

**ESTUDIO DEL NIVEL DE DILUCIÓN APROPIADO DEL LICOR DE PRENSA EN
EL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE PALMA, APOYADO EN EL
DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO.**

OSCAR MAURICIO DÍAZ RODRÍGUEZ

**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-QUÍMICAS
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
BUCARAMANGA**

2005

**ESTUDIO DEL NIVEL DE DILUCIÓN APROPIADO DEL LICOR DE PRENSA EN
EL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE PALMA, APOYADO EN EL
DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO**

AUTOR

OSCAR MAURICIO DÍAZ RODRÍGUEZ

**Proyecto de grado para optar al título
de Ingeniero Químico**

DIRECTOR

Ph.D. EDGAR FERNANDO CASTILLO MONRROY

CO-DIRECTOR

ING. EDGAR EDUARDO YAÑEZ ANGARITA

**Director (e) Área de procesos y usos
Cenipalma**

**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-QUÍMICAS
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
BUCARAMANGA**

2005

DEDICATORIA

A mi padre Jorge, por ser ejemplo de fortaleza y dedicación;

A mi madre Luz Mery, por su amor y apoyo incondicional a lo largo de mi vida.

A mi hermana Adriana, por su actitud decidida ante la vida y las palabras de aliento en el momento adecuado.

A mi hermano Jorge Andres, por su compañía, chistes y sonrisa que siempre permitieron ver la vida de una manera más amena.

A mi abuelo Alfredo Rodríguez, por cuidarme y acompañarme siempre.

A mi abuelita Elvia, por su infinito amor y comprensión.

A mi abuelita Georgina por enseñarme el valor de la lealtad.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Centro de Investigación en Palma, CENIPALMA, por haberme dado la oportunidad de aprender con este trabajo de grado y en especial al Ingeniero Edgar Yáñez Angarita, por la orientación y los conocimientos aportados para que este trabajo se pudiera llevar a cabo.

Al Ingeniero José Francisco Granados de la extractora ACEITES S.A, por el apoyo incondicional y por la confianza dada a la realización de este proyecto.

Al personal de Laboratorio de la extractora ACEITES S.A, Onasis, Mane, José y Jaime, por su amistad y colaboración.

A los ingenieros Carolina Hernández, Edwin Marsiglia y Exiles Torres de ACEITES S.A, por sus ideas y conocimiento que permitieron la culminación de este trabajo.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	10
1. CONCEPTOS TEORICOS.....	3
1.1. ACEITE CRUDO DE PALMA	4
1.1.1 Generalidades del aceite crudo de palma.....	4
1.1.2 Descripción de las etapas del proceso	4
1.1.3 Clarificación de licor de prensa.....	6
1.2 GENERALIDADES DE REOLOGIA	8
1.2.2 Tipos de Fluidos	9
1.2.3 Modelos reológicos	11
1.3 CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE HIDROCOLOIDES.....	14
1.3.1 Generalidades.....	14
1.3.2 Mucílagos.	15
1.4 FUNDAMENTOS DEL CONTROL AUTOMÁTICO INDUSTRIAL	18
1.4.1 Componentes básicos del sistema de control.	19

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL	22
2.1.DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA Y LA VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN DEL LICOR DE PRENSAS DILUIDO A DIFERENTES COMPOSICIONES.	22
2.1.1 Diseño del experimento.....	22
2.1.2 Metodología Específica del Ensayo de Sedimentación.....	23
2.1.2.1 Procedimiento de pruebas de Sedimentación.	23
2.2 DESARROLLO DE CURVAS REOLÓGICAS PARA LAS MEZCLAS LICOR DE PRENSA-AGUA.....	26
2.2.1 Desarrollo Experimental	26
2.3 EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE SEPARACIÓN ANTES Y DESPUÉS DE LA SECCIÓN TAMIZ-BOMBA.....	26
2.3.1 Desarrollo Experimental	26
2.3.2 Procedimiento para el muestreo y evaluación de la sección tamiz-bomba... ..	27
2.4 EVALUACIÓN DE TENSOACTIVOS NATURALES COMO COAYUDANTES EN LA CLARIFICACIÓN.....	29
2.4.1 Desarrollo Experimental	29
2.4.2 Metodología de extracción del mucílago Vegetal.	29
2.5 DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA PARA EL CONTROL AUTOMÁTICO DE LA DILUCIÓN DEL LICOR DE PRENSA.....	32

2.5.1 Metodología específica del diseño del sistema de control automático de la dilución del licor de prensa.	32
2.5.2 Metodología específica de la evaluación del sistema de control automático de la dilución del licor de prensa.	33
3. RESULTADOS Y ANALISIS	35
3.1. DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA Y LA VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN DEL LICOR DE PRENSAS DILUIDO A DIFERENTES COMPOSICIONES.	35
3.1.1 Monitoreo del Licor de Prensa	35
3.1.2 Pruebas de Sedimentación para las diferentes mezclas aceite-agua.....	35
3.2 Desarrollo de las curvas reológicas para las mezclas licor de prensa-agua.	38
3.2.1 Modelamiento de las curvas reológicas	40
3.3 EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE SEPARACIÓN ANTES Y DESPUÉS DE LA SECCIÓN TAMIZ-BOMBA.....	42
3.4 EVALUACIÓN DE MUCÍLAGOS TENSOACTIVOS NATURALES COMO COAYUDANTES EN LA CLARIFICACIÓN.	44
3.5 DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA PARA EL CONTROL AUTOMÁTICO DE LA DILUCIÓN DEL LICOR DE PRENSA.....	46
3.5.1 Diseño de un sistema para el control automático de la dilución del LP.	46
3.5.2 Evaluación del sistema para el control automático de la dilución del LP.	51
4. CONCLUSIONES	55

5. RECOMENDACIONES.....	57
6. BIBLIOGRAFIA.....	58
ANEXOS.....	60

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Hidrocoloides naturales	15
Tabla 2. Esquema para la realización de ensayos de sedimentación.	23
Tabla 3. Análisis de varianza para la eficiencia de separación por tratamiento de dilución.*	35
Tabla 4. Análisis de varianza para la velocidad de separación por tratamiento de dilución.....	36
Tabla 5. Parámetros del modelo de la ley de potencia para las diferentes diluciones.	41
Tabla 6. Tiempo respuesta para cada perturbación.....	51
Tabla 7. Variación de la dilución con el sistema de control.	53

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Curvas de flujo típicas para los flúidos.	9
Figura.2 Esquema del montaje de pruebas de sedimentación.	24
Figura 3. Etapa de extracción y clarificación. Puntos de muestreo.....	27
Figura 4. Limpieza y maceración de las cortezas.	31
Figura 5. Corte en cuadros del guasimo.	31
Figura 6. Proceso de lixiviación de los tensoactivos (mucílagos).	31
Figura 7 Curva característica de eficiencia de separación respecto tiempo	38
Figura 8. Curva de Fluides. LPD T= 44 °C.....	39
Figura 9 Curva de viscosidad LPD, T= 44 °C	39
Figura 10.Comparación para eficiencia de separación por sección.....	42
Figura 11.Comparación de velocidad de separación por sección.....	43
Figura 12. Incremento de eficiencia de separación para los tratamientos con mucílagos_ tensoactivos con respecto al testigo	44

Figura 13. Velocidad de separación por material mucilaginoso tensoactivo y testigo.	45
Figura 14. Diagrama de diseño del sistema de control.	46
Figura 15. Esquema de la operación del tanque de dilución	47
Figura 16. Montaje en planta del sistema de dilución automática.....	48
Figura 17. Dimensiones vertedero del tanque de dilución.	49
Figura 18. Vertedero del tanque de dilución.	49
Figura 19. Dimensiones tanque dilución con vertedero.	50
Figura 20. Variación de la dilución respecto al set pont	52

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Diagrama de Bloques del sistema de control de dilución.	60
Anexo B. Especificaciones técnicas de los instrumentos de control.....	61
Anexo C. Diagrama de Bode	63
Anexo D. Rootlocusplot (lugar geométrico de la raíces).....	64
Anexo E. Curvas de Respuesta a las perturbaciones de flujo, del sistema de control de dilución.....	65

RESUMEN

TITULO: ESTUDIO DEL NIVEL DE DILUCIÓN APROPIADO DEL LICOR DE PRENSA EN EL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE PALMA, APOYADO EN EL DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO*.

AUTOR: DÍAZ RODRÍGUEZ, Oscar Mauricio **

PALABRAS CLAVE: Estudio, Nivel de dilución, Licor de Prensa, Control Automático

DESCRIPCIÓN

En este trabajo se evaluaron 8 niveles de dilución del licor de prensa en un rango entre 0.8 y 1.4 vol aceite/agua, en pruebas de sedimentación en un baño termostataado. De esto se determinó la relación de dilución 1.4 vol aceite/agua como la mejor en cuanto a eficiencia y velocidad de separación. Por otro lado, se llevó a cabo el estudio reológico para mezclas licor de prensa-agua, lo cual permitió definir el licor de prensa diluido como un fluido no-newtoniano pseudoplástico, con el cual se trabaja de igual forma en la etapa de clarificación.

Se evaluó también, el efecto de tensoactivos naturales: Guasimo, Balso y Cadillo como coayudantes en la clarificación. De lo anterior se obtuvo que todos los tratamientos con tensoactivos mejoraban considerablemente la eficiencia y velocidad de recuperación de aceite. Además, se evaluó el efecto de los esfuerzos mecánicos aplicados al licor de prensa por el bombeo y tamizado antes de la etapa de clarificación. Encontrándose, que estos esfuerzos generan un efecto de emulsificación sobre el fluido disminuyendo de esta forma la eficiencia y velocidad en la sedimentación. Por otro lado, se diseñó y evaluó un sistema de control que permite garantizar una dilución adecuada (1.4 vol.aceite/agua) y ajustada a las condiciones reales de procesamiento, que permitan 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 del proceso.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química, Director del proyecto: Ph.D. Edgar Fernando Castillo Monrroy

ABSTRAC

TITLE: STUDY OF THE APPROPRIATE DILUTION LEVEL FOR THE PRESS LIQUOR IN THE PALM OIL EXTRACTION PROCESS, SUPPORTED ON TE DESIGN AND EVALUATION OF AN AUTOMATIC CONTROL SYSTEM*.

AUTHOR: DÍAZ RODRÍGUEZ, Oscar Mauricio **

KEYWORDS:

- Study
- Dilution Level
- Press liquor
- Automatic control

DESCIPTION OF THE CONTENTS

In this work 8 levels of the press liquor dilution were evaluated in a range between 0.8 and 1.4 vol oil/water, in sedimentation tests during an isothermic bathroom. The dilution relationship 1.4 vol oil/water was determined like the best in efficiency and separation speed. On the other hand, it was carried out the reologic study for press-water liquor mixtures which allowed to define the diluted press liquor as a pseudoplastic fluid no-newtonian to work in the same way during the clarification stage.

The effect of mucilages natural: Guasimo, Balso and Cadillo, was also evaluated like promoters in the clarification. It was determined that all the treatments with natural mucilages improved considerably the efficiency and speed oil recovering. Also, the effect of the mechanical efforts applied to the press liquor by the pumping and sifted before the clarification stage, was evaluated. Finding that these efforts generate an emulsification effect on the fluid diminishing in this way it's efficiency and speed in the sedimentation. On the other hand, it was designed and evaluated a control system that allows to guarantee an appropriate dilution (1.4 vol.oil/water) and adjust it to the real conditions of prosecution. It allows a quick separation of oil, a global increasing efficiency of the process and the reduction of the environmental impact due to the decrease in the water consumption process.

* Degree Work

** Engineering Physical-Chemistry Faculty, Chemical Engineering School, Theis Manager: P.h.D. Edgar Fernando Castillo Monrroy

INTRODUCCIÓN

Las plantas extractoras de aceite de palma, tienen como uno de sus objetivos, reducir las pérdidas de aceite en las diferentes etapas del proceso. Considerando lo anterior y teniendo en cuenta que las pérdidas en los efluentes son el 37% de las pérdidas totales durante el proceso, se ve la necesidad de optimizar la operación de clarificación de la cual depende en gran medida el contenido de aceite en efluentes. El factor de dilución del licor de prensa es la variable de mayor importancia en clarificación pues de esta depende directamente la viscosidad de todo el fluido y por ende la eficiencia y velocidad de recuperación del aceite. Este proyecto busca encontrar el factor de dilución adecuado para realizar una clarificación de manera más eficiente y validar los parámetros de diseño de esta etapa que fueron fijados hace 40 años con factor de dilución en volumen 1 aceite/agua, además de diseñar un sistema de control automático que permita mantener estable este factor durante el proceso. Por otro lado se lleva a cabo el estudio reológico que permite identificar las características del fluido licor de prensa con el cual se trabaja de igual forma en la etapa de clarificación. Se considera además, la evaluación del efecto del bombeo del licor de prensa, sobre la separación de aceite en clarificación. Además, se evalúan los efectos de los mucílagos naturales que son Guasimo, Balso y Cadillo, los cuales actúan como agentes tensoactivos coayudantes en la clarificación de los jugos de caña en el proceso de fabricación de la panela, del cual se tiene referencia.

El contenido del presente libro se distribuye en 6 capítulos básicamente, de la siguiente forma. El capítulo 1, presenta los conceptos teóricos tenidos en cuenta para desarrollar el proyecto. En el se hace primero la descripción del proceso de extracción de aceite de palma, haciendo énfasis en la etapa de clarificación. Por otra parte, se muestran generalidades de reología, de mucílagos vegetales

(tensoactivos) y finalmente de control automático industrial. El capítulo 2, muestra el desarrollo experimental seguido para alcanzar los objetivos propuestos en el presente trabajo. De igual forma, los resultados de los experimentos se reportan en capítulo 3, considerando la respectiva discusión y análisis. Finalmente en el capítulo 4 se presentan las conclusiones del trabajo y en los capítulos 5 y 6, las recomendaciones y bibliografía.

OBJETIVOS

General

Estudiar el comportamiento reológico de las mezclas licor de prensas – Agua, para definir la dilución apropiada que permita incrementar la recuperación de aceite apoyado en el diseño de un lazo de control automático.

Específicos

- Determinar la eficiencia y la velocidad de sedimentación del licor de prensas diluido a diferentes composiciones volumétricas.
- Desarrollar las curvas de viscosidad – composición para las mezclas licor de prensas – Agua.
- Evaluación de la eficiencia de separación antes y después de la sección tamiz-bomba.
- Evaluar el uso de tensoactivos naturales como coayudantes en clarificación.
- Diseño y evaluación de un sistema para el control automático de la dilución del licor de prensa.

1. CONCEPTOS TEORICOS

En este capitulo se presentan conceptos teóricos tenidos en cuenta en el desarrollo del presente trabajo. Su contenido considera primero una descripción general del proceso de extracción de aceite de palma, haciendo énfasis en la etapa de clarificación. Por otra parte, se muestran generalidades de reología, de extracción y utilización de mucílagos vegetales (tensoactivos) y finalmente de control automático industrial.

1.1. ACEITE CRUDO DE PALMA

1.1.1 Generalidades del aceite crudo de palma. El aceite crudo de palma, proviene de la palma africana (*Elaeis guineensis*) originaria del Golfo de Guinea e introducida al país en 1932. La palma de aceite es una oleaginosa perteneciente a la familia de las monocotiledóneas. Su fruto se encuentra adherido al raquis, formando los racimos. El fruto está compuesto por el mesocarpio y la nuez. En el mesocarpio se almacena el aceite crudo y en la nuez se encuentra la almendra que es de donde se obtiene el aceite de palmiste.

Colombia es el cuarto productor mundial de aceite crudo de palma y el primer productor latinoamericano. Actualmente en el país existe un área sembrada en palma superior a las 14000 hectáreas, distribuidas en 4 zonas productoras de acuerdo a su ubicación geográfica: zona norte, zona central, zona oriental y zona occidental.

1.1.2 Descripción de las etapas del proceso. Las etapas principales

consideradas en el proceso son: esterilización, desfrutado, digestión, prensado, clarificación y secado.

1.1.2.1 Recepción de Fruto. Los racimos de fruta son llevados a la planta extractora desde el campo, donde son pesados en báscula y almacenados en las tolvas para posteriormente ser alimentados por medio de vagonetas de 2.5 Ton de capacidad a la etapa de esterilización.

1.1.2.2 Esterilización. Esta operación se realiza en autoclaves horizontales, donde se alimentan las vagonetas cargadas de fruta. El proceso se realiza en dos o tres picos de presión que oscilan entre 2 y 3 Kgf/cm², previa desaireación del autoclave y descarga del vapor condensado entre pico y pico.

La esterilización tiene como objetivos: detener la formación de ácidos grasos libres, debilitar los tejidos del mesocarpio con el fin de disminuir su resistencia a ser macerados en los digestores y acelerar el ablandamiento de la unión de los frutos al raquis en busca de una separación más fácil en el desfrutado.

