

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DE UN FILTRO PRENSA ROTATIVO EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS (PTAS) “EL CHORRITO”.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Brs. García A. Yirvida D.,
Pacheco E. Reinaldo D.
Para optar al Título
de Ingeniero Químico

Caracas, 2011.

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DE UN FILTRO PRENSA ROTATIVO EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS (PTAS) “EL CHORRITO”.

TUTORES ACADÉMICOS:

Profa. María Rincones/ Prof. Armando Vizcaya

TUTOR INDUSTRIAL: Ing. José Crespo

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Brs. García A. Yirvida D.,
Pacheco E. Reinaldo D.
Para optar al Título
de Ingeniero Químico

Caracas, 2011.

A mi madre, quien con mucho amor, esfuerzo y entrega supo educarme, orientarme y ayudarme en la realización de mis metas y estar siempre en los momentos difíciles.

Reinaldo Pacheco.

A mi padres Julio García y María E. Anare esos seres tan maravillosos que Dios me dio, por ser mi inspiración, mi motivo de vida, la razón para alcanzar todas mis metas. Reciban esta modesta dedicación como homenaje a su grandeza. Papi, mami los AMO.

A Marcos Arcila, por ser parte de mí y marcar una huella inmensa en mi corazón disfrutando a mi lado cada logro y fracaso, por ser mi compañero fiel y sobre todo por darme ese amor incondicional esta meta te la dedico con todo mi corazón... te amo

Yirvida García

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos primeramente a Dios Padre, por darnos la fuerza, espíritu y paciencia necesaria para salir adelante y vencer las grandes dificultades que por distintas razones se presentan en la vida y que nos hacen madurar.

A la ilustre Universidad Central de Venezuela, por darnos la oportunidad de formarnos como profesionales y por ser nuestro segundo hogar.

A nuestros tutores Académicos, Armando Vizcaya y María Rincones, por sus valiosos aportes y asesorías, por confiar en nosotros y darnos la oportunidad de realizar el presente Trabajo Especial De Grado.

A nuestro tutor Industrial, el Ing. José Crespo, por su profesionalismo y responsabilidad.

A la T.S.U Deruska Bolaños, por su disponibilidad y atendernos de la mejor manera cada vez que visitamos la PTAS “El Chorruto”.

A la Planta de Tratamiento de Aguas Servidas “El Chorruto”, por facilitarnos las instalaciones y al grupo de colaboradores que en ella laboran, que de una u otra forma pusieron su granito de arena para que el trabajo se llevara a cabo.

Reinaldo y Yirvida

A mis padres, por cuidar de mí, agradezco de una manera muy especial a mi madre por sacarme adelante en los momentos más difíciles, enseñarme el valor del esfuerzo, la humildad y el camino del bien, madre eres mi modelo a seguir.

A mi tía Lenis, por tanto apoyo y consejos llenos de sabiduría que hicieron de mí una mejor persona.

Al resto de mi familia, por preocuparse y colaborar en mi crecimiento personal.

A mi compañera de tesis y fiel amiga Yirvida, por aceptarme y entenderme, por ser una buena persona, de apoyo incondicional y por contribuir siempre con ideas estupendas que facilitaron y mejoraron el trabajo.

.A mis amigos y compañeros de la universidad

Al Padre José Enrique Gómez, quien con su espíritu de servicio, humildad y sencillez me enseñó a ser mejor cristiano.

A mi novia Mariana, por su entrega y esfuerzo en el crecimiento de nuestra relación y por tu apoyo desinteresado en la felicidad y en la tristeza, siempre a tu lado, mi compañera y novia fiel.

A la familia Rojas Gómez, por recibirme en su hogar en los últimos semestres de la carrera y hacerme sentir como en mi casa.

Reinaldo

Son muchas las personas especiales a las que me gustaría agradecer por tanto apoyo recibido, sin importar donde estén o si alguna vez llegan a leer este trabajo quiero dar las gracias por formar parte de mi, por todo lo que me han dado y por todas sus bendiciones.

A mi familia mis padres Julio y María por darme amor ambos les debo mi persona y mi vida. A ti mami gracias por tanto, por tu apoyo y por la confianza que depositaste en mí. Gracias porque siempre aunque lejos has estado a mi lado, mi mayor orgullo es ser tu hija. A ti papi por ser un hombre admirable, por tu amor y comprensión, gracias por creer en mí. Simplemente son los mejores padres que la vida me pudo obsequiar.

A mis hermanos Yireida, Ivan, Franklin Y Julio Cesar a todos gracias por apoyarme en esto, se que cuento con ustedes siempre, los quiero tanto... a mi hermana Sule junto a su esposo por alojarme en su casa y permitir compartir con esos dos loquitos que más que sobrinos son como mis hermanitos Emer/ Kley los amo. A todos mis sobrinos Robert, Leo, Julia, Alex, Meudy, Jorge A., Irene, Franchesca, Franyely, Franyelo, el pequeño santos, a ti mi querido Jhon por junto a mi gran Rocky formar la esencia de mi casa y tú creíste que te olvide no solo que eres la niña consentida de la casa te adoro mi Genesis, a todos gracias por llenar mi vida de felicidad.....

A mi otra familia a ti padre Cipriano C. por ser mi ejemplo a seguir por guiar mi vida, por los incalculables regaños infinitos en su rango e ilógicos bajos cualquier fundamento matemático, gracias por tus consejos, porque a pesar de todo, estas allí para cuando más te necesito, discúlpame si en algún momento te fallé, pero sobre todo discúlpame por las diferencias COLEGA!!!... y a ese ser que me distes más que hermano un amigo, Iniño donde quieras que estés agradezco a Dios tu existencia te amo, también formas parte de este triunfo.

A mi novio Marcos, por haber llegado a mi vida y llenar mi corazón de tanto amor, por siempre darme ánimos y hacerme sonreír, por ayudarme a crecer emocionalmente, gracias mi vida por demostrarme que a pesar de que hubo derrotas, la batalla no estaba perdida, por enseñarme y aprender conmigo, gracias por tanto!! A mi lindísima familia. Mis abuelitos, mis tíos y mis queridos primos por siempre confiar en mí.

A mi hermana Yolanda por todo el apoyo y por junto a Hanna formar parte de esta meta cumplida.

A los profesores y amigos Antonieta D., Antonio A., al doctorísimo Luis García, María Itriago, Robinson A., Delia D., Francisco Marques, Francisco Y., por todo apoyo recibido y el aprendizaje brindado, por hacer mi estadía en la UCV, única. Al profesor Armando Vizcaya por su incondicional amistad, por confiar en mí y por tanta paciencia lo quiero mucho.

A Yerly por darme a conocer el significado de la amistad por estar siempre presente y poder contar contigo en las buenas y en las malas, por tu apoyo, confianza y cariño gracias mi querida amiga.

A Reinaldo Pacheco por una tarde decidir ser mi compañero en este trabajo gracias por tu infinita paciencia.

A la familia Arcila-Blanco por todo el apoyo brindado y hacerme sentir parte de la familia.

A mis amigos Giovanni V., Justo, Kenny y Vanessa L. por formar parte de mis inicios en mi carrera universitaria y pasar a ser parte de mi familia, amigos no saben cuánto los quiero!!!. A Walter , Ainury, Yaquelin, Lessa, Jules, Miguel Z., Dalia, Carmen H., mi querido Jose G., Vanessa A., Fernando, Mariana S., Yolanda R., Pata, Giovanni J., Fung, Maria C., Mayerling, María R., Luis O., Saul, Betty, Egleni, Karen, Rosangela, Douglas, Alexander, Enna, Angie, Elio, Gerson, Yura, con los que tuve la dicha de compartir esta gran etapa de mi vida.

Al grupo epano por el apoyo.

