,2325	0,82 1	8,4 (prom. Zona Norte, 2005)	6,9
1,4	0,166	0,75	8,4	6,3

Tabla 3. Tiempo de respuesta del sistema de control para cada nivel de perturbación

Perturbación (Cambio # prensas operación)	Tiempo de respuesta (min.)
1-2	2.24
2-1	3.05
2-3	3.27
3-2	2.61
3-4	3.43
4-3	3.24

destinada a determinar el tiempo de respuesta a la perturbación, y otra a la evaluación de la confiabilidad del sistema de dilución durante el proceso normal. En la Tabla 3 se presentan los tiempos de respuesta establecidos para cada variación en la capacidad de procesamiento en planta.

El tiempo de respuesta promedio establecido para el sistema fue de 2,9 min. para cambios de flujo de licor de prensa entre 30 al 100% de la capacidad máxima de procesamiento o flujo máximo del licor de prensas. Las perturbaciones que se presentan en el sistema se deben al cambio en el flujo del licor de prensa, dependiendo a su vez del encendido o apagado de las diferentes prensas instaladas en la planta.

Considerando la segunda parte de la evaluación del sistema de control (Figura 10), se muestra en promedio el *Off Set* (la variación con relación al *Set Point*, valor fijado o de control) de la dilución en operación normal del proceso, para los diferentes niveles operacionales de prensado y, por tanto, del LP.

En la Figura 10 se aprecia que para dos, tres y cuatro prensas en operación, el nivel de dilución entre ellas fue de 1,5 (%vol_{aceite}/%vol_{agua}), lo que representa un valor en el *Off Set* de 0,1 con respecto al *Set Point* de 1,4 (%vol_{aceite}/%vol_{agua}). Para el flujo de LP de una prensa en operación (9 Ton RFF/h) el *Off Set* alcanzó un valor de 0,7; esto se debe a que en valores bajos de flujo de LP se tienen bajos flujos

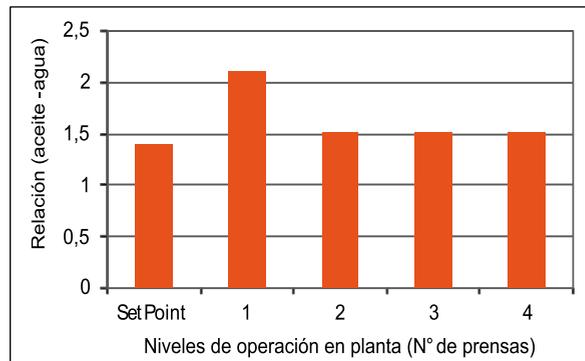


Figura 10. Variación de la dilución respecto al Set Point para cada nivel operacional.

de agua de dilución, que la válvula proporcional no puede manipular apropiadamente; de todas formas, por lo general la planta no opera en este nivel de flujo tan bajo.

Con el propósito de evaluar el beneficio de la implementación del sistema automático versus el control manual, se realizó la comparación (Tabla 4) del comportamiento de la relación de dilución aceite/agua, antes y después de la instalación del sistema de control automático.

Considerando la desviación (S.D.) de la dilución reportada por cada uno de los sistemas de control, se observa una reducción de 0,57 del manual a 0,29, aproximadamente 50% menos de desviación para el sistema automático. Con lo anterior y teniendo en cuenta la reducción del coeficiente de variación (C.V.)

Tabla 4. Variación de la dilución con el sistema de control

	Dilución 1	Dilución 1,4 Manual	Dilución 1,4 Automático
S.D	0,44	0,57	0,29
C.V	42	37	20
Dilución promedio	1,0	1,5	1,4

alcanzado con el sistema automático, desde 37 a 20, se puede concluir que el sistema de control permite mantener el valor de dilución constante y cercano al *Set Point* ($1,46 \text{ \%vol}_{\text{aceite}}/\text{\%vol}_{\text{agua}}$).

Estas variaciones significan que mediante el control manual se presentan cambios en la dilución, de un 37% alrededor del punto establecido, consumiendo más agua o dejando en su ausencia al proceso de clarificación. En general, con el sistema automático se obtienen resultados que establecen un proceso que se desarrolla en forma más estable y que la respuesta a las perturbaciones es adecuada. Además, se presenta mejor manejo del agua de dilución, representando mayor eficiencia del sistema de clarificación, además de ofrecer un uso más racional del agua desde el punto de vista ambiental.

Conclusiones

Existe un efecto directo del nivel de dilución del licor de prensa en la eficiencia y velocidad de separación en la clarificación estática.

El nivel de dilución 1,4 ($\text{\%vol}_{\text{aceite}}/\text{\%vol}_{\text{agua}}$) mostró los mejores resultados de eficiencia y velocidad de separación, alcanzando valores de 75% y 7,71% ml/min, respectivamente.

El fluido licor de prensa diluido es un fluido no-newtoniano pseudoplástico, que sometido a

esfuerzos típicos de proceso tiende a disminuir su viscosidad.

Considerando los fundamentos de la Ley de Stokes y los resultados de la caracterización reológica, el determinante de la separación del licor de prensa diluido es el tamaño de partícula que impera sobre la viscosidad, teniendo en cuenta la dispersión de las gotas de aceite en el fluido.

El sistema de control automático del nivel de la dilución permite mantener los valores de esta variable cercanos al *Set Point*, ya que reporta valores de *Off Set* inferiores a los reportados por el control manual.

El nivel de dilución constante evita perturbaciones en la dinámica de separación y recoge variables fundamentales consideradas en este trabajo, como el tiempo de residencia, la dispersión de aceite y su viscosidad. Estos factores sumados promueven una mejor separación, ahorro de agua y eficiencia del proceso.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo brindado por la empresa Aceites S.A., en especial al director de la planta de beneficio, el Ing. José Francisco Granados, para la realización de este trabajo, así como a Fedepalma - Fondo de Fomento Palmero por la financiación del mismo.



Bibliografía

- Al-Zuhair, Sulaiman. 2003. Using Liquid-liquid Deep Settling Model in Determining the Design Parameters of Crude Palm Oil Settler. School of Engineering Taylor's Collage. Malaysia.
- Bird, Byron. 1992. Fenómenos de transporte. Revete, México, Pp. 1-3 y 1-15.
- Cenipalma. 1993. Curso "Algunos aspectos del procesamiento de aceite de palma". Bucaramanga. Diciembre. 1993.
- Corripio, A; Smith, C. 1997. Control automático de procesos. Cuarta Edición. México. Limusa. Pp. 17-26.
- McCabe, Warren; Smith, C. 1998. Operaciones unitarias en ingeniería química. McGraw Hill. Cuarta Edición. 1998. Pp. 1031-1040.
- Mora, M.; Yáñez, E. 1998. Diagnóstico tecnológico y ambiental del proceso de extracción de aceite de palma. Tesis de grado de Ingeniería Química. 1998. Ceiam-UIS.
- Yáñez, E.; García, J. Reducción de pérdidas de aceite y almendra en plantas de beneficio en Colombia. Conferencia internacional sobre palma de aceite. Palmas. Edición Especial, Vol. 2.