1.1.2.3 Desfrutación. Esta etapa se realiza en un desfrutador, el cual es un tambor rotatorio que por medio del golpeteo permite separar la fruta esterilizada del raquis. Usualmente el raquis es utilizado como fertilizante de potasio en las plantaciones de palma.

1.1.2.4 Digestión. El fruto separado en el desfrutado, es alimentado a los digestores. Estos son tanques cilíndricos en donde el fruto se macera, con el fin de romper vasos lipógenos y liberar el aceite. Esto se logra a una temperatura de 95 °C durante 20 minutos.

1.1.2.5 Extracción por prensado. El fruto digerido es alimentado por gravedad a las

prensas de tornillo, que trabajan entre 90 y 100 Kgf/cm², contra la presión de unos conos ubicados a la salida, estos ejercen la acción de prensado extrayendo el aceite. El aceite extraído contiene impurezas orgánicas (material vegetal) e inorgánicas (arena) y se envía al proceso de clarificación. La masa del mesocarpio (fibra) y las nueces, conocida como torta, es enviada a palmistería.

1.1.2.6 Clarificación. La clarificación es básicamente una etapa de separación del aceite de agua, lodo (material celular) por decantación, gracias a la diferencia de densidad existente entre sus componentes (aceite < lodos ligeros < agua < lodos pesados) y a la temperatura que disminuye la viscosidad del aceite para facilitar su separación de los lodos.

1.1.2.7 Centrifuga desludadora. Recupera el aceite presente en las aguas lodosas provenientes de clarificación. El efluente de las desludadoras es conducido a piscinas de oxidación y el aceite recuperado es llevado a secado.

1.1.2.8 Secado. El aceite proveniente de clarificación es llevado a los tanques secadores. Esta operación se realiza a una temperatura aproximadamente de 110 °C, con el fin de obtener un producto de humedad del 0.1 %.

1.1.2.9 Almacenamiento. El aceite secado, es almacenado en tanques con calentamiento para posteriormente ser despachado en carro tanques para los clientes finales.

1.1.3 Clarificación de licor de prensa.

1.1.3.1 Definición. Método de separación, basada en la sedimentación de las partículas sólidas o gotas de líquido a través de un fluido por el efecto de la fuerza de gravedad.

1.1.3.2 Objetivo. Retirar impurezas de tipo vegetal (solubles e insolubles), arena y agua contenidas en el licor proveniente del prensado del mesocarpio del fruto de la palma de aceite.

El licor de prensa diluido, es tamizado y posteriormente alimentado al clarificador estático, donde por diferencia de densidad es separado el aceite en la parte superior y los lodos en la parte inferior. El aceite es recuperado por colectores que lo llevan a la etapa de secado. Mientras que los lodos, que contienen aceite (6-9 %vol/vol), son centrifugados para recuperarlo.

1.1.3.3 Características físicas del licor de Prensa Diluido

- *Composición.* El licor de Prensa está constituido por aceite, agua y sólidos; los rangos de composición son los siguientes: Aceite 40-75 %vol/vol; agua 10-40 %vol/vol y sólidos 6-25 %vol/vol

- *Mecánica y conducta.* Desde el punto de vista de la mecánica de fluidos, el licor de prensa diluido es un fluido aceitoso disperso en un medio fluido (lodos). La velocidad de ascenso de las gotas de aceite esta descrita por la ley de Stokes de la siguiente forma:

$$v = \frac{g * (\rho_l - \rho_a) * d^2}{18 * \eta}$$

Donde:

V: velocidad de ascenso de la gota de aceite

g: fuerza de la gravedad

ρ_l : Densidad del lodo

ρ_a : Densidad del aceite

d : diámetro de la gota de aceite

η : viscosidad del fluido

Diámetro de partícula (d): La velocidad de ascenso depende directamente del cuadrado del diámetro de las gotas de aceite. Teniendo en cuenta, que gotas con diámetros inferiores a 15 μm no son separables del licor. Los factores que afectan el tamaño de las gotas son: sobredigestión, efecto de los tamices vibratorios y el calentamiento con vapor directo.

Viscosidad (η): Es la medida de la resistencia a fluir y es ocasionada por la fricción entre las capas del fluido. Según la ecuación anterior, la velocidad de sedimentación es inversa a la viscosidad. Los parámetros que se pueden manejar para disminuir la viscosidad con el fin de optimizar la velocidad de separación son:

- a. Temperatura: debe mantenerse en un rango entre 90-95 °C
- b. Dilución: Como el licor de prensa es altamente viscoso, se hace necesario adicionar agua de dilución para lograr una buena separación. Tradicionalmente la dilución usada en clarificación es de 1 ml aceite/ml agua, (35% Aceite vs. 35 % Agua en LPD), encontrada experimentalmente. Según Beltrán (1989), la clarificación con exceso de agua se vuelve ineficiente, por lo tanto es importante aplicar el nivel adecuado que permita optimizar la separación de aceite.
- c. Esfuerzo Cortante: permite disminuir la viscosidad debido a la naturaleza no-newtoniana del licor de prensa diluido.

1.2 GENERALIDADES DE REOLOGIA

Es la ciencia del flujo y la deformación, que estudia las propiedades mecánicas de

los fluidos.

1.2.1 Viscosidad: Es la medida de fricción interna del fluido. Su cálculo se realiza dividiendo el esfuerzo de corte τ por la velocidad de corte γ . La viscosidad aparente se define por la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{\tau}{\gamma} * 100$$

- η viscosidad aparente [=] cp
- τ [=] dinas/cm²
- γ [=] s⁻¹

1.2.2 Tipos de Fluidos. Los fluidos pueden clasificarse en dos grandes grupos: los newtonianos y los no newtonianos. En la figura 1 se muestra las curvas de flujo para los diferentes tipos de fluidos.

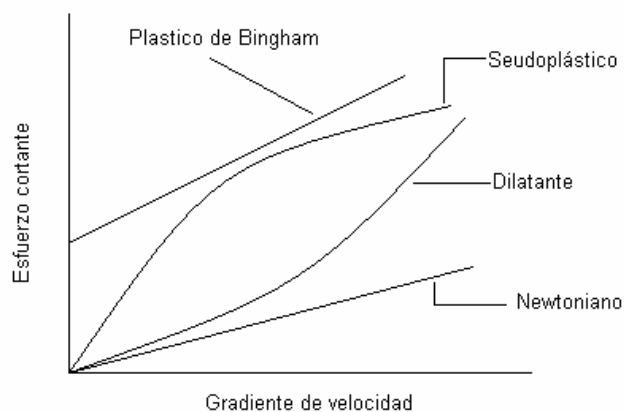


Figura 1. Curvas de flujo típicas para los fluidos.

1.2.2.1 Fluido Newtoniano. Son aquellos para los cuales el esfuerzo cortante es proporcional al gradiente de velocidad.

$$\tau_{yx} = -\mu * \frac{dv_x}{dy}$$

1.2.2.2 Fluídos no-newtonianos. Son fluídos que no obedecen a la ley de Newton, es decir que su curva de flujo no es lineal. El comportamiento reológico, en estado estacionario, de estos fluídos, puede establecerse de la forma generalizada de la siguiente ecuación:

$$\tau_{yx} = -\eta * \frac{dv_x}{dy}$$

En la que η puede expresarse a su vez en función de $\frac{dv_x}{dy}$ o de τ_{yx} indistintamente. En las regiones donde la viscosidad aparente disminuye el aumentar el gradiente de velocidad, el comportamiento se denomina pseudo plástico; dilatante en las que la viscosidad aparente aumenta con dicho gradiente. Si dicha viscosidad aparente resulta independiente del gradiente de velocidad, el fluido se comporta como newtoniano entonces $\eta=\mu$.

Los fluídos no-newtonianos pueden dividirse en dos categorías principales de acuerdo con su comportamiento de esfuerzo cortante/velocidad cortante, fluídos dependientes e independientes del tiempo.

1.2.2.2.1 Fluídos independientes del tiempo.

- Fluido plástico de Bingham: Son fluídos que no fluyen hasta que no alcanzan un esfuerzo cortante mínimo τ_0 (limite de fluidez) y después fluyen linealmente

cuando el esfuerzo es superior a este. Ejemplo: lodos de perforación, suspensiones de turba, margarina, mezclas de chocolate, grasas, jabones, etc.

- Flúidos pseudo plásticos: Para este tipo de fluidos la viscosidad aparente disminuye al aumentar el esfuerzo cortante. Ejemplo: fusiones de polímeros, grasas, suspensiones de almidón y pinturas, entre otras.

- Flúidos Dilatantes: Son similares a los pseudo plásticos en que no requieren esfuerzo mínimo, pero la viscosidad aparente para estos materiales aumenta con los gradientes de velocidad.

1.2.2.2 Flúidos Dependientes del tiempo

- Tixotrópicos: estos flúidos presentan una disminución reversible del esfuerzo cortante con el tiempo, cuando la velocidad cortante es constante. Este esfuerzo cortante tiende a un valor límite que de la velocidad cortante. Entre los principales ejemplos pueden incluirse algunas soluciones de polímeros, la manteca y algunos materiales alimenticios.

- Reopécticos: son muy raros y exhiben un aumento reversible del esfuerzo cortante con el tiempo cuando la velocidad cortante es constante. Algunos ejemplos son: suspensiones de arcilla Bentonítica, algunos soles y las suspensiones de yeso.

1.2.2.2.3 Flúidos Visco elásticos. Los flúidos de esta naturaleza exhiben una recuperación elástica de las deformaciones que se presenta durante el flujo, es decir, muestra propiedades tanto viscosas como elásticas. Parte de la deformación se recupera al eliminar el esfuerzo.

1.2.3 Modelos reológicos. Se han propuesto numerosas ecuaciones empíricas o

modelos, para expresar la relación existe, en estado estacionario, entre $\frac{dv_x}{dy}$ y τ_{yx} . A continuación se presenta un resumen de cinco modelos representativos. Todas las ecuaciones contienen parámetros empíricos positivos.

1.2.3.1 Modelo de Bingham

$$\tau_{yx} = -\mu_0 * \frac{dv_x}{dy} \pm \tau_0 \quad \text{Si } |\tau_{yx}| > \tau_0$$

$$\frac{dv_x}{dy} = 0 \quad \text{Si } |\tau_{yx}| < \tau_0$$

Toda sustancia que se comporta de acuerdo con este modelo de dos parámetros se denomina plástico de Bingham; permanece rígida mientras el esfuerzo cortante es menor que un valor determinado.

1.2.3.2 Modelo de Ostwald-de Waele.

$$\tau_{yx} = -m \left| \frac{dv_x}{dy} \right|^{n-1} \frac{dv_x}{dy}$$

Esta ecuación de dos parámetros se conoce también con el nombre de la ley de potencia. Para n=1 se transforma en la ley de la viscosidad de Newton, siendo m=μ; por consiguiente, la desviación del valor de n con respecto a la unidad es la medida del grado de desviación del comportamiento newtoniano. Cuando n es menor que uno el comportamiento es pseudo plástico, mientras que para valores superiores a la unidad es dilatante.

1.2.3.3 Modelo de Eyring. Este modelo de dos parámetros deriva de la teoría cinética de los líquidos, de Eyring. Este modelo predice el comportamiento pseudoplástico para valores finitos de τ_{yx} y tiende asintóticamente a la ley de la viscosidad de Newton cuando τ_{yx} tiende hacia cero.

1.2.3.4 Modelo de Ellis

$$-\frac{dv_x}{dy} = (\varphi_0 + \varphi_1 |\tau_{yx}|^{\alpha-1}) \tau_{yx}$$

Este modelo consta de tres parámetros positivos ajustables: φ_0 , φ_1 y α . Si se toma para α un valor mayor que la unidad, el modelo tiende hacia la ley de Newton para valores bajos de τ_{yx} , mientras que si se elige para α un valor menor que la unidad, la ley de Newton se establece para valores elevados de τ_{yx} . El modelo presenta alta flexibilidad y en él están comprendidas como casos particulares, tanto la ley de Newton (para $\varphi_1=0$), como para la ley de potencia (para $\varphi_0=0$)

1.2.3.5 Modelo de Reiner-Philippoff.

$$-\frac{dv_x}{dy} = \left(\frac{1}{\mu_\infty + \frac{\mu_0 - \mu_\infty}{1 + (\tau_{yx} / \tau_s)^2}} \right) \tau_{yx}$$

Este modelo contiene tres parámetros ajustables: μ_0 , μ_∞ y τ_s . Teniendo en cuenta que frecuentemente se ha observado que el comportamiento Newtoniano se presenta, tanto para valores muy bajos como muy elevados del gradiente de velocidad, esta ecuación ha sido planteada con el fin de que se transforme en estos dos casos límite en la ley de Newton de la viscosidad, haciéndose $\mu = \mu_0$ y $\mu = \mu_\infty$ respectivamente.

1.3 CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE HIDROCOLOIDES

1.3.1 Generalidades. Son polímeros que cuando se dispersan en el agua generan espesamiento o gelificación, un sinónimo común es goma o también se usa mucílago.

Los hidrocoloides de polisacáridos pueden ser lineales o ramificados. En general, la capacidad espesante aumenta con relación al peso molecular y se reduce con la ramificación de la cadena. Esto se debe a que las moléculas de cadena recta, extendidas, al girar en una solución ocupan un volumen mayor que las cadenas con ramificaciones que son más compactas. Así, los polímeros lineales de gran tamaño, junto con el agua asociada a ellos chocan con más frecuencia entre sí de lo que lo hacen las moléculas ramificadas de menor peso molecular, estas colisiones impiden el flujo de la solución y provocan un incremento de la viscosidad.

En la Tabla 1, se citan los hidrocoloides naturales principales, y de donde se obtienen. Cada uno posee propiedades características ligeramente distintas, con frecuencia las diferencias importantes desde el punto de vista comercial consisten en propiedades reológicas de las dispersiones de estos en agua.

Tabla 1. Hidrocoloides naturales

Fuente de Obtención	Ejemplo
Semillas de Plantas	Goma de guar, goma de algarrobo
Extractos de Algas	Alginatos, agar, carragenano
Exudados de árboles	Arábigo, tragacanto, Karaya
Frutas cítricas	Pectina
Piel y huesos de animales	Gelatina
Fermentación	Goma de Santana

Los hidrocoloides tienen diversas aplicaciones, estos se emplean en la manufactura del papel porque ayudan a retener partículas de celulosa, **como floculantes** para precipitar lodos minerales, agentes de suspensión en explosivos, espesantes en limpiadores de horno que se basan en álcalis fuertes y como componente del lodo para perforación de pozos petrolíferos.

1.3.2 Mucílagos. El mucílago es un producto orgánico de origen vegetal, de peso molecular elevado, superior a 200.000 g/gmol, cuya estructura molecular completa es desconocida. Están conformados por polisacáridos celulósicos que contienen el mismo número de azúcares que las gomas y pectinas.

Los mucílagos se suelen confundir con las gomas y pectinas, diferenciándose de estas sólo en las propiedades físicas. Mientras que las gomas se hinchan en el agua para dar dispersiones coloidales gruesas y las pectinas se gelifican; los mucílagos producen coloides muy poco viscosos, que presentan actividad óptica y pueden ser hidrolizados y fermentados.

Se forma en el interior de las plantas durante su crecimiento. Se asocia en ocasiones con otras sustancias como los taninos. Se cree que almacena agua, facilita la dispersión y germinación de las semillas, espesa las membranas y sirve de reserva alimenticia. En el país los mucílagos más empleados son los obtenidos

del Balso, Cadillo y el Guásimo, los cuales se utilizan en el proceso de clarificación de los jugos de la caña de azúcar para producir panela.

Su uso depende de la disponibilidad y costumbres de la zona. Una de ellas es la del Valle del Cauca y Risaralda, donde para remover la cachaza negra se usa Guásimo y para la cachaza blanca se emplea cadillo. Además existen otras plantas o productos vegetales de uso no tan generalizado como la "escoba babosa", el "Juan Blanco", la corteza del fruto del cacao, o el fique.

El Cadillo pertenece a la familia de las Tiliáceas (*Triumfetta lappula* L.) es conocida vulgarmente como pega-pega, el mucílago se encuentra en el tallo y las hojas. Para su utilización se construye una escoba con las ramas la cual se introduce en los jugos cuando estos alcanzan aproximadamente 50°-55°C, se agita durante 3 min, se deja calentar, y se retira la cachaza negra cuando se alcanza una temperatura de 85° C aproximadamente. Esta escobilla tiene una vida útil de aproximadamente 6 h.

El Guásimo cuyo nombre científico es *Guázuma Ulmifolia* Lamark, es un árbol frecuente de las llanuras cálidas colombianas por debajo de los 1.200 metros sobre el nivel del mar. Se utiliza comúnmente las cortezas de aproximadamente 10 ramas, las cuales se maceran para ser retiradas de las ramas y facilitar la liberación de los aglutinantes. Con estas cortezas se forma una escoba la cual se trabaja como el cadillo.