A esas dos personas tan especiales mis amigas Andre/Nathy guao como hacerlo sin llorar... por compartir conmigo noches de estudios, tristezas y alegrías. Gracias por invitarme a subir junto a ustedes esta montaña de la cual hoy tocamos la cima. Sin duda alguna son parte de la mejor etapa de mi vida... amigas las quiero demasiado y a mis nuevas madres la Sra. Tita y la Sra. Quiñones!!!

Yirvida.

Caracas, Junio de 2011

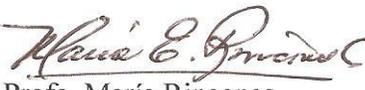
Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Química, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los Bachilleres Yirvida D. García A. y Reinaldo D. Pacheco E., titulado:

“Análisis del funcionamiento de un filtro prensa rotativo en la Planta de Tratamiento de Aguas Servidas (PTAS) “El Chorrito” ”.

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Químico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por los autores, lo declaran APROBADO.


Prof. Henry Blanco
Jurado


Prof. Francisco Yáñez
Jurado


Profa. María Rincones
Tutor Académico


Prof. Armando Vizcaya
Tutor Académico


Ing. José Crespo
Tutor Industrial



**García A., Yirvida D.
Pacheco E., Reinaldo D.**

ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DE UN FILTRO PRENSA ROTATIVO EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS (PTAS) “EL CHORRITO”.

Tutores Académicos: Profa. María Rincones/Prof. Armando Vizcaya. Tutor

Industrial: Ing. José Crespo. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Química. Año 2011, p. 58

Palabras Claves: Tratamiento de Aguas Residuales, Procesos de Filtración,

Polímeros, secado de lodos, filtros prensa rotativos.

Resumen. Este trabajo se realizó con la finalidad de lograr la operatividad de forma eficiente del filtro prensa rotativo, ubicado en la planta de tratamiento de aguas servidas “El Chorrito” ubicada en los Teques, el cual sirve al proceso de secado de lodos provenientes del tratamiento de las aguas. Para ello se realizaron un conjunto de actividades tales como: determinación de propiedades fisicoquímicas de efluentes y afluentes del sistema, verificación de parámetros de diseño del equipo y formulación de las mezclas a utilizar, empleando métodos analíticos tales como: potenciométricos, gravimétricos y filtración al vacío. Se estudiaron lodos con lapsos de almacenamiento de 5, 7 y 12 días. Se obtuvo un manual de procedimiento y una planilla de control que permitirá una mejor operación del filtro prensa rotativo, igualmente se determinó que el espesamiento del lodo aumenta la alcalinidad lo cual desfavoreció la filtrabilidad del lodo, pero el uso de un polímero catiónico disminuye ese efecto. Las principales variables que influyeron en el funcionamiento del filtro prensa rotativo fueron: caudal de lodo, presión de la compuerta, velocidad de rotación y dosificación de polímero. Entre las principales conclusiones se obtuvo que el porcentaje de sólidos en los lodos estudiados y la alcalinidad de los mismos, aumenta a medida que aumenta el tiempo de almacenamiento en los densificadores. El polímero empleado presenta características fisicoquímicas que favorecen el sistema de filtrado, la dosis de polímero aumenta al aumentar el porcentaje de sólidos en los lodos. Y entre las recomendaciones se encuentra poner en operación el otro filtro prensa rotativo existente en la planta, de manera de aumentar el volumen a filtrar, y la realización de mantenimiento preventivo a las partes del filtro prensa para garantizar un mayor tiempo de vida útil.

ÍNDICE GENERAL

CONTENIDO	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I.....	3
FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
I.1. Planteamiento del problema.....	3
I.2. Antecedentes.....	4
I.3.1 Objetivo General.....	7
I.3.2 Objetivos Específicos	7
CAPÍTULO II.....	8
REVISIÓN BIBIOGRÁFICA.....	8
II.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS LODOS.....	8
II.1.1. Definición.....	8
II.1.2. Naturaleza de los lodos.....	8
II.1.3. Composición general de los lodos.....	10
II.1.4. Concentraciones típicas de algunos lodos	11
II.2. MANEJO Y ACONDICIONAMIENTO DE LOS LODOS.....	13
II.2.1. Espesamiento de lodos	13
II.2.2. Uso de polímero como acondicionador químico.....	13
II.2.3. Filtración.....	14
II.2.5. Filtro prensa rotativo	17
II.2.5.1. “Prime Rotary Fan Press”	18
II.2.5.2. Funcionamiento	18
II.2.5.3. Proceso de arranque.....	20

II.2.5.4. Preparación y acondicionamiento del polímero	21
II.3. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS	24
II.3.1. Descripción del Diagrama de Flujo de Proceso (DFP)	24
CAPÍTULO III	27
METODOLOGÍA	27
III.1. Caracterizar los lodos generados en el sistema de tratamiento de aguas servidas.....	27
III.2. Caracterizar el polímero a ser empleado en la deshidratación de lodos	28
III.3. Establecer la relación óptima entre la dosificación del polímero y la cantidad de lodos	29
III.4. Operar el filtro prensa rotativo y establecer las variables de operación	31
III.6. Caracterizar los productos obtenidos en el proceso de filtración (filtrado y torta)	32
III.7. Definir las condiciones de rendimiento y eficiencia del proceso de filtración	34
CAPÍTULO IV	35
RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	35
IV.1. Lodos generados en el sistema de tratamiento de aguas servidas.....	35
IV.2. Relación óptima entre la dosificación del polímero y la cantidad de lodos... 38	
IV.3. Variables de operación del filtro prensa rotativo.....	40
IV.4. Productos obtenidos en el proceso de filtración (líquido filtrado y torta)	46
IV.5. Condiciones de rendimiento y eficiencia del proceso de filtración	48
IV.6. Operar el filtro prensa rotativo.....	49
CAPÍTULO V	54

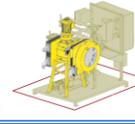
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	54
CONCLUSIONES	54
RECOMENDACIONES	55
CAPÍTULO VI.....	56
BIBLIOGRAFÍA	56
APÉNDICES.....	59
Apéndice A. Resultados pruebas de filtrabilidad en el laboratorio. Lodo de 5 días de espesamiento	A-1
Apéndice B. Resultados de las pruebas de filtrabilidad en el laboratorio. Lodo de 7 días de espesamiento	B-1
Apéndice C. Resultados pruebas de filtrabilidad en el laboratorio. Lodo de 12 días de espesamiento	C-1
Apéndice D. Resultados de las pruebas con el filtro prensa rotativo. Lodo de 5 días de espesamiento	D-1
Apéndice E. Resultados de las prueba con el filtro prensa rotativo. Lodo de 7 días de espesamiento	E-1
Apéndice F. Resultados de las prueba con el filtro prensa rotativo. Lodo de 12 días de espesamiento	F-1
Apéndice G. Cálculos Tipo	G-1
Apéndice H. Deducción del comportamiento lineal del tiempo por volumen en función del volumen.....	H-1
ANEXOS	AN-1