El Balso: Es un árbol muy común en los climas templados del país, como la Hoya del Río Suárez. Esta planta es del orden de las Malvales, familia de las Sterculiaceae, su nombre científico es *Heliocarpus popayanensis*. Para su utilización se retira la corteza del árbol teniendo cuidado de cortarlo por cuadros estilo domino, nunca todo el contorno ya que el árbol se muere. Estos cuadros de corteza se maceran o machaca con un mazo con el propósito de liberar los

mucílagos. Se dejan en remojo hasta que forme una solución con una viscosidad de 6 cp (similar a la clara del huevo). Se emplea de esta solución un volumen igual al 2.5% en volumen de jugo, dividido en dos aplicaciones. La primera cuando los jugos han alcanzado una temperatura de 50-55°C. y la segunda cuando los jugos alcanzan 75°-85°C. Se retira la cachaza de la misma forma que en los anteriores.

1.3.2.1 Aplicaciones industriales. En lo que respecta a las aplicaciones del mucílago a escala industrial, institutos como CIMPA (Centro de Investigación para el mejoramiento de la Agroindustria Panelera) realizó experimentos utilizándolo como floculante en el proceso de clarificación de jugos de caña, los cuales se llevan a cabo en dos etapas: En la primera a una temperatura de jugo de 60 ° C, se adiciona 15 ml de disolución (Densidad 1.04 g /ml) por litro de jugo. En la segunda etapa a una temperatura de jugo de 85 ° C, se adicionan 5ml más de disolución por litro de jugo.

1.3.2.2 Extracción de sustancias de origen vegetal.

1.3.2.2.1 Extracción de mucílagos. Los materiales biológicos tienen estructura celular y los constituyentes solubles suelen estar dentro de las células. En ocasiones, la velocidad de lixiviación es bastante baja debido a que las paredes celulares constituyen una resistencia adicional a la difusión. No obstante, es poco práctico moler los materiales biológicos a tamaño suficientemente pequeño para exponer el contenido de las células individuales.

1.3.2.2.2 Métodos de extracción de sustancias de origen vegetal. Los principios activos contenidos en las plantas pueden ser extraídos mediante diversas técnicas extractivas, cuando se utiliza agua como vehículo extractivo recibe el nombre genérico de tisanas, que son preparaciones acuosas en las que se aprovecha el poder de extracción del agua, manteniendo el agua en contacto con la corteza ésta cede parte de sus principios activos a la misma aquellas sustancias que son

solubles en agua ocurriendo un fenómeno de difusión celular; por tanto la extracción de principios activos durará mientras no se alcance un equilibrio osmótico entre protoplasma celular y líquido extractivo en este caso agua.

El proceso involucrado en la preparación del sólido para la obtención de la solución agua-soluto recibe el nombre de maceración, posteriormente se realiza el lavado introduciéndolo en el agua a temperaturas ordinarias durante varias horas. Esta forma de extracción es la que suele emplearse para plantas ricas en mucílagos.

La extracción depende de varios factores como son:

- **Cantidad de agua.** Cuanto mayor sea la cantidad de agua, mas elevado será el agotamiento de los principios activos dentro de la planta.

- **Temperatura.** La infusión o el cocimiento a temperaturas cercanas a los 100 ° C favorecen la extracción, no obstante, a veces conviene hacer la extracción con agua fría ya que puede interesar no extraer determinados principios activos que solamente pasarían al agua con la ayuda del calor.

- **El tiempo.** La duración del contacto de la planta con el agua, el grado de pulverización de ésta, aumenta la extracción mientras más troceada esté, pero hasta ciertos límites a partir de los cuales pueden originarse una serie de procesos químicos que dificulten el proceso.

1.4 FUNDAMENTOS DEL CONTROL AUTOMÁTICO INDUSTRIAL.

Los procesos industriales no son estáticos, por el contrario son muy dinámicos, cambian continuamente debido a los muchos tipos de perturbaciones y precisamente por eso se necesita que los sistemas de control vigilen continua y automáticamente las variaciones que se deben controlar.

En la actualidad los lazos de control son un elemento esencial para la manufactura económica y próspera de virtualmente cualquier producto, desde el acero hasta los productos alimenticios.

Los principios fundamentales del sistema de control se pueden resumir en: **medición** de las variables de proceso, **decisión** tomada en base a las mediciones de las variables del proceso y finalmente la **acción** que se ejecuta de acuerdo a la decisión tomada.

1.4.1 Componentes básicos del sistema de control.

- Sensor: Realiza la operación de medición de las variables en el sistema de control. Los sensores miden variables de presión, temperatura, pH, caudal, etc.

- Transmisor: Convierte la medición del sensor a una señal que se puede transmitir y por lo tanto tiene relación con la variable del proceso.

Existen tres términos importantes que se relacionan con la combinación sensor/transmisor: la escala, el rango y el cero del instrumento.

- Controlador: Los controladores presentan dos tipos de acción: inversa o directa. La acción inversa se presenta cuando hay un incremento en la señal que entra al controlador, entonces se presenta un decremento en la señal que sale del mismo. La acción directa ocurre cuando hay un incremento en la señal que entra al controlador entonces existe un incremento de la señal que sale del mismo.

- Tipos de controladores por retroalimentación

La manera en que los controladores por retroalimentación toman una decisión para mantener el punto de control (set point), es mediante el cálculo de la

salida con base en la diferencia entre la variable que controla y el punto de control.

- Controlador Proporcional (P). El controlador proporcional es el tipo mas simple de controlador, la ecuación que describe su funcionamiento es la siguiente,

$$m(t) = \bar{m} + K_c e(t)$$

Donde:

$m(t)$ = salida del controlador, Psi o mA

$e(t)$ = señal de error, Psi o mA, diferencia entre el punto de control y la variable que se controla.

K_c =ganancia del controlador psi/psi o mA/mA

Los controladores proporcionales tienen la ventaja de que cuenta con solo un parámetro de ajuste K_c , sin embargo, tienen la desventaja de que operan con una desviación.

- Controlador proporcional-integral (PI). La mayoría de los procesos no se pueden controlar con una desviación, es decir, se deben controlar en el punto de control y en estos casos se debe añadir inteligencia al controlador proporcional, para eliminar la desviación. Esta nueva inteligencia o nuevo modo de control es la acción integral o de reajuste, en consecuencia el controlador se convierte en un controlador proporcional integral. La ecuación descriptiva es:

$$m(t) = \bar{m} + K_c e(t) + \frac{K_c}{\tau_i} \int e(t) dt$$

Donde τ_i = tiempo de integración o de reajuste minutos/repetición. Por lo

tanto, el controlador PI tiene dos parámetros, K_c y τ_i , que se deben ajustar para obtener un control satisfactorio.

- Controlador proporcional-integral-derivativo (PID). Algunas veces se añade otro modo de control al controlador PI, este nuevo modo de control es la acción derivativa, que también se conoce como rapidez de derivación o preactuación; tiene como propósito anticipar hacia donde va el proceso, mediante la observación de la rapidez para el cambio del error, su derivada. La ecuación descriptiva es la siguiente:

$$m(t) = \bar{m} + K_c e(t) + \frac{K_c}{\tau_i} \int e(t) dt + K_c \tau_D \frac{de(t)}{dt}$$

Donde τ_D = rapidez de derivación en minutos. Los controladores PID se utilizan en procesos donde las constantes de tiempo son largas, como por ejemplo los circuitos de temperatura y de concentración.

- Elemento final de Control: es el elemento que permite modificar la variable manipulada, por lo general puede ser una válvula.

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En este capítulo se muestra la metodología seguida para desarrollar cada uno de los objetivos propuestos en el presente trabajo. Los experimentos se realizaron en el laboratorio de la planta extractora ACEITES S.A y las muestras de licor de prensa se recolectaron del proceso.

2.1. DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA Y LA VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN DEL LICOR DE PRENSAS DILUIDO A DIFERENTES COMPOSICIONES.

2.1.1 Diseño del experimento. El diseño experimental consiste en ensayos de sedimentación de licor de prensa diluido a diferentes composiciones volumétricas, en un baño termostático a temperatura de 90 °C, midiendo el volumen de aceite separado con respecto al tiempo, durante 1 hora, para calcular la eficiencia y velocidad de separación. La eficiencia de separación está determinada como el porcentaje de aceite separado en la prueba respecto al total contenido en la muestra, el cual es determinado por el análisis con centrifuga. Como se expresa en la siguiente ecuación:

$$eficiencia_separación = \frac{\% _ Aceite _ Separado _ Ensayo}{\% _ Aceite _ total}$$

Las pruebas de sedimentación en baño termostático, permiten simular la etapa de clarificación de la planta extractora, estas pruebas mantienen las condiciones de temperatura y se rigen por los parámetros de la operación a escala industrial.

El rango de dilución del licor de prensas a evaluar establecido es 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, es decir, se generan 8 tratamientos para los cuales se realizaran 11 repeticiones, dispuestas mediante un diseño experimental completamente al azar (DCA); los datos obtenidos se analizarán estadísticamente utilizando el software STATISTICS 8.0.

2.1.2 Metodología Específica del Ensayo de Sedimentación. La metodología específica del ensayo plantea el siguiente esquema para la realización de los experimentos.

Tabla 2. Esquema para la realización de ensayos de sedimentación.

		MUESTRA DE LICOR DE PRENSA										
Día (rpt)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Dilución (aceite:agua)	0,8											
	0,9											
	1											
	1,1											
	1,2											
	1,3											
	1,4											
	0											

Se puede apreciar que a partir de una muestra de licor de prensa, se realizara las respectivas diluciones (tratamientos), para cada repetición y proceder a realizar las pruebas de sedimentación.

2.1.2.1 Procedimiento de pruebas de Sedimentación.

- Preparación del Baño termostático

Materiales para montaje.

-) Vaso de precipitado de 4000 ml

-) Probeta de 250 ml. (Diámetro de 3.5 cm)

-) 2 termómetros: uno para medir la temperatura del agua del baño y otro para la muestra.

-) 1 Soporte universal.

-) 2 pinzas con nuez.

Realizar el montaje de los materiales mencionados, como muestra la figura 2.

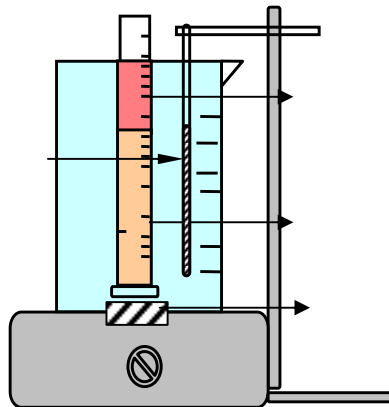
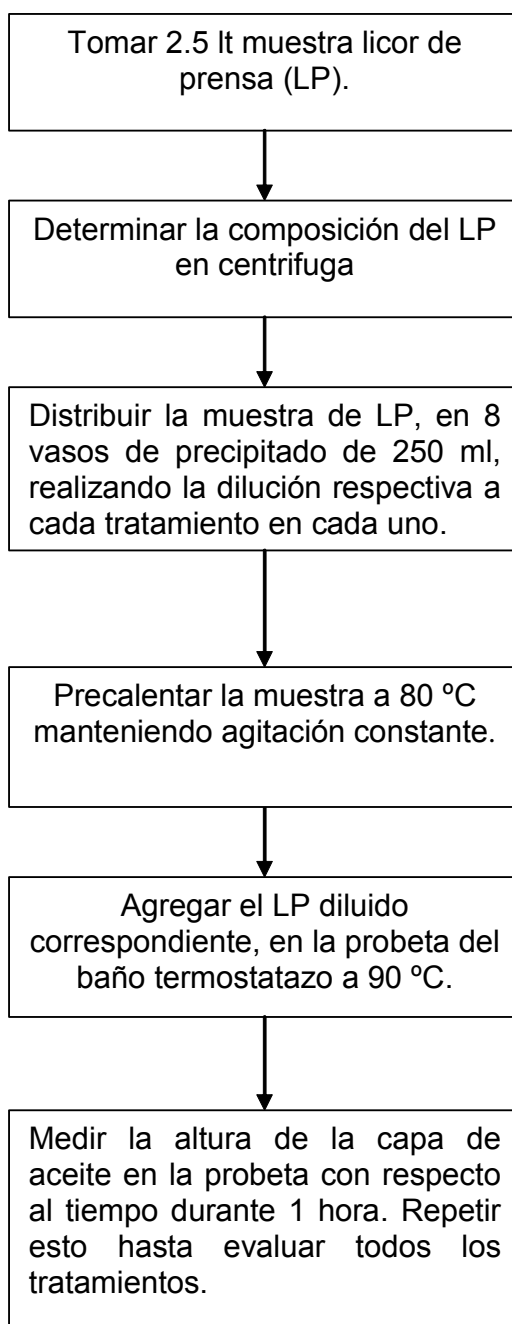


Fig.2 Esquema del montaje de pruebas de sedimentación.

- Diagrama de flujo para las pruebas de sedimentación, para los diferentes tratamientos de dilución.



2.2 DESARROLLO DE CURVAS REOLÓGICAS PARA LAS MEZCLAS LICOR DE PRENSA-AGUA.

2.2.1 Desarrollo Experimental. El equipo utilizado es el reómetro y viscosímetro Brookfiel DV III. Los tratamientos a evaluar están en un rango de 0.8 a 1.4 vol aceite / vol agua, con un paso de 0.2, para un total de cuatro tratamientos, con tres repeticiones para cada uno. Esto permite obtener las curvas de fluidez y de viscosidad a partir de las cuales se puede caracterizar reológicamente el fluido licor de prensa diluido (LPD). La temperatura de la prueba debe ser de 45 °C aproximadamente, estando por debajo de la de separación del aceite del licor de prensa para garantizar la homogeneidad del fluido y por lo tanto una correcta medición.

2.3 EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE SEPARACIÓN ANTES Y DESPUÉS DE LA SECCIÓN TAMIZ-BOMBA.

La emulsificación de las gotas de aceite en el licor de prensa se debe a dos factores: mecánico y químico, el origen químico se debe a la composición orgánica del fruto de la palma que genera películas o cargas eléctricas alrededor de las gotas de aceite evitando su coalescencia, la emulsificación de tipo mecánico en la planta de beneficio se debe a los esfuerzos cortantes aplicados por la bomba centrífuga y el tamiz vibratorio, que generan dispersión de las gotas disminuyendo su tamaño y por ende afectando el ascenso y separación del aceite en la etapa de clarificación.

2.3.1 Desarrollo Experimental. El desarrollo experimental consiste en ensayos de sedimentación en baño termostático a 90 °C, en un montaje como el mostrado en la Figura 2, permitiendo simular la etapa de clarificación, donde se mide en la marcación de la probeta el volumen de aceite separado con respecto al tiempo para determinar la eficiencia y velocidad de separación, la prueba tiene una

duración de una hora, y se realizara a licor de prensa proveniente de los puntos planteados, los cuales representan tres tratamientos, con 5 repeticiones. El análisis estadístico de los datos obtenidos se lleva a cabo con el software STATISTICS 8.0.

2.3.2 Procedimiento para el muestreo y evaluación de la sección tamiz-bomba. Como se puede apreciar en la figura 3, los puntos origen de la muestra son:

- Sección antes de la bomba: Licor de prensa a la salida de la prensa.
- Sección después de la bomba: licor de prensa diluido a la entrada del tamiz.
- Sección después de tamiz: Licor de prensa diluido a la entrada del preclarificador.

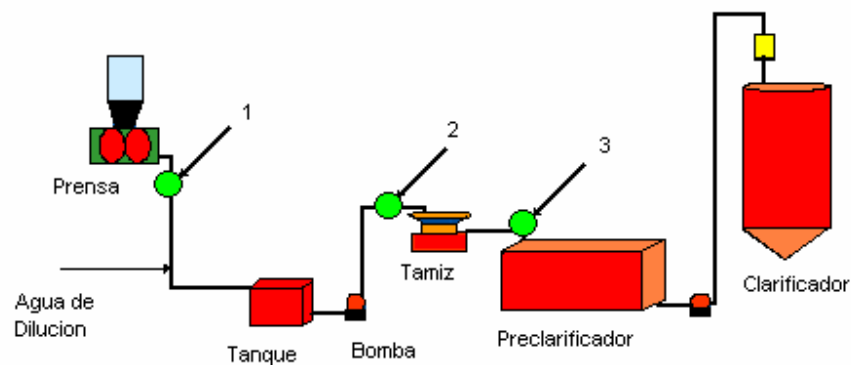
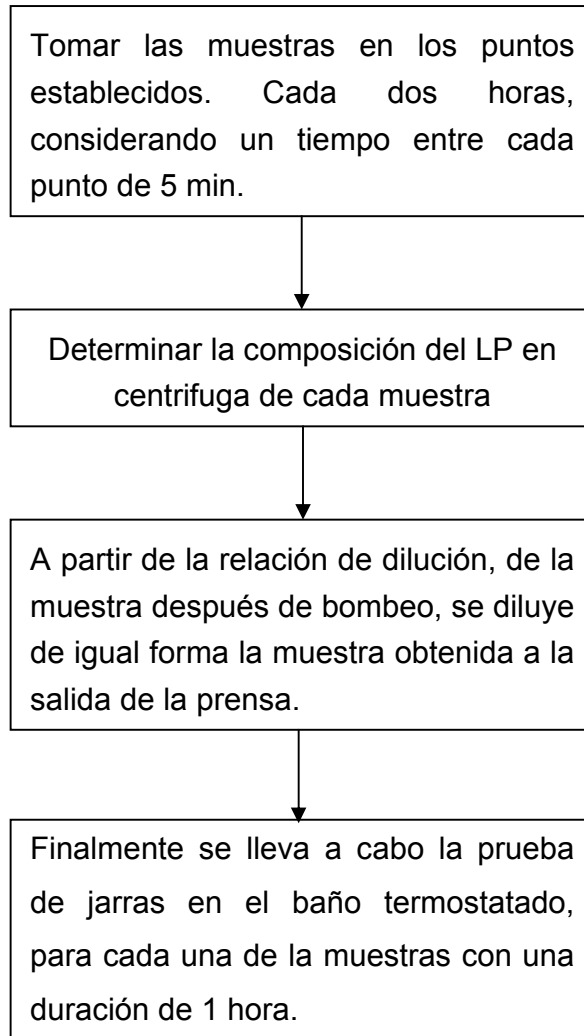


Figura 3. Etapa de extracción y clarificación. Puntos de muestreo

2.3.2.1 Procedimiento de muestreo.



Obtener datos de eficiencia y velocidad de separación. Estos se analizaran con el programa estadístico STATISTICS 8.0.

2.4 EVALUACIÓN DE TENSOACTIVOS NATURALES COMO COAYUDANTES EN LA CLARIFICACIÓN.

2.4.1 Desarrollo Experimental. El desarrollo de este experimento se realiza mediante pruebas de sedimentación en un baño termostato a 90°C, durante 30 minutos, cada prueba consiste en determinar la velocidad y eficiencia en la separación del aceite bajo la influencia de los tratamientos con mucílagos vegetales (tensoactivos). Los tratamientos se dan a partir de tres tipos de mucílagos que son Guasimo, Balso y Cadillo aplicados en tres concentraciones para cada uno 1/10, 3/10 y 5/10 volumen de extracto de tensoactivo por volumen de solución. Lo anterior genera un total de 10 tratamientos incluyendo un testigo móvil que es la dilución con agua de proceso simplemente. Se realizaran 16 repeticiones en un diseño experimental completamente al azar y su análisis estadístico se llevara a cabo con el software STATISTICS 8.0.

La proporción de cada tratamiento agregado al licor de prensa esta dado por el mejor tratamiento de dilución que se encuentre con los ensayos de sedimentación con diferentes diluciones de la sección 2.1.

2.4.2 Metodología de extracción del mucílago Vegetal. El agente tensoactivo se encuentra presente en forma mucilaginoso dentro de las cortezas de Guasimo, Balso y Cadillo, su extracción consiste en un proceso de lixiviación con el se busca separar la mayor parte de dicho agente activo.

Se tienen en cuenta tres factores para la lixiviación: tiempo de extracción, área de intercambio y temperatura. El tiempo del proceso se fija por referencia en una hora considerando el manejo dado a estos materiales en el proceso de fabricación de la panela, la temperatura se mantiene a 70 °C.

Habiendo definido dos de los factores, solo resta encontrar la mayor área posible

de intercambio, para esto se definió el siguiente procedimiento:

- Diagrama de flujo para la extracción de los mucilagos vegetales.

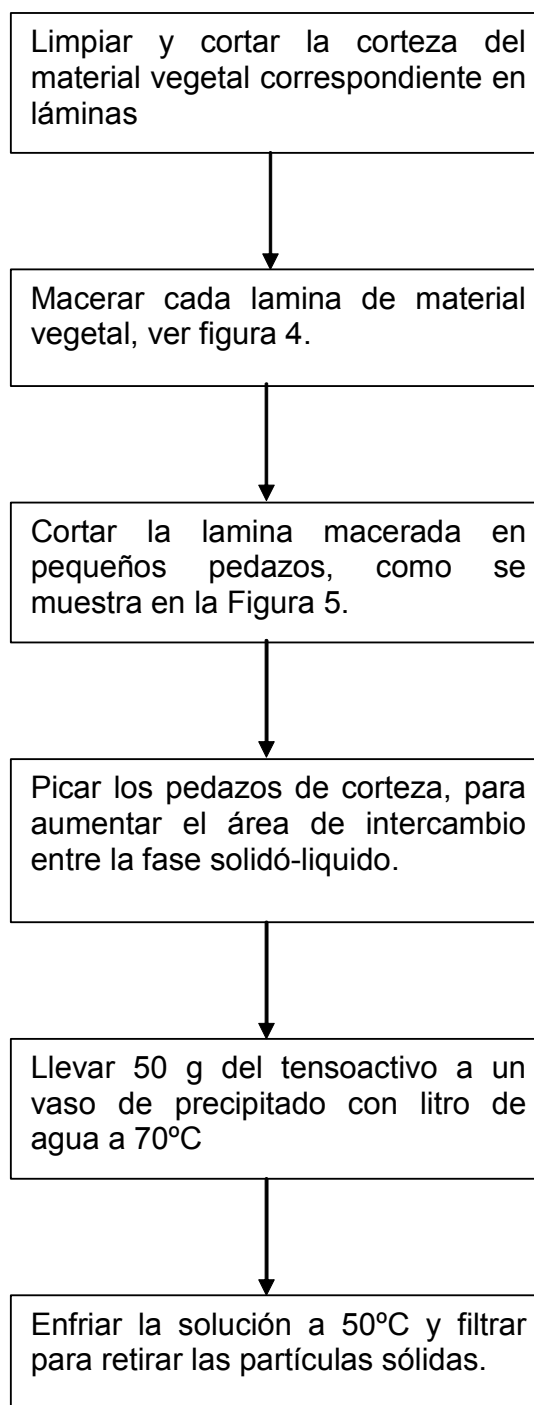




Figura 4. Limpieza y maceración de las cortezas.



Figura 5. Corte en cuadros del guasimo.

En la figura 6, se observan todos los estados del procedimiento de obtención del extracto de las cortezas desde la limpieza el extracto de cada.



Figura6. Proceso de lixiviación de los tensoactivos (mucílagos).

2.5 DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA PARA EL CONTROL AUTOMÁTICO DE LA DILUCIÓN DEL LICOR DE PRENSA.

2.5.1 Metodología específica del diseño del sistema de control automático de la dilución del licor de prensa. El diseño del sistema de control tiene como fin mantener constante la relación aceite/agua que se determine como mas apropiada por los ensayos de dilución de la sección 2.1.

Como parámetros de diseño se tienen en cuenta los siguientes elementos:

- 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.

Para el diseño se tendrán en cuenta los factores de perturbación y otras condiciones del proceso convencional, que dificultan la automatización o aplicación del lazo de control.

- Tipo de fluido: el LPSD es un fluido con alto contenido de impurezas formado por residuos vegetales e inorgánicos. Esto ocasiona el deterioro de prácticamente cualquier equipo de medición y control, relacionado con el flujo o características fisico-químicas. Esto significa que no se deben emplear instrumentos con mecanismos internos en contacto directo con el fluido.
- Temperatura: las temperaturas usadas en clarificación no obedecen a

rangos extremos que restrinjan los equipos a usar.

- Condiciones del fluido: En el proceso donde se aplica el agua para dilución no existe una presión de trabajo sobre la cual aplicar un instrumento de medida, tal como se requiere para los medidores de flujo.
- No existe información disponible sobre procesos automatizados en plantas de beneficio. Actualmente, los sistemas encontrados corresponden únicamente a monitoreo de variables y no de automatización y control.

2.5.2 Metodología específica de la evaluación del sistema de control automático de la dilución del licor de prensa. La evaluación del sistema de control busca determinar el tiempo de respuesta a cada uno de los cambios de nivel de flujo de licor de prensa establecido por el estado operacional de la planta ya sea para una, dos, tres y cuatro prensas en operación. También se espera determinar el comportamiento de la dilución en operación de la planta con respecto a la dilución fijada como set point. El análisis estadístico de los datos obtenidos se realiza utilizando el software STATISTICS 8.0.

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

- Tiempo de respuesta a la perturbación:
Se tienen cuatro niveles de operación que corresponden a 1, 2, 3 y 4 prensas en operación respectivamente. El ensayo consiste en realizar cambios en el nivel de flujo cada 12 min., durante los cuales cada tres minutos se tomaran muestras al licor de prensa diluido para determinar su composición volumétrica. Los cambios en los niveles de operación se realizaran a partir de 4 prensas en operación y luego se ira apagando una prensa cada 12 min., hasta llegar a solo una prensa en operación, luego se

encenderá en el mismo lapso de tiempo una por una las prensas hasta llegar a cuatro prensas en operación.

- Evaluación del comportamiento de la dilución durante el proceso normal:
La prueba consiste en realizar un seguimiento permanente a la composición del licor de prensa diluido en la corriente de entrada al tamiz cada 20 min durante tres días en turnos normales de trabajo. Con la anterior prueba se determina el nivel de control y que tan cercana se encuentra la dilución en el proceso al set point.

3. RESULTADOS Y ANALISIS

En este capitulo se muestran los resultados de los experimentos planteados en el capitulo anterior, acompañados de su respectiva discusión.

3.1. DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA Y LA VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN DEL LICOR DE PRENSAS DILUÍDO A DIFERENTES COMPOSICIONES.

3.1.1 Monitoreo de la composición del Licor de Prensa. Se determino la composición promedio del licor de prensa: 54 % de Aceite y 46% de lodos

3.1.2 Pruebas de Sedimentación para las diferentes mezclas aceite-agua. Las pruebas de sedimentación en cuanto a eficiencia para cada uno de los 8 tratamientos arrojó los datos mostrados en la Tabla 3, donde se puede ver el análisis de varianza para la eficiencia de cada uno de los tratamientos. Se presentan cuatro grupos estadísticamente iguales con 95 % de significancia.

Tabla3.Análisis de varianza para la eficiencia de separación por tratamiento de dilución.*

DILUCIÓN ACEITE/ AGUA	EFICIENCIA	GRUPOS HOMOGENEOS
0 (testigo)	0.2845	a
0.8	0.4145	b
0.9	0.4036	b
1.0 (tradicional)	0.5018	b, c
1.1	0.5782	c, d
1.2	0.6700	d , e
1.3	0.7509	e
1.4	0.7527	e

* Método LSD, $P < 0.05$

De los cuatro grupos estadísticos mostrados en la Tabla 3, tiene relevancia el grupo “e”, que presentó los valores de eficiencia más altos para todo el experimento; este grupo está conformado por las diluciones 1.2; 1.3 y 1.4 volaceite/volagua. A pesar de que entre estos tratamientos no se presentan diferencias significativas, el tratamiento 1.4 aceite/agua fue el de mejores resultados alcanzando un 75 % de eficiencia en la separación.

Podemos observar que respecto a la dilución tradicionalmente utilizada (1 volaceite/volagua), el tratamiento 1.4 aceite/agua presentó un valor de eficiencia superior en 50.

En la Tabla 4, se muestra el análisis de varianza para la velocidad de separación a 10 minutos de iniciado cada ensayo. Se observan cinco grupos estadísticamente iguales, con 95% de significancia.

Tabla 4. Análisis de varianza para la velocidad de separación por tratamiento de dilución.

DILUCIÓN ACEITE/ AGUA	VELOCIDAD SEPARACIÓN (ml /min)	GRUPOS HOMOGENEOS
0 (testigo)	1.4812	a, b
0.8	0.4000	b
0.9	1.0427	a, b
1.0 (tradicional)	2.0527	a
1.1	4.0782	c
1.2	5.6155	d
1.3	7.6236	e
1.4	7.7136	e

** Método LSD, P<0.05*

De la Tabla 4, se resalta el grupo homogéneo “e”, que está conformado por los

tratamientos 1.3 y 1.4 volaceite/volagua; estos tratamientos presentaron las velocidades de separación mas altas, superiores a todos los tratamientos de dilución incluyendo el tradicional 1 aceite/agua. Respecto a éste se obtuvo valores superiores en aproximadamente 6 ml/min más rápidos.

Teniendo en cuenta los resultados anteriores se puede establecer que los mejores tratamientos en cuanto a velocidad y eficiencia de separación fueron los correspondientes a las diluciones 1.2 , 1.3 , 1.4 aceite/agua, valores muy superiores a los presentados por el tratamiento tradicional : 1 aceite/agua.

Como se puede ver los tratamientos que mostraron los mejores resultados fueron los de menor cantidad de agua, esto indica que el fenómeno de coalescencia entre las gotas de aceite se incrementa, debido a la disminución en la dispersión de las gotas de aceite. Por lo tanto, la distancia que deben recorrer las partículas es más pequeña permitiendo así la unión, crecimiento y separación del aceite. Sin embargo, en las Tablas 3 y 4, se nota que el tratamiento testigo al cual no se le agregó agua de dilución, mostró los resultados más bajos; con este hecho se evidencia la importancia de la dilución y de su control.

En la Figura 7, se muestra una curva característica de eficiencia de separación y se presenta el comportamiento de los tres mejores tratamientos de dilución con respecto al tradicional y al testigo. Se puede observar que mientras para los tratamientos 1.2, 1.3 y 1.4 se presenta un comportamiento exponencial, los tratamientos testigo y tradicional (1 volaceite/volagua) presentan una curva de crecimiento proporcional; se identifica claramente que cuando se alcanzan lo primeros diez minutos del ensayo para los tres mejores tratamientos, se ha logrado prácticamente la mayor eficiencia de separación, resultado contrario al de los dos tratamientos para los cuales la eficiencia y velocidad son muy bajos.

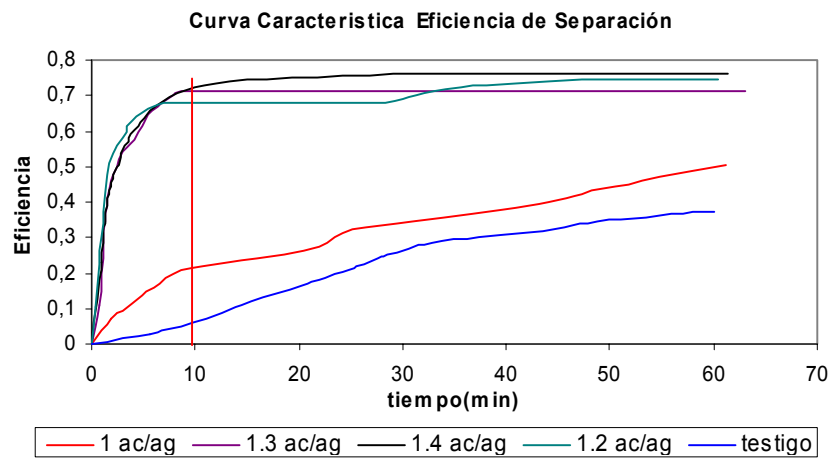


Fig.7 Curva característica de eficiencia de separación respecto tiempo

El anterior resultado proyectado a escala industrial tiene consecuencias muy favorables en cuanto al requerimiento de equipos de clarificación con menor tamaño menor y por lo tanto menores costos en construcción y en mantenimiento.

3.2 DESARROLLO DE LAS CURVAS REOLOGICAS PARA LAS MEZCLAS LICOR DE PRENSA-AGUA.

Estas pruebas se llevaron a cabo en el laboratorio de reología de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander (UIS), esto permitió definir la naturaleza reológica del licor de prensa diluido. Las pruebas fueron hechas en el viscosímetro y reómetro Brookfield DV III.

Las Figuras 8 y 9, presentan la curva de fluidez y de viscosidad respectivamente, para cuatro diluciones aceite/agua (1.4; 1.2; 1.0; 0.8) del licor de prensa. A una temperatura de 44 °C., presión atmosférica y un rango de velocidad de deformación entre 119 – 317 (1/S).

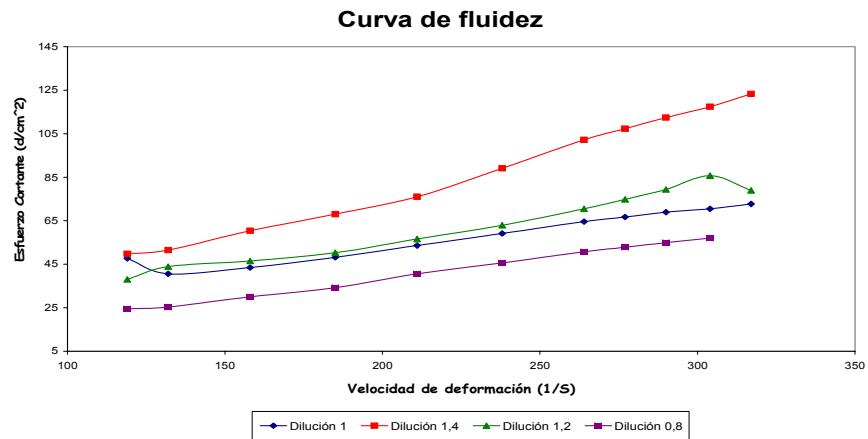


Fig. 8. Curva de Fluides. LPD T= 44 °C.