ÍNDICE DE FIGURAS

CONTENIDO	Pág.
Figura N° 1. Diagrama de bloques, proceso de tratamiento y evacuación de lodos	9
Figura N° 2. Gráfico de t/V en función de V (Ramalho, 1983)	16
Figura N° 3. Filtro prensa rotativo (Prime Solution).....	18
Figura N° 4. Sistema de alimentación de polímero (PrimeBlend).....	22
Figura N° 5. Activación del polímero (PrimeBlend).....	22
Figura N° 6. Panel de control del filtro prensa rotativo (Prime Solution).....	24
Figura N° 7. Diagrama de Flujo de Proceso.....	26
Figura N° 8. Equipo para determinar la resistencia específica de la torta.....	30
Figura N° 9. Pruebas de filtrabilidad. Lodo de 5 días	38
Figura N° 10. Gráfico de resistencia específica en función de la dosis de polímero. Lodo de 5 días	39
Figura N° 11. Eficiencia del filtro prensa en función del caudal de lodo	40
Figura N° 12. Sólidos suspendidos en el filtrado en función del caudal de lodo.....	41
Figura N° 13. Eficiencia del filtro prensa. Presión en la compuerta. Lodo de 5 días .	43
Figura N° 14. Eficiencia del filtro prensa. Velocidad de rotación. Lodo de 5 días.....	44
Figura N° 15. Eficiencia del filtro prensa. Dosis de polímero. Lodo de 5 días.....	45
Figura N° 16. Turbiedad del filtrado. Lodo de 5 días	46
Figura N° 17. Conductividad específica del filtrado. Lodo de 5 días	47
Figura N° 18. Sólidos en la torta. Caudal de lodo. Lodo de 5 días	48
Figura N° 19. Bomba Lift para recircular lodos.....	AN-2
Figura N° 20. Densificadores de lodo	AN-3
Figura N° 21. Contenedor de polímero (Emulsión de poliacrilamida)	AN-3
Figura N° 22. Filtro prensa rotativo	AN-4
Figura N° 23. Reactores biológicos.....	AN-4

ÍNDICE DE TABLAS

CONTENIDO	Pág.
Tabla N° 1. Composición química y propiedades de lodos sin tratar y digeridos.....	11
Tabla N° 2. Concentraciones típicas de diferentes tipos de lodos.....	12
Tabla N° 3. Métodos de análisis para la caracterización de los lodos.....	28
Tabla N° 4. Métodos de análisis para la caracterización del filtrado.	33
Tabla N° 5. Métodos de análisis para la caracterización de la torta.....	34
Tabla N° 6. Características Físico-Químicas del lodo.....	35
Tabla N° 7. Características físico-químicas del polímero	37
Tabla N° 8. Comparación dosis óptima obtenida en el laboratorio y en el filtro prensa	45
Tabla N° 9. Condiciones de rendimiento y eficiencia del filtro	49

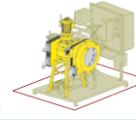


INTRODUCCIÓN

La finalidad de este Trabajo Especial de Grado es llevar a cabo el análisis del funcionamiento de un filtro prensa rotativo empleado en el proceso de deshidratado de lodos en la PTAS “El Chorrito”.

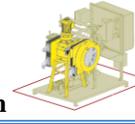
El tratamiento de aguas residuales implica el manejo de subproductos, llamados lodos, estos en general suelen ser un líquido o líquido-semisólido con un contenido de sólidos entre 0,25 y 12%, el lodo constituye el desecho de mayor volumen originado de los tratamientos, y está formado principalmente por las sustancias responsables del carácter degradable de las aguas residuales no tratadas. La fracción de lodo a evacuar generado en el tratamiento biológico, está compuesta principalmente de materia orgánica y sólo una pequeña parte está formada por materia sólida, estos lodos no deben evacuarse sin un tratamiento previo, ya que estaría en contradicción con los objetivos de los procesos de tratamientos.

Se abordará el estudio de diversos factores que influyen en un sistema de filtrado de lodos empleando un filtro prensa rotatorio, con el fin de optimizar su funcionamiento, estudiando para ello: la caracterización de polímero a ser empleado, por ello se dan a conocer las siguientes propiedades apariencia física, gravedad específica, pH en solución, naturaleza de la carga, método de adición, toxicidad, densidad y viscosidad, esta caracterización se hizo en función de las propiedades determinadas en el laboratorio y aquellas que se requirió su búsqueda en bibliografía especializada. Al igual que para el polímero se llevó a cabo la caracterización de los lodos de entrada y los generados en el sistema de tratamiento de aguas servidas considerando las siguientes características fisicoquímicas humedad, sólidos totales, pH y resistencia a la drenabilidad, empleando los métodos analíticos gravimétricos, potenciométricos y filtración al vacío, este último método analítico también se empleó para establecer la relación óptima de dosificación del polímero y la cantidad de lodos a filtrar. Otro aspecto importante a considerar para lograr el buen funcionamiento del filtro son las variables de operación del mismo, a saber el caudal de alimentación de lodo,



dosificación del polímero, velocidad de rotación de la prensa y la presión en la compuerta de restricción en la descarga de la prensa.

Es importante señalar que los métodos analíticos empleados para conocer las diversas propiedades de los lodos se encuentran normalizados en Standard Methods (AWWA, 1998).



CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

En este capítulo son expuestos los fundamentos en los cuales se basa el proyecto, los mismos contemplan el planteamiento del problema y los objetivos, tanto generales como específicos.

I.1. Planteamiento del problema

En el contexto del programa de mejoramiento y recuperación del Río Guaire, se construyó la Planta de Tratamiento de Aguas Servidas “El Chorrillo”, ubicada en las riveras del río San Pedro en Las Adjuntas, Los Teques, la cual trata aguas de la quebrada “El Rincón”.

En este proceso de tratamiento de aguas, en su modalidad de lodos activados, se producen lodos, los cuales hay que disponer en forma adecuada, por lo que deben tratarse antes de ser evacuados. Para ello la planta cuenta con densificadores de lodo (ver Figura N° 20, Sección Anexos): dos (2) tanques cilíndricos de 8,00 m de diámetro y 12,00 m de altura, para la densificación de los lodos excedentes y su posterior deshidratación. En la planta existen dos sistemas de secado; el primero mediante los lechos de secado donde se aplican procesos de evaporación y percolación. Este proceso de secado al aire de lodos en lechos de arena, es uno de los métodos más económicos de eliminación del agua, pero depende de las condiciones climáticas favorables (seco y caluroso) para llevar a cabo la máxima evaporación, adicionalmente requieren grandes áreas, la cual es función de la precipitación y evaporación previsible y de las características de los lodos (los gelatinosos requieren mayor área); es por ello que en el proceso de tratamiento de lodos se dispuso de un método adicional. El segundo sistema de deshidratación consiste en un filtro prensa rotativo, donde se adiciona una mezcla de polímero-agua al lodo con el fin de mejorar el proceso de secado de los lodos. El filtro funciona completamente automatizado y



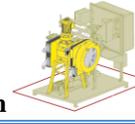
presenta la ventaja de que se obtienen tortas con grados de sequedad que oscilan entre 20% y 32%, dependiendo de las variables de operación.

Hasta los momentos no se ha podido llevar a cabo el funcionamiento óptimo del filtro por la empresa encargada de la planta, de manera que no ha sido posible utilizar este equipo en el secado de lodos. Así se plantea la realización de éste Trabajo Especial de Grado, con la finalidad de analizar el rendimiento y la eficiencia del filtro prensa. Para ello se requiere la realización de procedimientos como la determinación de propiedades fisicoquímicas del afluente y efluente del sistema de filtrado, verificación de parámetros de diseño del equipo y formulación de las mezclas a utilizar. Todo ello necesariamente producirá un procedimiento detallado de operación del sistema que permitirá un mayor rendimiento y eficiencia, de manera de lograr el objetivo planteado por los responsables de la depuración de estas aguas residuales.

I.2. Antecedentes

Para la realización de este trabajo de grado, se realizó una investigación sobre diferentes trabajos referentes al acondicionamiento y deshidratación de lodos, entre ellos se tiene:

En el año 1994, Méndez, O. desarrolló el trabajo titulado: *“Evaluación de la necesidad de instalación de un sistema de secado de lodos y las diferentes variables que permiten su diseño y construcción para los efluentes líquidos de la industria Remavenca, ubicada en La Encrucijada Estado Aragua”*. En este trabajo se evaluaron dos sistemas de secado de lodos: la centrifugación y los lechos de secado. Para ello se determinaron las características físico-químicas del lodo a tratar en ambos sistemas, las dimensiones del lecho de secado tomando en cuenta el contenido de humedad de la torta en un período de días, de igual forma para la centrifugadora se determinaron las condiciones óptimas de operación basándose en el contenido de humedad en la torta y el contenido de sólidos suspendidos en el líquido clarificado. Entre sus principales conclusiones se tiene que para el caso de centrifugación, el acondicionamiento químico previo con el polímero NALCO 7122 es importante, ya



que la eficiencia de recuperación de sólidos aumenta a medida que se incrementa la dosis de polímero. Para el caso de los lechos de secado se producen tortas con un contenido de humedad que oscila entre 9,8% y 7% en un periodo de 25 días.

En el año 2002, Escobar, J. realizó el trabajo titulado: “*Selección de la dosis óptima de polímero para el acondicionamiento y deshidratación de lodos de plantas de agua potable mediante centrífugas de laboratorio*”. Para éste estudio se emplearon tres tipos de lodos, los cuales fueron caracterizados en términos de porcentaje de sólidos totales, pH y resistencia específica. Se empleó como acondicionador sulfato de aluminio. Se realizaron variaciones en el tiempo de rotación, la velocidad de rotación y la dosis de polímero en los tres lodos estudiados. Entre sus principales conclusiones se constató que el uso de polímero como acondicionador favoreció la deshidratación del lodo en la centrífuga. Sin embargo, cuando se emplearon dosis de polímero mayores a la apropiada no hubo efecto favorable y algunas veces ocurrió desmejoramiento de la calidad de la torta de lodo obtenida después de la centrifugación, incluso hasta cuando se compara con aquella obtenida sin adición de polímero. Adicionalmente, se obtuvo una concentración de sólidos promedio de 25%.

En el año 1996, Sasia, P. desarrolló el trabajo titulado: “*Polímeros de acrilamida y copolímeros derivados para el tratamiento de aguas*”. Para ello se analizaron, para diversos polímeros, características como: estabilidad termodinámica, alto peso molecular, distribuciones estrechas de peso molecular y alta concentración de materia activa. Entre sus principales conclusiones destaca que entre las propiedades fundamentales de un producto sintético de naturaleza polimérica, para proporcionar un rendimiento adecuado, están el elevado peso molecular y la carga iónica (aniónica o catiónica) en sus moléculas. Solamente monómeros como la acrilamida, el ácido acrílico y el cloruro de aciloxi-etil-trimetil-amonio (CLAETMA, usualmente llamado Q9) cumplen con estas propiedades y se emplean para sintetizar más del 95% de los floculantes existentes en el mercado.

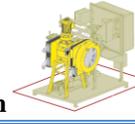
En los últimos años empresas como Prime Solution han construido filtros prensas rotativos que ofrecen un proceso continuo de secado de lodos. Estos filtros son



diseñados para alcanzar alto rendimiento. Investigaciones realizadas permiten a Prime Solution concluir que la evaluación de los lodos de aguas residuales es diferente a cada lodo tratado y la comprensión de su aplicación es el primer paso para llegar a una solución efectiva. La calidad del flóculo a formar, para lograr una mayor aceleración en la separación, es directamente proporcional a la formación de la disolución de polímero y ésta depende de las siguientes reglas básicas:

- ✓ La emulsión polimérica debe ser añadida al agua y no al revés
- ✓ La alta energía de mezcla/corte se debe aplicar cuando la emulsión entra en contacto con el agua.
- ✓ Los únicos ingredientes necesarios son agua y polímero (Prime Solution, 2010).

Los procedimientos realizados y las conclusiones alcanzadas en las referencias anteriores contribuirán a la realización de éste Trabajo Especial de Grado, ya que ayudan al entendimiento del problema, lo que permite plantear las soluciones más viables y al mismo tiempo aportan gran cantidad de experiencia para decidir que caracterizaciones son necesarias de hacer para conocer la eficiencia del filtro prensa rotativo.



I.3. OBJETIVOS

A continuación se muestran los objetivos a cubrir para lograr la realización del Trabajo Especial de Grado:

I.3.1 Objetivo General

Analizar el rendimiento y eficiencia de un filtro prensa rotativo en una planta de tratamiento de aguas servidas.

I.3.2 Objetivos Específicos

1. Caracterizar los lodos generados en el sistema de tratamiento de aguas servidas.
2. Caracterizar el polímero a ser empleado en la deshidratación de lodos.
3. Establecer la relación óptima entre la dosificación del polímero y la cantidad de lodos.
4. Establecer las variables de operación del filtro prensa rotativo.
5. Operar el filtro prensa rotativo.
6. Caracterizar los productos obtenidos en el proceso de filtración (líquido filtrado y torta producida).
7. Definir las condiciones de rendimiento y eficiencia del proceso de filtración.



CAPÍTULO II

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En esta sección se dan a conocer los conceptos básicos asociados a los objetivos planteados en el presente Trabajo Especial de Grado.

II.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS LODOS

II.1.1. Definición

El lodo es un líquido o líquido semisólido con un contenido de sólidos entre 0,25% y 12%; está formado en muchas ocasiones por las sustancias responsables del carácter desagradable de las aguas residuales no tratadas. Los lodos generados en los procesos biológicos tienen una gran cantidad de materia orgánica que pueda estar sujeta a procesos de descomposición no deseables (Ramalho, 1983).

II.1.2. Naturaleza de los lodos

La cantidad y características de los lodos varía según su origen, envejecimiento y el tipo de proceso al que haya sido sometido. La Figura N° 1 muestra un diagrama de bloques de los procesos de tratamiento y evacuación de los lodos, en él se distinguen las concentraciones típicas de sólidos en aguas residuales, así como algunos de los procesos con los que son tratados (Metcalf y Eddy, 1979).