En la Figura 8, se grafica la curva de fluidez en la que se muestra la relación que existe entre el esfuerzo cortante en dinas/cm² y la velocidad de deformación para cada uno de los niveles de dilución planteados. De manera generalizada se observa que para todos los tratamientos el esfuerzo cortante es directamente proporcional a la velocidad de deformación, lo cual muestra una desviación del comportamiento newtoniano del fluido.

En la figura 9, se grafica la viscosidad (cp) respecto a la velocidad de deformación, para los cuatro niveles de dilución que son: 0.8; 1.0; 1.2 y 1.4 aceite/agua.

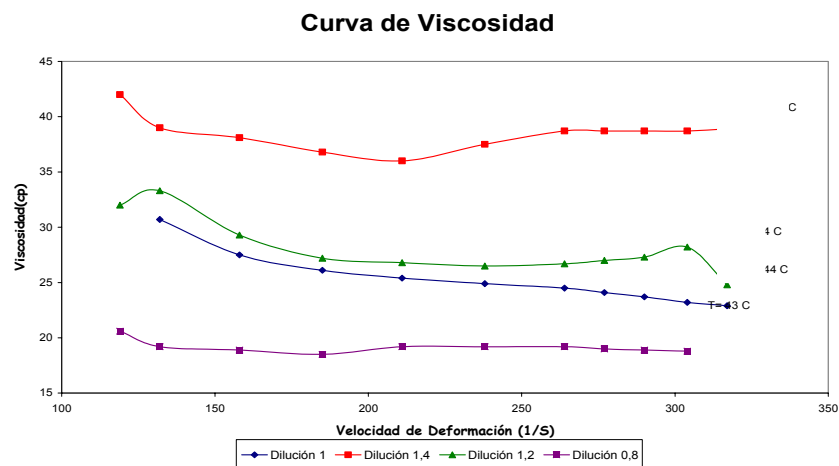


Fig.9 Curva de viscosidad LPD, T= 44 °C

En la Figura 9, se observa una relación directa entre la viscosidad del fluido con su concentración, es decir, el licor de prensa con dilución 1.4 aceite/agua presenta la mayor viscosidad y la tendencia es de forma decreciente pasando por la dilución 1.2 y 1 aceite/agua hasta llegar a la dilución de menor viscosidad y concentración que es la 0.8 aceite/agua.

En Figura 9, se puede apreciar que la viscosidad disminuye progresivamente con la deformación para las cuatro diluciones, es decir el fluido tiene un comportamiento no – newtoniano, exactamente pseudoplástico, con tendencia a comportamiento newtoniano para valores altos de gradiente de velocidad. La dilución con mayor viscosidad es la relación 1.4 volaceite/volagua, y en orden descendente hasta la de 0.8 aceite/agua; esto sugiere y era de esperarse, que la viscosidad del licor de prensa es inversa a la concentración del fluido.

3.2.1 Modelamiento de las curvas reológicas. A partir de los datos obtenidos de la prueba reológica se realizó el modelamiento matemático de las respectivas curvas para cada uno de los niveles de dilución permitiendo especificar y validar los planteamientos realizados.

Considerando todas las posibilidades de ajuste a modelos reológicos se encontró que el que mejor se ajusta al fluido licor de prensa fue el modelo de Ostwald-de Waele. Esta ecuación de dos parámetros también se conoce con el nombre de *ley de potencia*.

*Modelo de Ostwald-de Waele (Ley de Potencia)*¹

$$\tau_{yx} = -m \left| \frac{dv_x}{dy} \right|^{n-1} \frac{dv_x}{dy}$$

$\frac{dv_x}{dy}$: velocidad de deformación (1/s); τ_{yx} : esfuerzo cortante (Dinas/cm²)

¹ BIRD. Byron. Fenómenos de Transporte. Editorial Reverte S.A. 1992. Pag 1-12.

En la Tabla 5, se muestran los valores de los parámetros reológicos, para cada una de las cuatro diluciones, en un rango de 119-304 (1/s) de velocidad de deformación y para las dos temperaturas evaluadas.

Tabla 5. Parámetros del modelo de la ley de potencia para las diferentes diluciones.

DILUCION (aceite/agua)	m (dina segⁿ cm⁻²)	n (adimensional)	Temperatura (° C)
0.8	0.2445	0.9542	44
1.0	0.9293	0.7585	44
1.2	0.8590	0.7914	44
1.4	0.4301	0.9792	44

Como se muestra en la tabla 5, los valores de n para todos los niveles de dilución son menores a 1, esto permite afirmar que evidentemente el licor de prensa y los niveles de dilución manejados presentan un comportamiento reológico no-newtoniano y pseudoplástico.

Las implicaciones que este comportamiento tiene para el proceso dentro de la clarificación se refieren a la disminución de la viscosidad debida al bombeo previo para llevar el fluido al clarificador. Considerando lo anterior y citando la ley de Stokes que plantea una relación inversa entre la viscosidad y la velocidad de ascenso de las partículas, podemos predecir un aumento en la velocidad de ascenso de las partículas de aceite. Sin embargo, no se puede desconocer la emulsificación generada por los esfuerzos cortantes aplicados por el impulsor de la bomba que tiene efectos negativos tanto en eficiencia como en velocidad de separación del aceite.

Retomando la grafica de viscosidad (Fig. 5) junto con las Tablas 3 y 4 de eficiencia y velocidad de separación para los tratamientos de dilución respectivamente, se nota que los mejores tratamientos mostrados en las tablas 3 y 4, son los que

presentan mayores valores de viscosidad. Por lo tanto, la relación de dilución, es un factor que no solo se realiza para disminuir la viscosidad sino que debe estar en un valor (como el de 1.4 volaceite/volagua) que permita promover el fenómeno de coalescencia que al parecer prima sobre los efectos de menor viscosidad que muestran las diluciones con mayor contenido de agua como lo fueron la dilución 0.8 y 1.0 volaceite/volagua para las cuales se presentaron valores muy bajos de eficiencia y velocidad de separación.

3.3 EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE SEPARACIÓN ANTES Y DESPUÉS DE LA SECCIÓN TAMIZ-BOMBA

En la Figura 10, se muestra la eficiencia en la separación de aceite alcanzado por el licor de prensa correspondiente a los puntos de muestreo de cada una de las secciones evaluadas (antes bombeo, Después del Bombeo y después de tamizado).

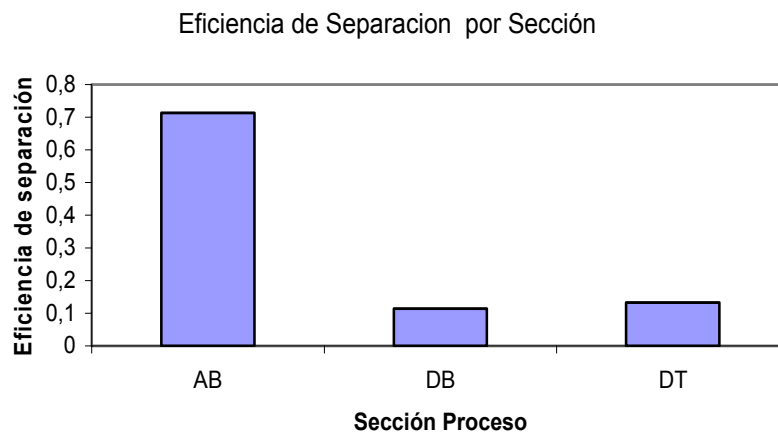


Fig.10.Comparación para eficiencia de separación por sección.

Como se puede ver en la figura 10, la diferencia en los valores de eficiencia es alto entre la muestra tomada antes del bombeo respecto a las otras dos secciones (Después de Bombeo y después de tamiz). Como se ve en la figura, la eficiencia de separación antes del bombeo tiene un valor aproximado de 72%, esto

representa 6 veces el valor de eficiencia alcanzada por el licor de prensa diluido procedente de los puntos después del bombeo (DB) y después de tamiz(DT) que tan solo alcanzaron valores de eficiencia del 13%. Esta diferencia tan marcada, se debe a la emulsificación de las gotas de aceite en el licor de prensa diluido, debida a la aplicación de esfuerzos mecánicos en la sección DB y DT.

En la Figura 11, se reporta la velocidad de separación (ml/min) a 10 minutos de empezada la prueba, del aceite correspondiente a licor de prensa de las secciones antes de bombeo, después de bombeo y después de tamiz.

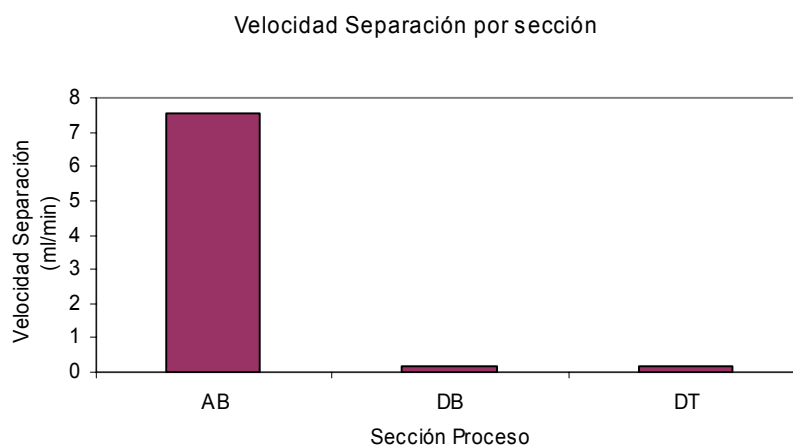


Fig.11.Comparación de velocidad de separación por sección.

En la figura 11, se observa que el tratamiento antes de bombeo tiene los más altos valores de velocidad de separación, reportando en promedio un valor de 7.7 ml/min, mientras que para el licor de prensa de las otras dos secciones la velocidad a 10 min. de iniciada la prueba es cero. Los datos anteriores se deben a que en los puntos DB y DT el fluido ha sido sometido a esfuerzos mecánicos que generan dispersión de las partículas de aceite, lo cual provoca que las gotas de aceite se encuentren en menor tamaño y más distantes entre si en el fluido. Al encontrarse las gotas de aceite dispersas y más pequeñas se dificulta el ascenso, coalescencia, crecimiento y posterior separación, efectos que se pueden ver claramente en los datos reportados en las figuras anteriores.

3.4 EVALUACIÓN DE MUCÍLAGOS TENSOACTIVOS NATURALES COMO COAYUDANTES EN LA CLARIFICACIÓN.

De las pruebas de sedimentación aplicando tensoactivos al licor de prensa, se obtuvieron en cuanto a eficiencia de separación los datos mostrados en la figura 12. En esta gráfica se muestran los incrementos de eficiencia de cada uno de los tratamientos con respecto al testigo (Dilución 1.4 aceite/agua).

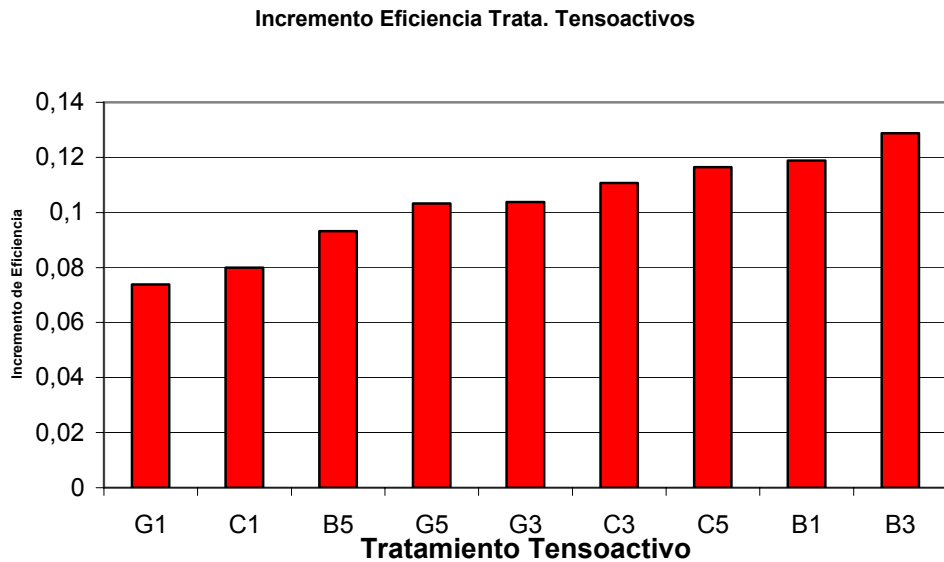


Fig. 12. Incremento de eficiencia de separación para los tratamientos con mucilagos tensoactivos con respecto al testigo

En la Figura 12, se observa que todos los tratamientos con tensoactivos en sus diferentes niveles de dilución presentaron valores superiores en cuanto a eficiencia de separación respecto al testigo (relación 1.4 volaceite/volagua), el cual fue el resultado de las pruebas de dilución de la sección 4.2. De los datos tiene relevancia el tratamiento con Balso en solución 3/10, con el cual se obtuvo el mejor resultado (aprox. 78% eficiencia), siendo mayor al testigo en un 20% aproximadamente y en un 18% con el tratamiento más cercano que fue el tratamiento con Balso en dilución 1/10. Esto debido, al poder desemulsificante de

los tensoactivos que permiten estabilizar las cargas eléctricas que rodean las partículas que conforman el licor de prensa y por lo tanto permite su coalescencia, crecimiento y separación de fases.

Por otro lado, en cuanto a velocidad de separación a 5 min. de iniciada la prueba, no se encontraron diferencias significativas entre los niveles de dilución de cada material; en la Figura 13, se muestra la velocidad de separación (ml/min) para cada material tensoactivo. Es evidente el efecto de todos los materiales sobre el testigo que tiene una velocidad de 10.5 ml/min, mientras que para el Guasimo, Cadillo y Balso los resultados fueron de 12.6, 12.9 y 13.4 ml/min respectivamente. Como vemos el material que presentó el mayor efecto fue el Balso, alrededor de 3 ml/min más que la velocidad reportada por el testigo, esto representa cerca del 30% más de velocidad de separación.

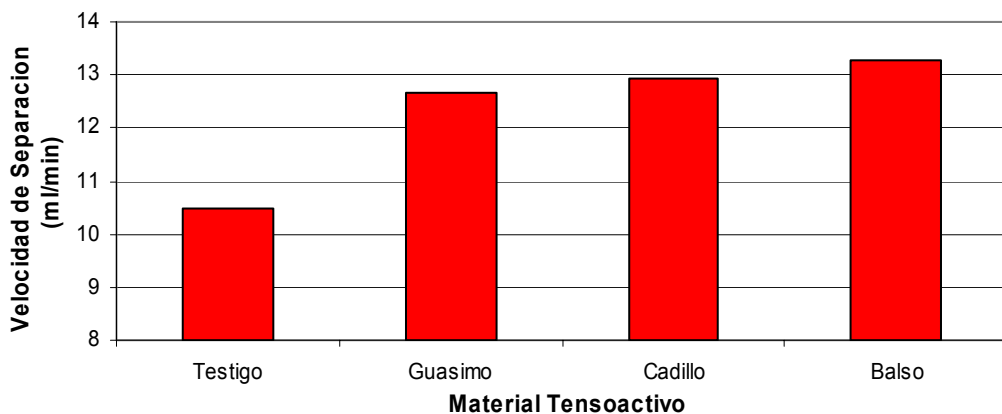


Fig. 13. Velocidad de separación por material mucilaginoso tensoactivo y testigo.

Observado el efecto de los tensoactivos, se abre un nuevo panorama para la etapa de clarificación, empezando a explorar nuevos campos como lo es el del tratamiento químico. Debemos tener en cuenta que además del efecto positivo en separación de aceite, los tensoactivos naturales considerados en este proyecto por su naturaleza orgánica tienen valor agregado por no afectar la naturaleza y composición propia del producto final.

3.5 DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA PARA EL CONTROL AUTOMÁTICO DE LA DILUCIÓN DEL LICOR DE PRENSA.

3.5.1 Diseño de un sistema para el control automático de la dilución del licor de prensa (LP). El objetivo del sistema de control de dilución es mantener la relación de dilución vol.aceite/vol.agua en 1.4, que fué encontrada como el mejor tratamiento de dilución en los resultados presentados en la sección 4.1. Al mantener este factor constante durante el proceso, se logra mejorar la eficiencia de separación en los preclarificadores y en general en toda la etapa de clarificación.

- *Parámetros considerados en el lazo de control:*

Variable controlada: dilución en valor de 1.4 vol.aceite/vol.agua.

Variable manipulada: flujo de agua de dilución.

Variable medida: flujo de licor de prensa sin diluir (flujo de aceite en LPSD)

3.5.1.1 Esquema de lazo de control. En la Figura 14, se presenta el esquema del lazo de control diseñado para el sistema de dilución. En el Anexo A se presenta el diagrama de bloques del controlador.

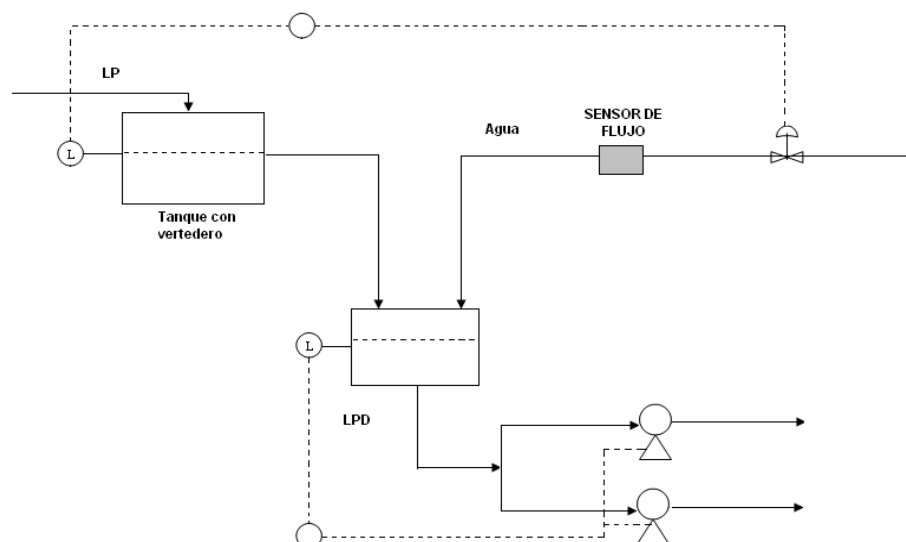


Figura14. Diagrama de diseño del sistema de control.

3.5.1.2 Principio de operación. Como vemos en la Figura 14, la acción del sistema de control está sujeta a las perturbaciones generadas por lo cambios de flujo en LP. El funcionamiento del lazo consiste en detectar un cambio de flujo en el nivel del tanque del vertedero, utilizando el sensor de nivel cuya señal es llevada al PLC, que calcula el flujo de aceite. Con este caudal de aceite en el LP el PLC determina el caudal de agua de dilución requerido en ese momento, para esto manipula la válvula proporcional de tal forma que se cumpla el requerimiento de agua.

Posteriormente, tanto el agua de dilución como el LP, son mezclados en la zona de dilución del tanque con vertedero y bombeados al tamiz y finalmente a preclarificación. Este bombeo es controlado utilizando variadores de velocidad en los motores de las bombas, esto permite aplicar la energía necesaria para mover el caudal que en ese momento esta manejando, evitando aplicar esfuerzos innecesarios que provocan emulsificación.

En la figura 15 y en la figura 16, se observa el funcionamiento en el tanque con vertedero, donde a partir de la lectura del sensor de nivel se manipula la válvula de flujo de agua. Se ven las dos zonas del tanque, una para la medición del flujo y otra para la dilución de la corriente LP.

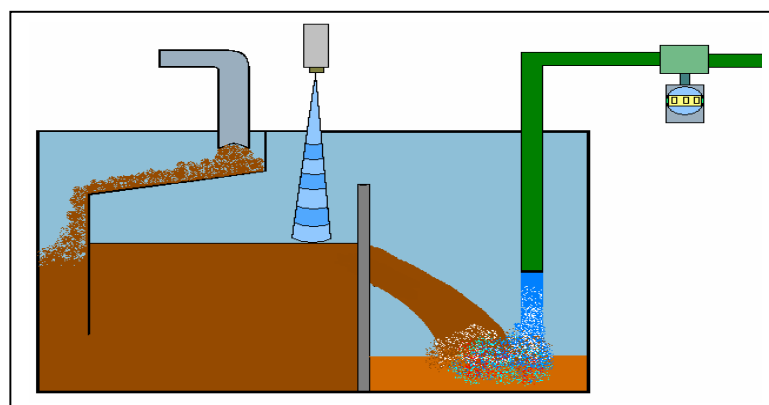


Figura 15. Esquema de la operación del tanque de dilución



Figura 16. Montaje en planta del sistema de dilución automática.

3.5.1.3 Instrumentación de lazo de control. A continuación se muestran generalidades de los instrumentos y en el Anexo B, se presentan sus características técnicas.

- *Sensor de Nivel.* Para realizar la lectura del nivel en el vertedero, se utiliza un sensor de nivel de ultrasonido tipo The Probe tipo sanitario. Este es un transmisor de nivel ultrasónico que combina un sensor y una parte electrónica en un único cuerpo. La calibración de este sensor se realizó de forma lineal, teniendo como rango de lectura de entrada: 1.106-.71m y de salida de 4-20 mA.

- *Tanque de dilución.* El tanque de dilución está compuesto de dos secciones, una que tiene un vertedero que permite a partir del nivel determinar el flujo de licor de prensa y la otra sección que es donde se realiza la dilución del licor de prensa.

- *Diseño del vertedero*

- ❖ Parámetro de diseño: Caudal máximo LPSD (5 Prensas): 0.007 m³/s

Ecuación de diseño del vertedero:

$$H_{CRESTA} = \left[\frac{Q_{LPSD}}{1.838 * L_{CRESTA}} \right]^{2/3}$$

H_{CRESTA} : Altura de la cresta sobre el vertedero (m)

Q_{LPSD} : Caudal de licor de prensa (m^3/s)

L_{CRESTA} : Longitud de la cresta.

En la Figura 17, se muestran las dimensiones de diseño del vertedero.

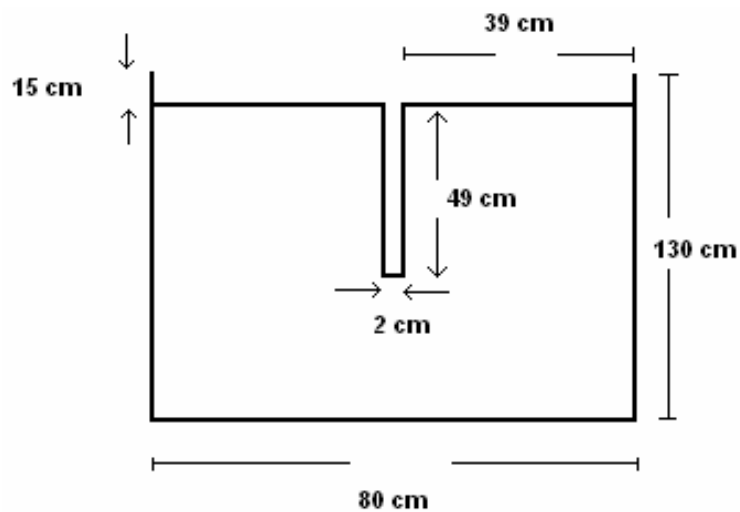


Figura 17. Dimensiones vertedero del tanque de dilución.

La Figura 18, corresponde al vertedero del tanque de dilución puesto en operación, donde podemos ver además la corriente de agua de dilución que es parte del sistema de control.



Figura 18. Vertedero del tanque de dilución.

- *Diseño del tanque de Dilución.* El tanque se diseñó teniendo en cuenta un flujo

máximo de LPD de $0.007 \text{ m}^3/\text{s}$ (25000 lt/h), que corresponde al flujo generado por 5 prensas tipo P9 en operación. Las dimensiones se muestran en la Figura 19.

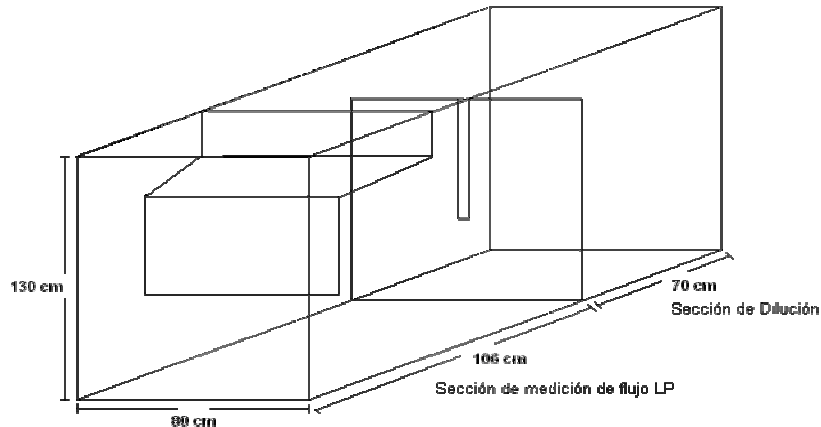


Figura 19. Dimensiones tanque dilución con vertedero.

- *Sensor de flujo de agua de Dilución.* El sensor utilizado para realizar la lectura del caudal de agua de dilución, es un sensor de flujo magnético, cuyo principio de operación es la lectura del campo magnético que genera el fluido al pasar por un campo eléctrico.

- *Válvula de Flujo de agua de dilución.* Como elemento final de control se tiene una válvula proporcional neumática, que controla el flujo de agua hacia el tanque donde se realiza la dilución

3.6.1.4 Sintonización del lazo de control de flujo. La sintonización del lazo se realizó utilizando el software SINMATIC de SIEMENS, el cual generando perturbaciones al sistema de control, encuentra las constantes del controlador. Como resultado el controlador fue programado proporcional integral (PI), este tipo de controlador permite eliminar el offset. El valor de las constantes son: ganancia $K_c=15 \text{ mA/mA}$ y tiempo integral=10 minuto/reajuste. En el Anexo C se presenta el diagrama de Bode, generado por el programa MATLAB 6.5, en cual se puede observar la estabilidad del sistema de control. De igual forma en el Anexo D se

presenta la grafica Rootlocusplot (lugar geométrico de la raíces).

3.5.2 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 destinada a determinar el tiempo de respuesta a la perturbación y otra a la evaluación del comportamiento de la dilución durante el proceso normal.

En la Tabla 6, se muestra el tiempo de respuesta del sistema de control para cada perturbación de flujo de LP, determinado por el número de equipos de prensado en operación.

Tabla 6. Tiempo respuesta para cada perturbación

Perturbación (Cambio de # prensas operación)	Tiempo 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

En promedio el tiempo de respuesta fué de 3 min para las diferentes perturbaciones, este valor fue independiente a si la variación de flujo de LP ocurrió de manera positiva o negativa y del grado de variación

Las perturbaciones que se presentan en nuestro sistema se deben al cambio en el flujo del licor de prensa. Lo cual se debe al encendido o apagado de las diferentes prensas instaladas en la planta. En la planta extractora ACEITES S.A., donde se realizó el estudio, se tenían 4 prensas instaladas. De acuerdo con esto, las

perturbaciones consistieron en encender y apagar en forma secuencial cada prensa una por una hasta abarcar cada nivel de operación, es decir, se tuvo 4, 3, 2 y 1 prensas encendidas y sus respectivos cambios de flujo.

En el Anexo E, se muestran las graficas correspondientes a las curvas generadas por las perturbaciones. El diagrama muestra diferentes graficas a la vez, las convenciones se encuentran en la parte inferior de la pantalla, donde se expone la grafica y su color correspondiente.

Entre las curvas que se muestran se encuentra la del flujo de agua de dilución, el set point de agua de dilución por prensa en operación que se requiere para mantener la dilución en un valor de 1.4 vol.aceite/vol.agua en licor de prensa diluido y el flujo de licor de prensa sin diluir que es la corriente por la cual entran las perturbaciones.

Considerando la segunda parte de la evaluación del sistema de control, en la grafica de la Figura 20, se muestra en promedio la variación de la dilución en operación normal de proceso para los diferentes niveles operacionales de prensado y por tanto del LP.

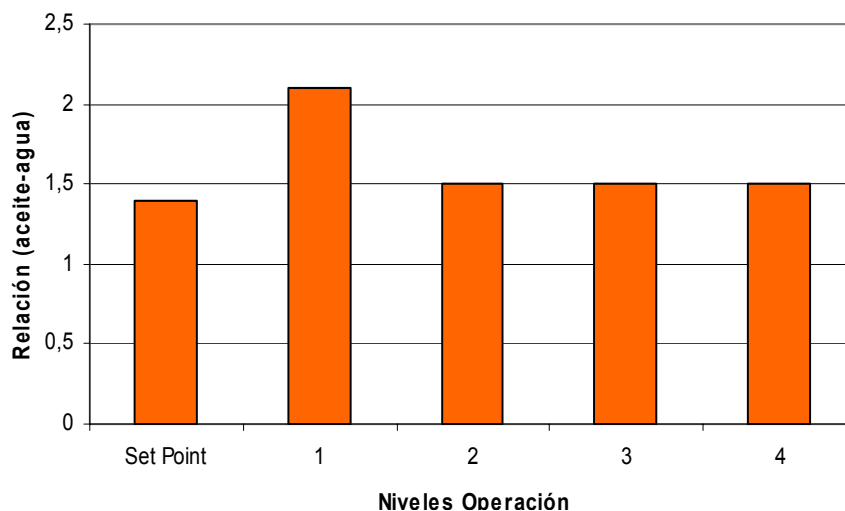


Figura 20. Variación de la dilución respecto al set pont para cada nivel operacional.

En la figura 20, se aprecia que para 2, 3 y 4 prensas en operación el nivel de dilución entre ellas fue de 1.5 aceite/agua, lo que representa un valor de OFFSET de 0.1 con respecto al setpoint de 1.4 vol.aceite/vol.agua. Para el flujo de LP de una prensa el offset alcanzó un valor de 0.7, esto se debe a que en valores bajos de flujo de LP se tienen bajos flujos 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.

En la Tabla 7, se presenta un cuadro comparativo del comportamiento de la relación de dilución aceite/agua antes y después de la instalación del sistema de control automático.

Tabla 7. Variación de la dilución con el sistema de control.

Parámetro estadístico	Dilución 1.4 MANUAL	Dilución 1.4 C. AUTOMATICO
S.D	0.573	0.2935
C.V	37	20.012
Dilución promedio	1.56	1.46

Como podemos ver en la tabla 7, considerando la desviación S.D de la dilución manejada por el sistema de control, se reduce de 0.573 de forma manual a 0.2935 aproximadamente 50% menos de desviación. Considerando esto y teniendo en cuenta la reducción a 20 del coeficiente de variación, se puede concluir que el sistema de control permite mantener el valor de dilución constante y cercano al set point (1.46 aceite /agua). Estos resultados implican que el proceso se desarrolla de forma más estable y que la respuesta las perturbaciones es adecuada. Además, se presenta mejor manejo del agua de dilución representando mayor eficiencia del sistema de clarificación además de hacer uso del agua de

dilución de una forma más racional ambientalmente hablando.

3.5.3 Resultados Económicos de la implementación del sistema de control.

- Costo de instrumentación y montaje de sistema de control.

Sensor de nivel:	3.500.000 pesos
Válvula Proporcional neumática:	9.000.000 pesos
Tanque con vertedero:	500.000 pesos
Sensor y Transmisor de flujo magnético:	6.000.000 pesos
Mano de Obra y material montaje:	600.000 pesos
Costo total:	19.600.000 pesos

Cabe decir, que el PLC hace parte de todo un montaje que controla y regula muchas de las operaciones de la planta extractora ACEITES S.A., por ende no se considera su costo dentro de la inversión

El resultado económico se evaluó considerando la cantidad de aceite de palma vertido por la planta en efluentes finales antes y después de la implementación del sistema de control de dilución (y dilución 1.4 vol.aceite/vol.agua).

- Flujo de aceite en efluentes finales: 170.5 Kg./h, considerando 18 h promedio de operación de la planta al día se tienen 3 Ton/día de aceite en efluentes.
- Flujo de aceite en efluentes finales: 117.16 Kg./h, considerando 18 h promedio de proceso al día se tienen 2.1 Ton/día de aceite en efluentes.

Teniendo en cuenta lo anterior, se observa una disminución en 0.9 Ton/día de aceite de palma vertido a efluentes finales.. Ahora, considerando que el precio del aceite de palma a la fecha se encuentra aproximadamente en 1.000.000 de pesos, la empresa ACEITES S.A, recupera la inversión hecha en el sistema de control de dilución en aproximadamente en 22 días de operación.