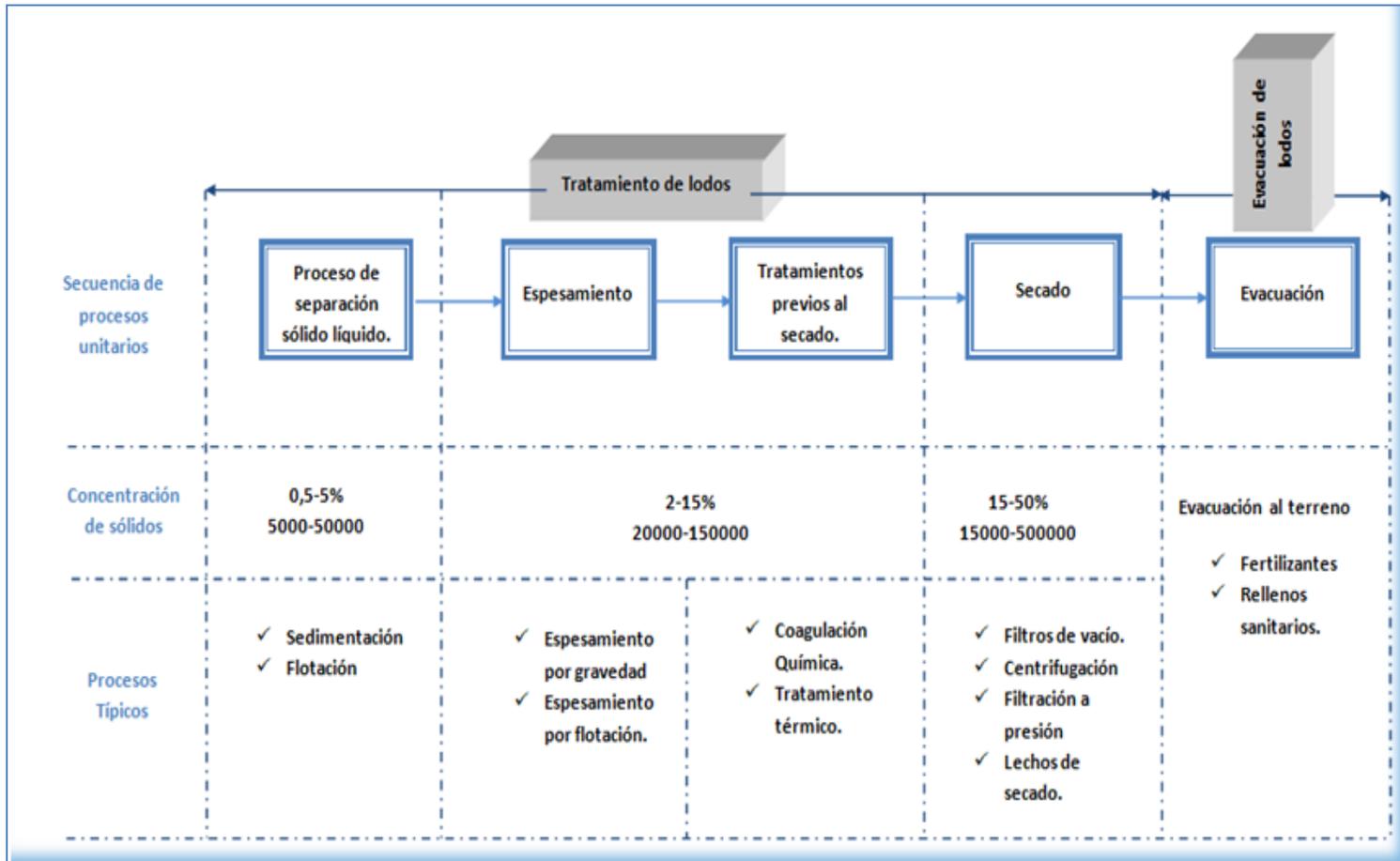


Figura N° 1. Diagrama de bloques, proceso de tratamiento y evacuación de lodos



De acuerdo con el proceso de tratamiento de aguas, los lodos generados son:

- Lodos primarios: Son aquellos que se extraen de los sedimentadores primarios, consisten principalmente en arena fina, sólidos inorgánicos y sólidos orgánicos.
- Lodos secundarios: son los lodos en exceso generados en el tratamiento secundario biológico. Ellos consisten en lodos biológicos, resultado de la conversión de productos de desechos solubles de efluentes primarios. Los lodos secundarios son producidos por procesos de tratamientos biológicos secundarios, lodos activados, lechos percoladores y biodiscos, entre otros. Aunque pueden producirse muchas variaciones, todos los lodos secundarios resultan de un proceso biológico de aguas residuales.
- Lodos mixtos: es la combinación de lodos primarios y secundarios que tendrán propiedades aproximadamente proporcionales a la respectiva composición de cada tipo.
- Lodos químicos: resultan cuando se agregan coadyudantes químicos para mejorar la remoción de los sólidos suspendidos o para precipitar algún elemento. Las variables que afectan las características de los lodos químicos son: las propiedades fisicoquímicas del agua, pH, dureza, mezclado, tiempo de reacción y forma de floculación (Metcalf y Eddy, 1979).

II.1.3. Composición general de los lodos

La composición química del lodo es de interés para la selección del método de disposición final, en la evaluación de su posibilidad de uso como acondicionador de suelos o en el mejor de los casos como fertilizante orgánico. Muchos de los constituyentes químicos que se muestran en la Tabla N° 1, incluyendo nutrientes, son importantes para considerar el uso final de los lodos procesados y del líquido separado durante el proceso, la medida de pH, alcalinidad y contenido de ácidos orgánicos son importante en el control del proceso de la digestión anaerobia. El



contenido de metales pesados, pesticidas e hidrocarburos tienen que determinarse cuando se considera la incineración y la aplicación en suelos. El contenido de energía en lodos es importante si se contempla un proceso de reducción térmica.

Tabla N° 1. Composición química y propiedades de lodos sin tratar y digeridos

Propiedades de los lodos	Lodos primarios sin tratar		Lodos primarios digeridos		Lodos secundarios crudos
	Rango	Típico	Rango	Típico	Rango
Sólidos totales secos (ST), %	2,0-8,0	5,0	6,0-12	10	0,83-1,16
Sólidos volátiles (%de ST)	60-80	65	30-60	40	59-88
Alcalinidad (mg/L como CaCO ₃)	500-1500	600	2500-3500	3000	580-1100
Ácidos orgánicos (mg/L como H _{AC})	200-2000	500	100-600	200	1100-1700
Contenido de energía, KJ ST/kg	23000-29000	25000	9000-14000	12000	19000-23000

Fuente: Metcalf &Eddy, Inc., Wastewater Engineering, Treatment, Disposal, and Reuse. International Edition 2002.

II.1.4. Concentraciones típicas de algunos lodos

Los lodos de purga son una mezcla de sólidos sedimentables y agua, las concentraciones son variables dependiendo del tipo de lodo; en la siguiente tabla se presentan concentraciones típicas de diferentes lodos.



Tabla N° 2. Concentraciones típicas de diferentes tipos de lodos

Tipo de lodo	Concentraciones de sólidos % de sólidos (peso seco)	
	Intervalo	Concentración típica
Primario	5,0-9,0	6,0
Primario + purga de lodo activado	3,0-8,0	4,0
Primario + purga de filtro percolador	4,0-9,0	5,0
Primario avanzado (con cloruro férrico)	0,5-3,0	2,0
Primario avanzado (con cal en baja concentración)	2,0-8,0	4,0
Primario avanzado (con cal en alta concentración)	4,0-10,0	8,0
Lodo activado convencional (después del sedimentador primario).	0,5-1,5	0,8

Fuente: Metcalf & Eddy, Inc., Wastewater Engineering, Treatment, Disposal, and Reuse. International Edition 2002

La cantidad de sólidos es relativamente pequeña. Por ejemplo para el caso de la concentración típica del lodo primario: 6%, esto quiere decir que en cada metro cúbico de lodo primario (1020 Kg aproximadamente) hay 60 kg de sólidos. El contenido de agua es muy grande, por lo tanto es necesario concentrar más los sólidos antes de estabilizarlos, para ello se aplica el espesamiento (Metcalf y Eddy, 1979).



II.2. MANEJO Y ACONDICIONAMIENTO DE LOS LODOS

II.2.1. Espesamiento de lodos

El espesamiento es un procedimiento utilizado para incrementar el contenido de sólidos de lodos por unidad de volumen, es decir, para remover una parte del líquido y es el primer paso normal en los procesos de evacuación de lodos.

Algunas de las ventajas del espesamiento son:

- Mejora el funcionamiento del digestor y reduce las inversiones, si se recurre a la digestión posterior.
- Reduce el volumen de lodos antes de la evacuación al terreno o al mar.
- Mejora la economía de los sistemas de deshidratación (centrífugas, filtros de vacío, filtros a presión).

El espesamiento se realiza comúnmente de cinco maneras diferentes: gravedad, flotación, centrifugación, filtro banda y tambor rotatorio (Ramalho, 1983).

II.2.2. Uso de polímero como acondicionador químico

Los floculantes de alto peso molecular (polímero) al entrar en contacto con el lodo forman un flóculo más grande, aumentando la drenabilidad del mismo al eliminar parte del agua intersticial junto al agua libre que éste posee, favoreciendo el secado del lodo y mejorando la eficiencia del equipo de deshidratación mecánica que se utilice (Ramalho, 1983).

El tratamiento previo de los lodos es tan importante como el equipo utilizado para la separación, engrosamiento y desagüe de ese lodo. Mientras que algunas corrientes de desechos requieren una combinación de opciones de pretratamiento, la mayoría sólo requiere la adición de un coagulante orgánico o floculante para la aglomeración de las partículas muy finas. La formación de aglomeraciones o flóculos, asiste en la aceleración de la captura de la mayor parte de los sólidos aumentando la concentración de los sólidos al final del proceso (Metcalf y Eddy, 1979).



El empleo de un polímero adecuado para el lodo no sólo aumenta la captura de los sólidos en el mismo y los sólidos secos resultantes en la torta, sino también aumentará la capacidad de rendimiento del sistema utilizado para la separación (Metcalf y Eddy, 1979).

La mayoría de los biosólidos, están cargados negativamente por lo que la adición de un polímero catiónico será necesaria (alta densidad de carga y alto peso molecular), ya que son muy eficaces para extraer aun más parte del agua ligada y transformarla en agua libre (Méndez, 1994).

Las emulsiones tienden a ser la mejor opción general respecto a otras formas como polvos, gránulos y dispersiones porque están en una forma líquida fácil de usar y pueden aumentar la eficacia en el proceso. Además poseen estabilidad termodinámica, es decir, productos que no presentan degradación, cadenas vivas, separación de fases con el tiempo (Sasia, 1996).

Los productos líquidos presentan notables ventajas frente a los equivalentes en estado sólido, como son su mayor facilidad de manejo, sistemas de producción más sencillos y controlables, aplicación final más uniforme (Sasia, 1996).

Los productos químicos que tienen comunmente usos como agentes floculantes son: sulfato de alúmina $(\text{SO}_4)_3 \text{Al}_2 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$; sulfato ferroso $\text{SO}_4\text{Fe} \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; sulfato férrico $(\text{SO}_4)_3\text{Fe}_2$; cloruro férrico (Cl_3Fe) y polielectrolitos. Estos últimos han incrementado su presencia en el mercado debido a que los polímeros orgánicos tienen la posibilidad de actuar como iones cargados positivos o negativos y presentan entre sus principales ventajas el uso de pequeñas dosis y la eliminación del problema del almacenamiento (Metcalf y Eddy, 1979).

II.2.3. Filtración

La filtración es la separación de partículas sólidas contenidas en un fluido pasándolo a través de un medio filtrante, sobre el cual se depositan los sólidos. El medio filtrante es la barrera que permite que pase el líquido, mientras retiene la mayor parte



de los sólidos. Dicho medio puede ser una pantalla, tela, papel, o un lecho de sólidos. El líquido que pasa a través del medio filtrante se conoce como filtrado o licor (McCabe, 1991).

La ecuación básica de la filtración, obtenida a partir de la ley de Poiseuille-D'Arcy, queda definida como (Ramalho, 1983):

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\Delta P}{R_{torta} + R_{medio\ filtrante}} \quad (Ec. 1)$$

Donde:

V : Volumen de filtrado (cm^3)

t : Tiempo de filtrado (s)

$\frac{dV}{dt}$: Velocidad de filtración (cm^3/s)

R_{torta} : Resistencia ofrecida por la torta al paso de filtrado (cm/g)

$R_{medio\ filtrante}$: Resistencia ofrecida por el medio filtrante

ΔP : Diferencia de presión aplicada a través de la torta (mmHg)

A partir de la ecuación anterior se obtiene:

$$\frac{t}{V} = \left(\frac{\mu \cdot r \cdot c}{2 \cdot A^2 \cdot P} \right) \cdot V + \frac{\mu \cdot R_m}{A \cdot P} \quad (Ec. 2)$$

Nota: ver deducción de la ecuación en el Capítulo Apéndices Sección H.

Por lo tanto se deriva que el gráfico de t/V en función de V daría una línea recta. Los valores de resistencia específica de la torta r y del medio filtrante R_m , se evalúan a partir de la pendiente y la intersección de la recta con las ordenadas, respectivamente, siendo:

$$r = \left(\frac{2 \cdot A^2 \cdot P}{\mu \cdot c} \right) \cdot p \quad (Ec. 3)$$

$$R_m = \left(\frac{A \cdot P}{\mu} \right) \cdot i \quad (Ec. 4)$$

Donde:

p : Pendiente

i : Intersección



La siguiente figura representa un gráfico de este tipo:

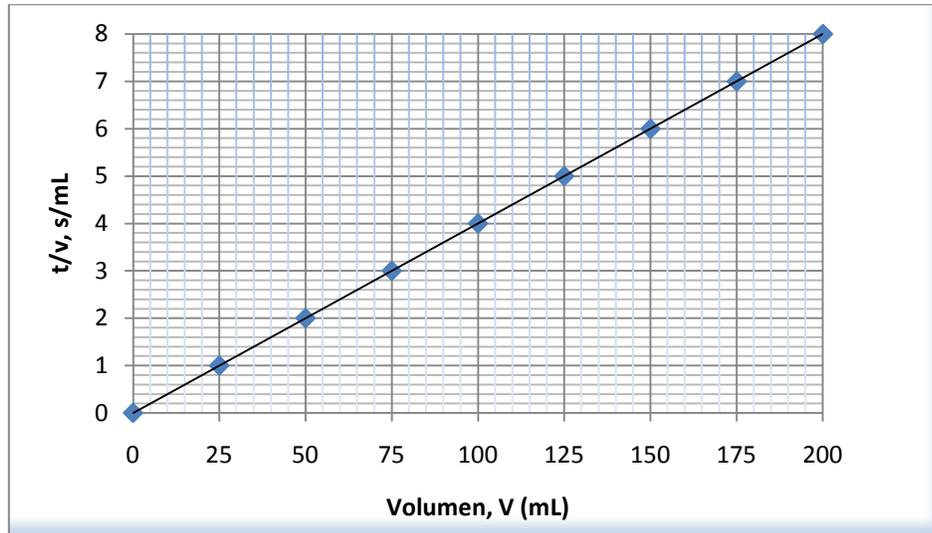


Figura N° 2. Gráfico de t/V en función de V (Ramalho, 1983)

La resistencia específica tiene gran utilidad para comparar las características de filtrabilidad de distintos lodos y determinar las necesidades de coagulación para producir una torta que ofrezca resistencia mínima.

Los factores principales que afectan a la filtración son:

- La naturaleza de la suspensión
- La presión aplicada
- La resistencia de la torta a la filtración
- La temperatura de la suspensión
- Las características de las partículas
- La concentración de los sólidos en suspensión
- El efecto de la utilización de floculantes y de la agitación
- El efecto de la naturaleza del medio filtrante

El tamaño de las partículas también tiene un efecto en la filtración, pequeños cambios en el tamaño de la partícula afectarán a las partículas formadas en la torta. Por lo tanto; es importante mantener cierto control sobre el tamaño de partícula adecuado



en la alimentación del filtro; existen varias técnicas para facilitar y mejorar la separación, por ejemplo, la adición de ciertos electrolitos, cal y sales de hierro pueden actuar como coagulantes o floculantes, por lo que producen cambios en las superficies de las partículas (McCabe, 1991).

A continuación, se discutirá lo referente al filtro prensa.

II.2.5. Filtro prensa rotativo

La filtración de lodos en filtros prensa ha sido viable económicamente hasta ahora porque los costos de mano de obra no son muy altos, debido a las dificultades de automatización completa de la operación. Actualmente se dispone de equipos completamente automatizados, como “Prime Rotary Fan Press“ diseñado por la empresa Prime Solution, este filtro cuenta con apertura, descarga de torta y lavado automáticos. La ventaja principal sobre los filtros de vacío es que puede obtenerse una torta más seca (Prime Solution, 2010).