4. CONCLUSIONES

1. Se encontró que existe una relación entre el factor de dilución y la eficiencia y velocidad de separación de aceite en la etapa de clarificación.
2. Se estableció la dilución 1.4 vol.aceite/vol.agua como la relación de mayor eficiencia y velocidad de sedimentación, con valores de 75 % y 7.71 ml/min respectivamente. Valores superiores en eficiencia de separación en un 50% y en velocidad de separación 4 veces mas, por los presentados por la dilución tradicional (relación 1 vol.aceite/vol.agua).
3. Con la dilución de 1.4 aceite/agua se reduce en un 25% el uso de agua de dilución, aumentando además la recuperación de aceite por tonelada de fruta procesada.
4. Se desarrollaron las curvas reológicas para las mezclas licor de prensa - agua que permitieron definir el licor de prensa diluido como un fluido no-newtoniano, específicamente pseudoplástico.
5. Los esfuerzos mecánicos aplicados al licor de prensa diluido en el bombeo, generan un efecto negativo sobre la separación del aceite en la etapa clarificación, que se refleja en una baja eficiencia y velocidad de separación.
6. El licor de prensa diluido después del bombeo, presenta una eficiencia de separación de aceite inferior en 6 veces a la eficiencia presentada por el licor de prensa sin ser sometido a bombeo, el cual alcanza un valor del 72%. De igual forma, la velocidad de separación de aceite del licor de prensa diluido, después de ser sometido a bombeo, es prácticamente nula, evidenciando la emulsificación sufrida por parte de las gotas de aceite.

7. El efecto sobre la separación de aceite en la etapa de clarificación utilizando los tratamientos con tensoactivos naturales, es totalmente positivo permitiendo promover tanto la eficiencia como la velocidad de separación.
8. El tratamiento con extracto de Balso a una dilución de 3/10, presentó los mejores resultados de eficiencia de separación de aceite alcanzando en promedio un 78%, superior en 20% al tratamiento testigo con solo agua de dilución. De igual forma, en cuanto a velocidad de separación, el Balso reportó las mejores velocidades, aproximadamente 13 ml/min. Superior en 30% a la alcanzada por el licor de prensa diluido con solo agua.
9. Se diseñó un sistema de control de dilución de licor de prensa, el cual a partir de este flujo, establece la cantidad de agua requerida por el sistema para mantener constante la relación de dilución ante una eventual perturbación en flujo.
10. El sistema de control presenta una respuesta de tres minutos a los diferentes niveles de perturbación en el flujo de licor de prensa, que pueden ir desde un 30-100% en proceso, sin presentar variaciones considerables en la relación de dilución.

5. RECOMENDACIONES

1. Experimentar el uso de los tensoactivos (mucílagos) naturales, en la recuperación de aceite presente en los lodos, que salen de las centrifugas deslodadoras y de los clarificadores.
2. Implementar y evaluar el uso del control automático de dilución, para registrar el flujo de licor de prensa, como posible método de medición del potencial de extracción de las plantas beneficio de aceite de palma.
3. Diseñar y evaluar, alternativas de transporte del licor de prensa hacia clarificación. Para evitar el bombeo y la emulsificación del aceite en los lodos, que como se observo en este trabajo disminuyen tanto la eficiencia como la velocidad de separación en la etapa de clarificación.
4. Diseñar y evaluar equipos de clarificación a partir de los parámetros de flujo y de sedimentación obtenidos en este trabajo.

6. BIBLIOGRAFIA

1. AL-ZUHAIR, Sulaiman. Using liquid-liquid daep settling model in determining the desing parameters of crude palm oil settler. School of Engineering Taylor's Collage. Malaysia 2003.
2. BERNAL, Henry y CORREA, Jaime. Especies vegetales promisorias del convenio Andres Bello. Tomo XI. Programa de Recursos Vegetales Andres Bello. Santa Fe de Bogota, 1998. p 479.
3. BIRD, Byron. Fenómenos de transporte. Revete, México, 1992. P 1-3-1-15
4. CENIPALMA. Curso algunos Aspectos del procesamiento de aceite de palma. Bucaramanga, Diciembre 1993.
5. CORRIPIO, Armando y SMITH, Carlos. Control Automático de Procesos, 4 Ed. Mexico. Limusa.1997. p17-26
6. CIMPA-CORPOICA.Caracterización de mucilagos.2002
7. Convenio Pronatta-Cimpa 1985.
8. Mc. CABE, Warren y SMITH. Operaciones Unitarias en Ingeniería Química. Mc Graw Hill. Cuarta Edición.1998. p 1031-1040
9. MOLANO, Nelson y NOGUERA, Robert. Extracción y caracterización reologica del mucílago del árbol *Heliocarpus popayanenses* HBK para la experimentación en

posibles aplicaciones industriales. Bucaramanga, 2004. Trabajo de grado (Ingeniería Química). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Fisicoquímica.

10. PRADA, Luz Esperanza. Investigación adjunta a CORPOICA (CIMPA). Barbosa-Santander. Septiembre 2000.

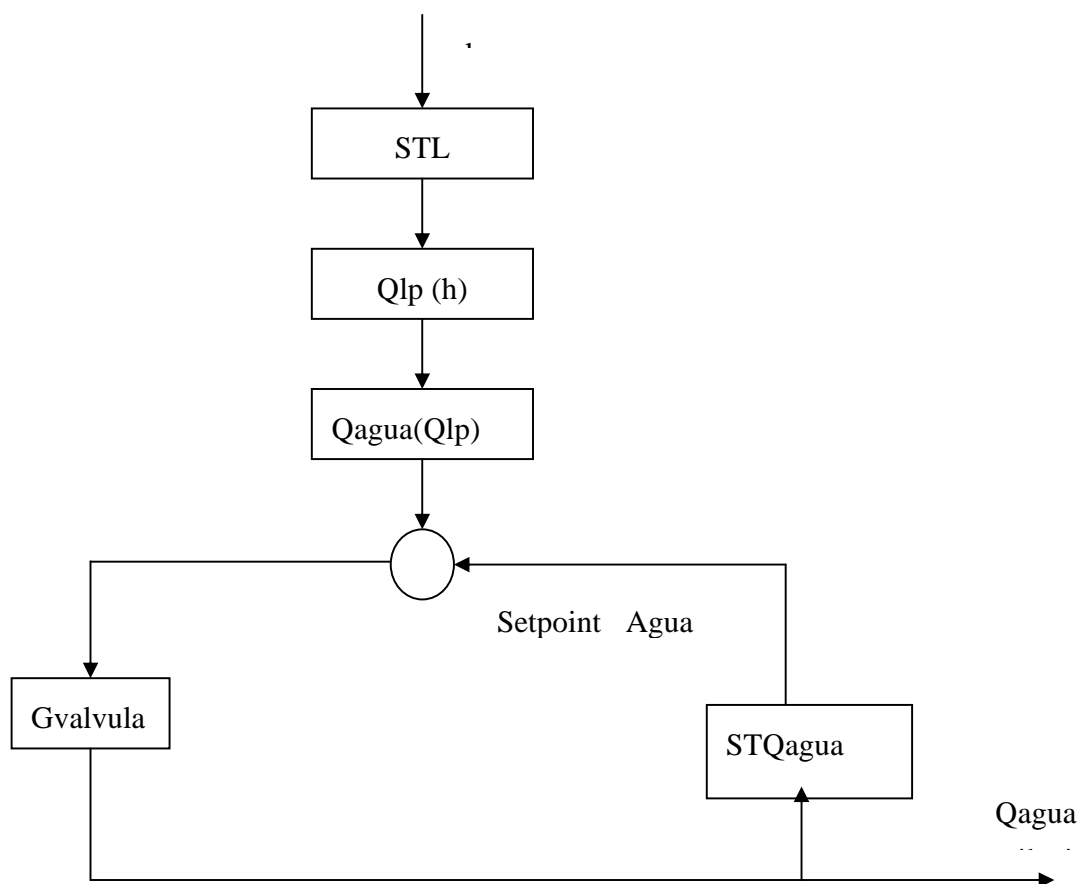
11. SAN JUAN, Marcos. Modulo: Control Automático de Procesos I. Fundación Universitaria del Norte. Dirección de ingenierías. Especialización en ingeniería de procesos industriales. Barranquilla 2002.

12. SIERRA, Guido. Evaluación de los factores que afectan la pérdida de aceite por impregnación en tusas durante el proceso de extracción de aceite de palma africana. Bucaramanga, 2003. Trabajo de grado (ingeniería Química). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Fisicoquímicas.

13. www.Fedepalma.org

ANEXOS

Anexo A. Diagrama de Bloques del sistema de control de dilución.



ANEXO B. Especificaciones técnicas de los instrumentos de control

1. Sensor de Caudal de Agua de Dilución: Se seleccionó el caudalímetro electromagnético, el cual tiene amplia aplicación en la industria de alimentos.

Referencia: Caudalímetro SITRANS FM 711/A

Especificaciones:

Diámetro: 3.81 cm.

Escala de Velocidad de Flujo: 0.25-12 m/s

Rango: 11.75 m/s

Cero del instrumento: 0.25 m/s

Conductividad del Fluido: >200 μ S/cm

2. Transmisor de señal: Se encarga de transmitir la señal del sensor de caudal.

Referencia: InterMag 2 de Siemens

Especificaciones

Procesamiento rápido de señales con microprocesador de 16 bits.

Comunicación PROFIBUS-PA (Profil 3.0)

1 Salida analógica y 2 salidas digitales para impulsos, estado del instrumento, límites, sentido de flujo, salida de frecuencia.

Salida de 4-20mA

3. Sensor transmisor de Nivel: Es un sensor de ultrasónico, el material de fabricación es Kynar PVDF. Su funcionamiento se basa en enviar una serie de impulsos ultrasónicos que se reflejan como eco, que se interpretan como nivel.

Referencia: The Probe Tipo sanitario.

Especificaciones:

Escala: 71- 110 cm.

Rango: 40 cm

Cero: 60 cm

Salida: 4-20mA

4. Válvula de control de flujo de Agua: Es el elemento final del lazo de control, su función es manipular el caudal de agua adecuado para la dilución.

Referencia: 3241-7 Serie 240 Fabricante Samson

Especificaciones.

Válvula de accionamiento neumático

Diámetro: 3.81 cm.

Cv: 30

5. Panel de Control.(PLC)Compara y toma las decisiones en el sistema de control.

Se realiza utilizando un software de supervisión SINEMATIC ProTool/Pro. El cual consta de software runtime ProTool/Pro RT, Ejecutable bajo Windows XP profesional. Lenguaje de programación STEP 7.

Modulo de entrada/salida Analógicas

Referencia: 6ES7334-OCE01-OAAO de siemens

Especificaciones.

4 entradas, 2 salidas

Resolución de 8 bits

No parametrizable; ajuste del tipo de medición y salida mediante cableado.

Márgenes de medición de 0 a 20 mA

Márgenes de salida de 0 a 20 mA

Con separación galvanica respecto a la tensión de carga.

Anexo C. Diagrama de Bode

En la figura, se presentan dos curvas la primera muestra la RM (razón de magnitud) y la segunda el Angulo contra la frecuencia.

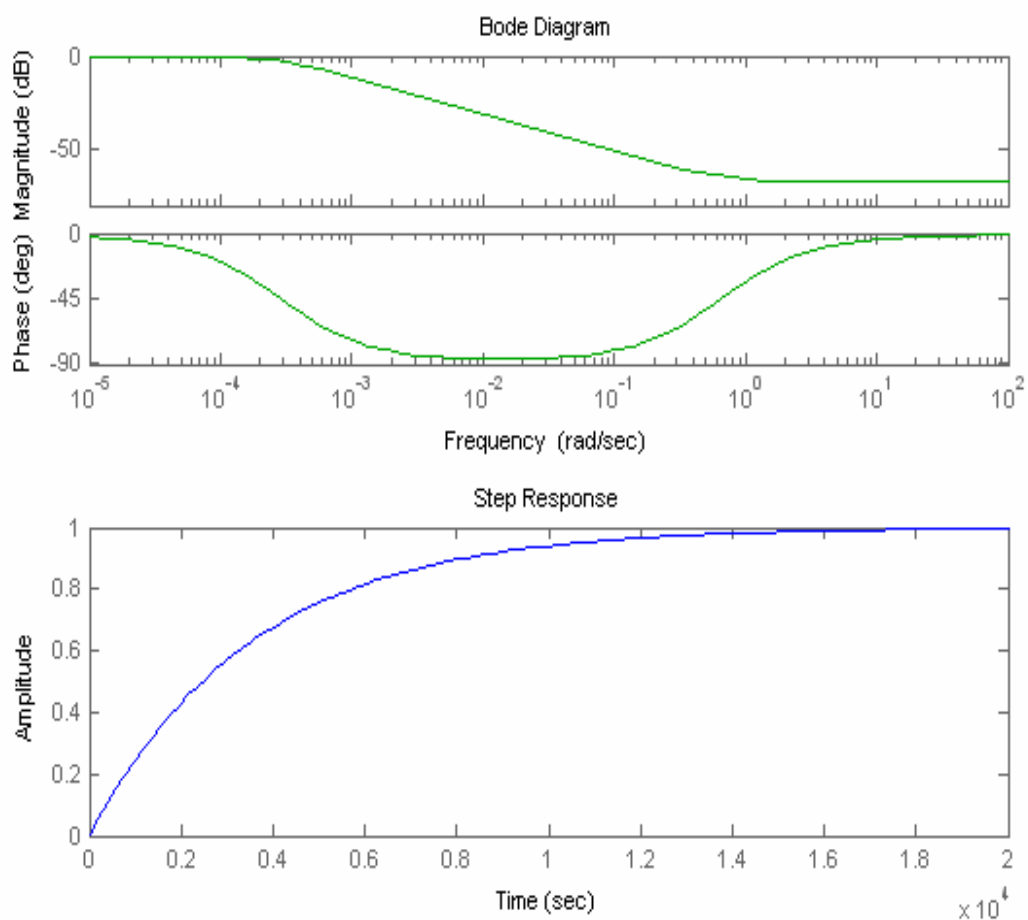
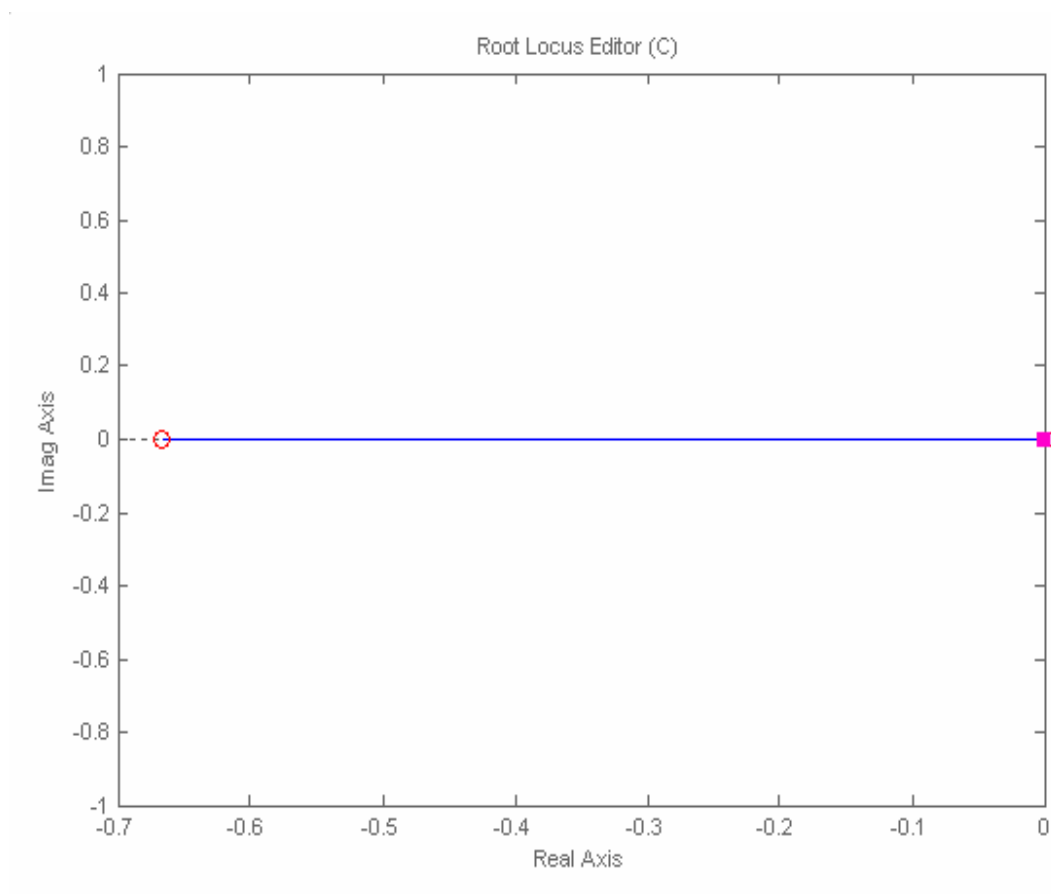


Figura 14. Diagrama de Bode

En la anterior grafica podemos observar claramente que nuestro sistema de control es estable para valores bajos de frecuencia, alrededor de 10^{-3} .