En la evaluación del filtro prensa rotativo juega un papel muy importante el porcentaje de eficiencia. En la determinación del porcentaje de eficiencia se establece el criterio de obtener una torta de lodo lo suficientemente seca. Esta eficiencia está formulada en términos de recuperación de sólidos, expresados como porcentaje de sólidos suspendidos en el lodo de alimentación que queda en la torta de lodo que se descarga y se calcula mediante la siguiente expresión (Metcalf y Eddy, 1979):

$$\%E_f = \frac{C_C \times (C_S - C_R)}{C_S \times (C_C - C_R)} \times 100 \quad (Ec. 5)$$

Donde:

$\%E_f$: Eficiencia del filtro prensa rotativo (%)

C_C : Concentración de sólidos en la torta de lodos (% m/m)

C_S : Concentración de sólidos en el lodo de alimentación (% m/m)

C_R : Concentración de sólidos en el líquido clarificado (% m/m)



II.2.5.1. “Prime Rotary Fan Press”

El filtro prensa rotativo es un equipo diseñado para alcanzar altos niveles de rendimiento en los procesos de filtración de lodos, permite obtener sólidos con grado de sequedad que oscilan entre 3,5 y 16 kg/cm², utiliza 0,75-13 caballos de fuerza implicando un 15-20% menos energía que la prensa de la correa y casi el 90% menos que la centrífuga. En promedio, el filtro prensa rotativo utiliza 13 a 20 libras de polímeros por tonelada de biosólidos para lograr extracto seco de la torta que van desde 18 hasta 26% para los biosólidos digeridos anaeróbicamente, 15-20% para los biosólidos digeridos aeróbicamente y 20-32% para los mixtos lodos primarios y secundarios. Diseñado para manejar flujos de hasta 160 GPM y puede producir cerca de 2000 kilos de lodo seco por hora (Prime Solution, 2010). A continuación se muestra una imagen del filtro Prime Rotary Fan Press:



Figura N° 3. Filtro prensa rotativo (Prime Solution)

II.2.5.2. Funcionamiento

Prime Rotary Solution, ha sido diseñado utilizando la física fundamental: la fricción y el uso de presión para forzar el agua a través de la vía de menor resistencia. Cuando el lodo entra al canal de alimentación es introducido al sistema de filtrado por una



bomba de desplazamiento positivo (PD), mientras el polímero se diluye en el sistema de alimentación-mezclado, aproximadamente 0,2-0,5 % en agua, para luego ser inyectado en el lodo, esto se realiza después de la bomba de alimentación pero antes de la válvula de mezcla ajustable, la cual es responsable de proporcionar la energía requerida por la mezcla polímero/lodo para que ocurra la formación óptima del flóculo. La mezcla se introduce a través una tubería de retención, donde se debe garantizar el tiempo necesario para que se lleve a cabo un mezclado completo y el lodo flocule antes de llegar al filtro. El operador tiene la opción de abrir la válvula del “by-pass” del lodo (debe cerrar la válvula de alimentación al filtro) lo cual permite que el lodo sea desviado hacia el drenaje hasta que el flóculo se haya formado. Una vez que la formación apropiada se haya logrado, la válvula de alimentación al filtro debe abrirse (cerrando lentamente la válvula del “by-pass”), enviando la mezcla al filtro.

El canal entre los platos rotatorios del filtro comienza a recibir el lodo permitiendo al líquido libre salir a través de las pantallas del filtro y los sólidos permanecen atrapados en los platos filtrantes. El filtrado se descarga por gravedad desde el sistema a través de drenajes localizados en la parte baja de cada canal de salida. El lodo continúa secándose a medida que gira alrededor del canal, eventualmente se formará un tapón de torta del lado de descarga del filtro. La formación del tapón de torta permite que esta comience su salida restringida y controlada, acoplada con las fuerzas de fricción de los platos del filtro, resultando en una torta muy seca que es sacada del sistema en la medida que la bomba continúa alimentando lodo (Prime Solution, 2010).

La capacidad y efectividad del Prime Rotary Fan Press se ve influenciada por los siguientes factores: el caudal de alimentación de lodo, la velocidad rotacional de los elementos del filtro, presión de entrada del lodo y la presión en la compuerta de restricción ubicada en la salida de la prensa (por donde sale la torta formada). Valores altos de cualquiera de estos parámetros disminuirá el rendimiento total del equipo. Mientras más baja sea la presión de entrada del lodo y menor la velocidad de rotación



de los elementos del filtro se obtendrán mejores resultados. La compuerta de restricción neumática en la salida es el otro factor determinante en la humedad de la torta formada; sin embargo se puede aumentar la presión en esta compuerta hasta un punto donde la velocidad de captura o retención de los sólidos disminuya, aumentando la humedad de la torta y disminuyendo su velocidad de salida (Prime Solution, 2010).

II.2.5.3. Proceso de arranque

Los platos filtrantes pueden requerir limpieza durante el proceso, por lo cual el filtro cuenta con dos (2) opciones para la limpieza de los mismos, las cuales son controladas por las válvulas de agua de lavado. Una válvula está diseñada para lavar los platos desde adentro hacia afuera (durante el proceso) y la otra opción de limpieza limpia la parte externa de los platos (parte de una limpieza diaria).

La consistencia del lodo es de suma importancia en el rendimiento total del equipo. Una vez seleccionado el tratamiento requerido y antes de enviar el lodo acondicionado al filtro, se debe operar el sistema en el modo by-pass. Mientras el by-pass esté funcionando se puede tomar una muestra del lodo acondicionado a través de la válvula toma muestras. Antes de abrir la válvula(s) de alimentación al filtro, se debe chequear la estabilidad del lodo, el acondicionamiento, la presencia de agua libre limpia y la posibilidad de filtrar sin que se pierdan los sólidos preacondicionados por deslizamiento o ruptura del flóculo.

Mientras más concentrados estén los sólidos en el lodo a tratar, mayor será la energía de mezclado requerida para obtener el pre-tratamiento del químico en contacto con los sólidos y la válvula de mezcla controlada neumáticamente tendrá que ser ajustada de acuerdo a esa concentración. Un exceso de mezclado en las soluciones de lodos tendrá también efectos negativos, por lo que el operador deberá realizar ajustes a ésta situación particular.



II.2.5.4. Preparación y acondicionamiento del polímero

El adecuado tratamiento del lodo/lodo+polímero para maximizar el rendimiento es tan importante como fijar los parámetros de operación del equipo. Realizar un test estándar de jarra al lodo/lodo+polímero antes del filtrado, dará los parámetros de inicio a utilizar, los cuales pueden luego ser aumentados o disminuidos para optimizar el proceso. Se debe diluir la emulsión pura de polímero de 0,2 a 0,5% para mezclarla con el lodo.

Para realizar la prueba jarra se debe emplear 0,5-1,0 ml de polímero por cada 200 ml de agua. Para alcanzar la misma relación de polímero puro a agua de dilución con el sistema, se debe usar 9,5-19,0 ml de polímero puro por cada galón de agua de dilución usada.

El porcentaje a fijar en la bomba estará dado por la relación de la cantidad de polímero por hora y la cantidad de polímero bombeado en galones por minuto.

II.2.5.5 Sistema de alimentación y mezcla del polímero

El sistema de PrimeBlend, sistema continuo que introduce y activa la emulsión de polímero incorporado en el filtro Prime Rotary Fan Press proporciona un sistema de preparación de polímero de emulsión compacto que minimiza sus requerimientos de polímero. La alta energía de mezcla que es requerido por la activación de polímero de emulsión se logra a través de la cámara de mezclado. En la siguiente figura se muestra el sistema de alimentación y mezcla del polímero PrimeBlend, diseñado por la empresa Prime Solution.

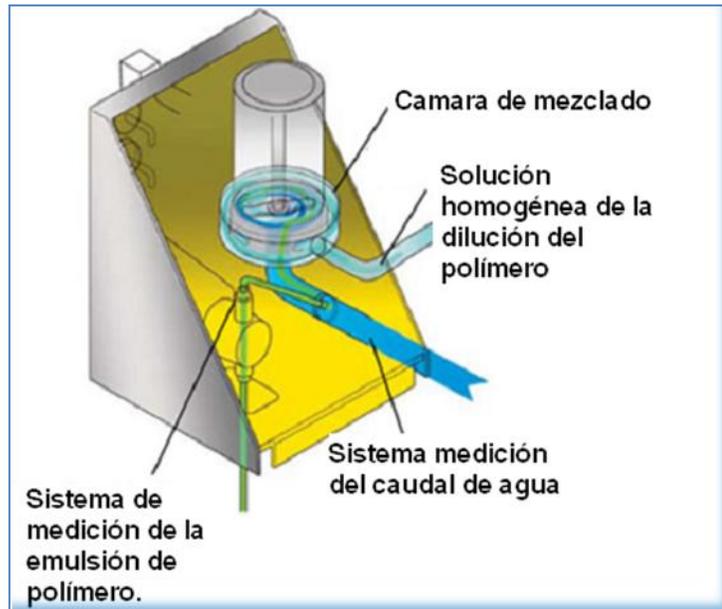


Figura N° 4. Sistema de alimentación de polímero (PrimeBlend).