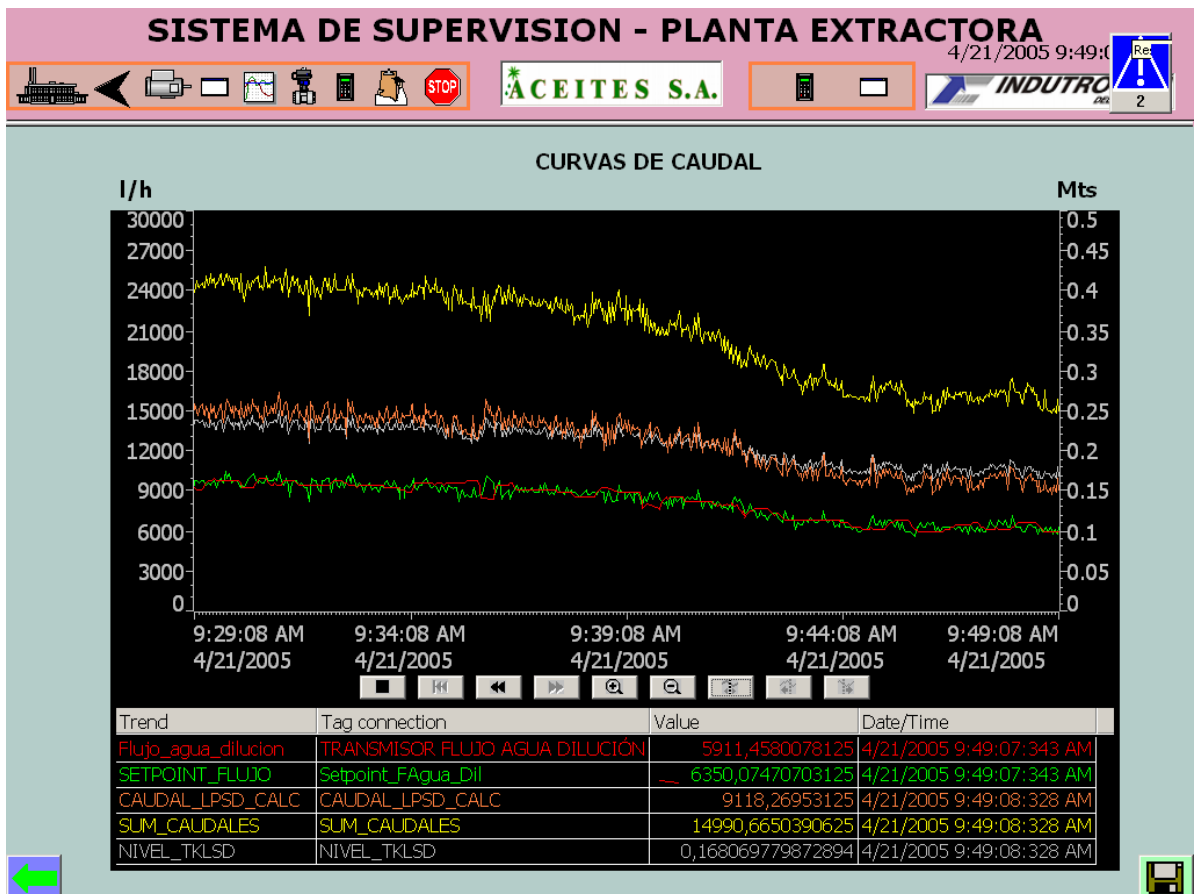
Anexo D. Rootlocusplot (lugar geométrico de la raíces)

Esta grafica se obtuvo utilizando MATLAB 6.5. En esta se puede observar que la parte real de las raíces de nuestro sistema son negativas, por lo tanto el sistema es incondicionalmente estable.

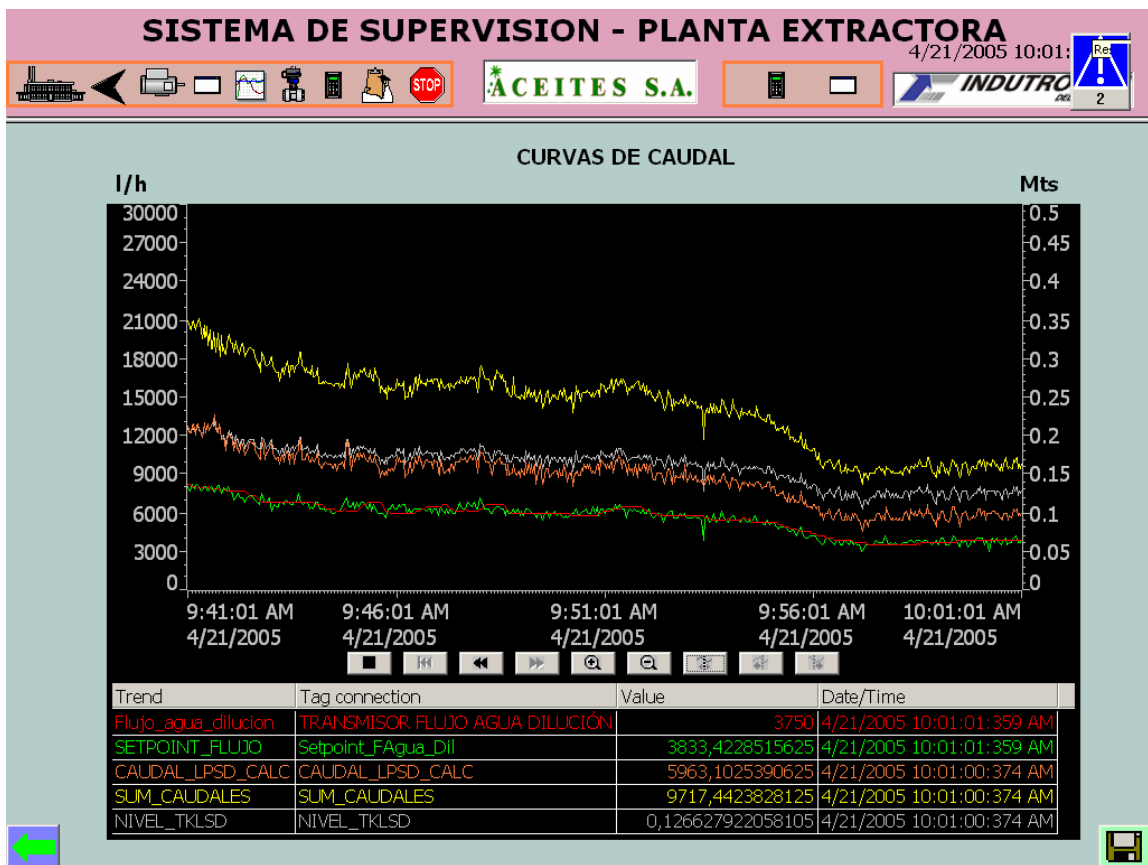


Anexo E. Curvas de Respuesta a las perturbaciones de flujo, del sistema de control de dilución.

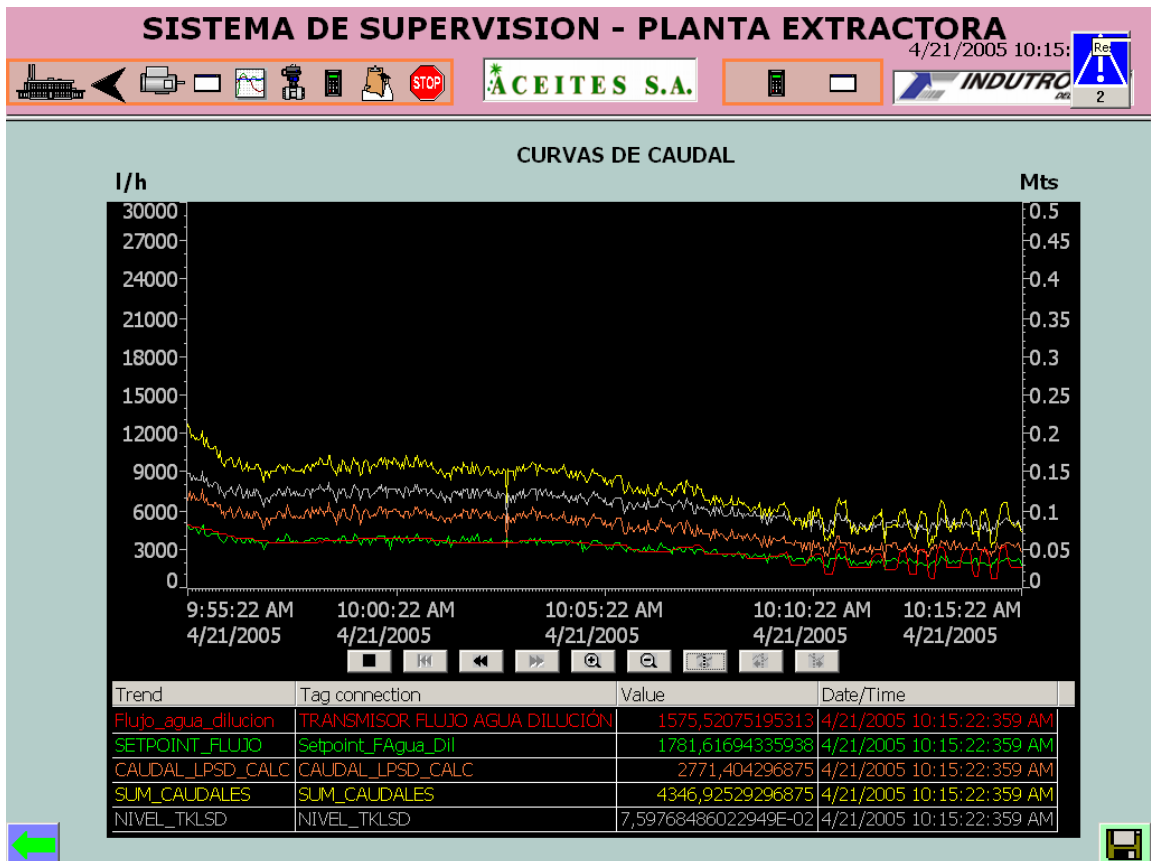
a) Cambio de operación en la etapa de prensado: se apago la prensa 4, quedan en operación 3 prensas.



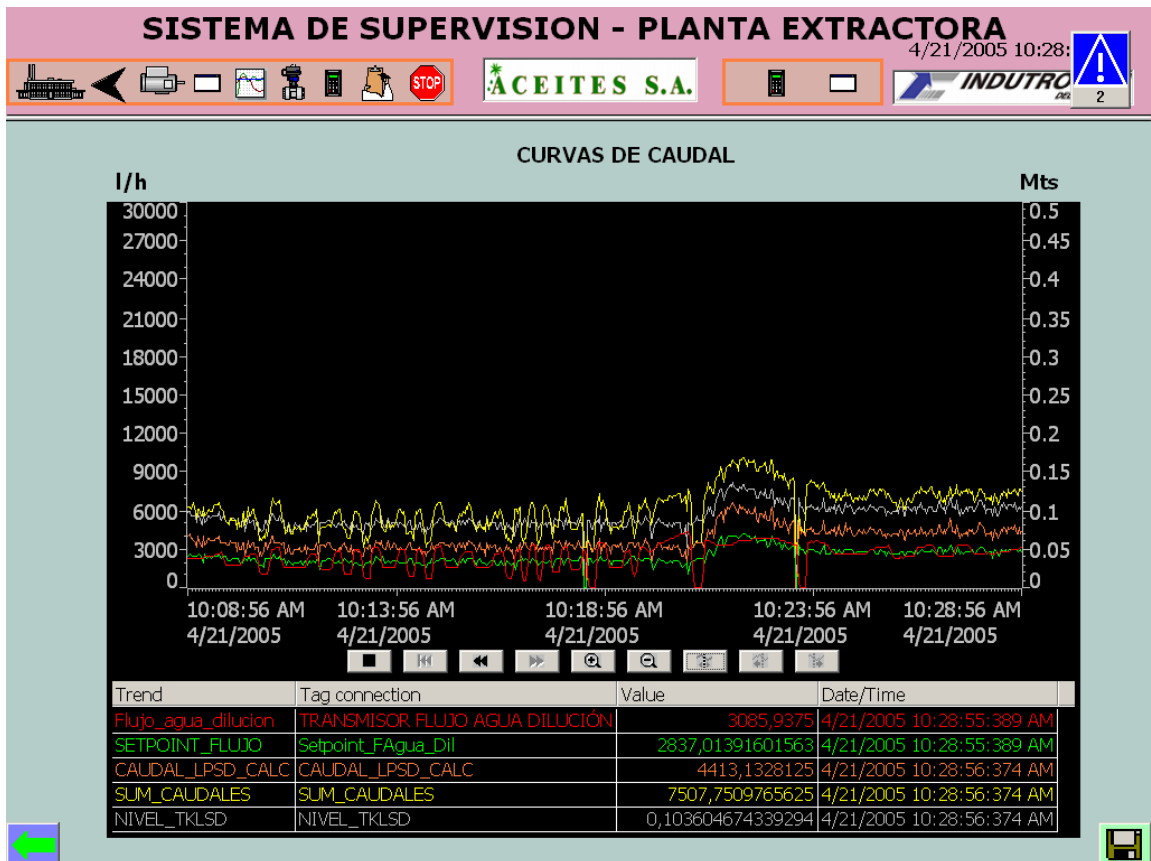
b) Cambio de operación en la etapa de prensado: se apago la prensa 3, quedan en operación 2 prensas.



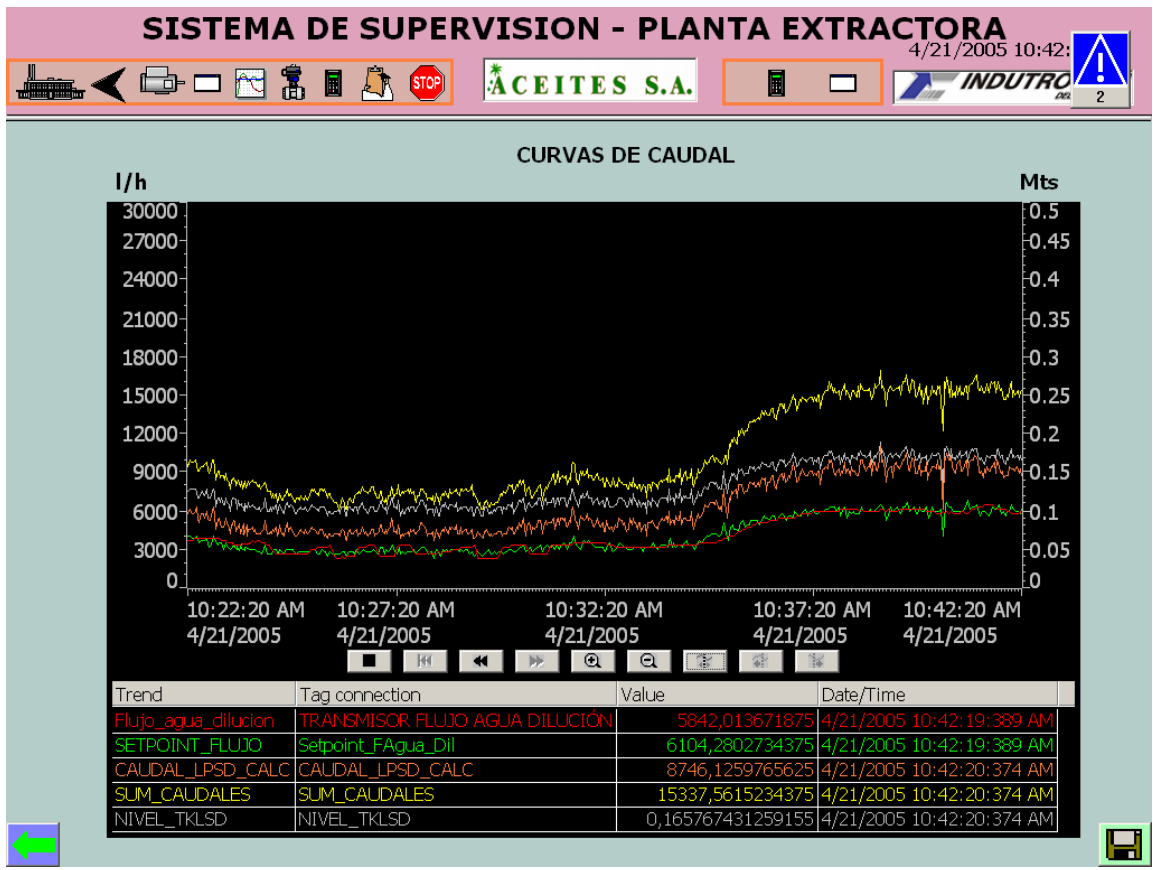
c) Cambio de operación en la etapa de prensado: se apago la prensa 2, quedan en operación 1 prensa.



d) Cambio de operación en la etapa de prensado: se encendió la prensa 2, quedan en operación 2 prensas.



e) Cambio de operación en la etapa de prensado: se encendió la prensa 3, quedan en operación 3 prensas.



f) Cambio de operación en la etapa de prensado: se encendió la prensa 3, quedan en operación 3 prensas.