La Figura N° 5 muestra las dos etapas que deben ocurrir en la preparación de una solución de emulsión de polímero para lograr la máxima activación.

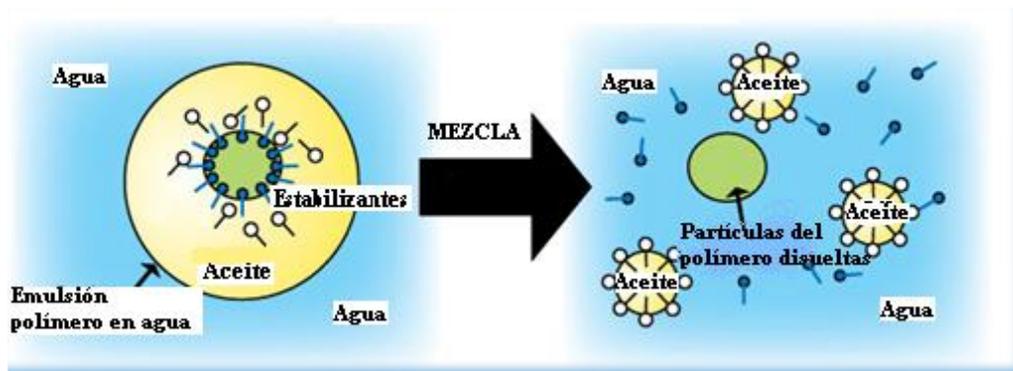


Figura N° 5. Activación del polímero (PrimeBlend)

Una primera etapa donde el polímero se pasa de una fase continua de aceite a una fase continua de agua (rompiendo los solventes de aceites y lavado de los tensoactivos) y una segunda etapa donde se lleva a cabo la disolución donde la reacción es rápida y completa.



Durante el manejo y puesta en marcha del Prime Rotary Fan Press se recomienda el que hacer y el que no hacer.

Que se debe hacer

- Use agua de dilución que esté a temperaturas mayores a 100 °F, más caliente mejor
- Siempre inyecte el polímero al agua, no al contrario
- Mantenga la solución de dilución entre 0,2-0,5%
- Use guantes y lentes de seguridad al trabajar con el equipo
- Mantenga un lodo/lodo+polímero consistente.
- Se debe mantener siempre la velocidad de la bomba más alta que la estimada a través de cálculos, y así permitir mayor consistencia.

Que no se debe hacer

- Usar agua de dilución con valores altos de alcalinidad y dureza, ya que causa pérdidas de carga del polímero.
- Usar agua de dilución que contenga Fe(II) hipoclorito, ya que degrada al polímero.

II.2.5.6. Panel de control

Prime Rotary Fan Press posee una pantalla táctil del panel de operaciones, la cual permite, encender, apagar y/o ajustar las siguientes variables: dosis del polímero, velocidad de rotación de las placas filtrantes de filtro, velocidad de la bomba de alimentación de lodos a la prensa y la de alimentación de polímero, y presión aplicada a las compuertas de salida de la torta. Adicionalmente el panel permite activar y/o desactivar los ciclos de lavado para los canales internos y externos de la prensa. En la Figura N° 6 se muestra el panel de control que posee el Prime Rotary Fan Press:

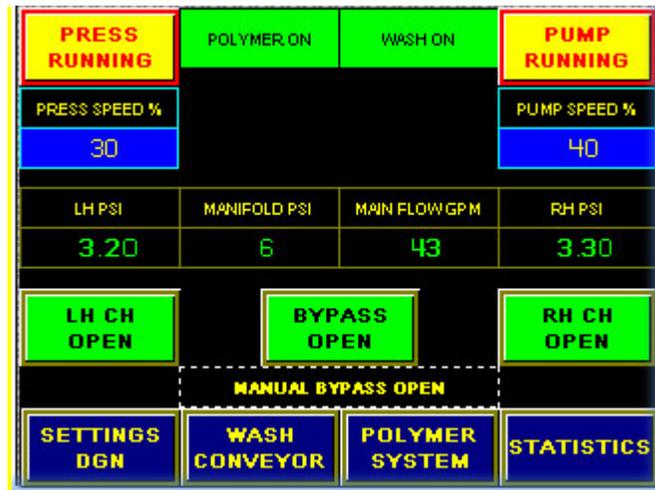


Figura N° 6. Panel de control del filtro prensa rotativo (Prime Solution)

Cada canal es independiente de presión / flujo controlado. La presión de entrada se mide por unos transductores situados en la línea de alimentación principal y la entrada de cada canal de desagüe.

II.3. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS

II.3.1. Descripción del Diagrama de Flujo de Proceso (DFP)

La Figura N° 7 representa el diagrama de flujo de la planta de tratamiento de aguas servidas “El Chorrito”, la cual trata aguas residuales provenientes de los altos mirandinos, estas son enviadas a través de canales que poseen unidades de rejillas (RJ-101) para remover sólidos relativamente grandes; este primer proceso de remoción de sólidos es conocido como desbaste, cribado y/o desbrozo. Separados estos sólidos de las aguas residuales, estas son enviadas por gravedad a un desarenador (DS-101) donde se lleva a cabo el proceso de sedimentación de la arena basado en la diferencia de peso específico entre las partículas sólidas y el líquido donde se encuentran. Luego las aguas a tratar son enviadas a un sistema de bombeo (P-101/A/B/C/D) para ser conducidas a dos reactores biológicos de lodos acivados (RA-101A/B), dos estructuras construidas de concreto armado con una capacidad de 11532 m³, donde se



lleva a cabo la degradación biológica a través de lodos activados. En el sistema de Lodos Activados, se lleva a cabo la biodegradación de la materia carbonada, realizada en el “reactor biológico” (ver Figura N° 23 , Sección Anexos) en el menor tiempo posible y la separación de la masa microbiana del líquido tratado en el sedimentador el cual está constituido por 16 tolvas en serie de 7,5 metros de diámetro, el tiempo de retención en este sistema es de 16 horas, el producto de este sistema biológico es enviado a un sedimentador (S-101/A/B) donde el lodo es extraído desde el fondo a través de una bomba Lift cuyo principio se basa en la ley de los vasos comunicantes y el aire requerido es suministrado por un soplador (ver Figura N° 19, sección de Anexos). El efluente de este proceso es enviado a un proceso de desinfección que se lleva a cabo en un tanque de contacto (T-103) donde interactúa con una solución de cloro por un tiempo de retención de 30 min (actualmente no está operativo).

Una proporción del lodo del proceso biológico es recirculado a los reactores y otra es enviada a unos densificadores de lodos (DL-101A/B), los cuales están constituidos por dos estructuras cilíndricas de 8 metros de diámetro y 12 metros de altura, cuya carga superior $50 \text{ kg/m}^3/\text{día}$, donde se lleva a cabo el espesamiento para su posterior deshidratación. Para el proceso de deshidratado la planta cuenta con 6 unidades de lechos de secado de arena (LS-101/6) cada uno diseñado para una capacidad de 111 m^3 , donde los lodos son parcialmente deshidratados, por los procesos de percolación y evaporación y son removidos a través de una pala mecánica para su disposición final. Adicionalmente al sistema de los lechos de secado, la planta cuenta con un filtro prensa rotativo (F-101A/B) para el proceso de secado, los líquidos provenientes de ambos sistemas de deshidratación son enviados al colector de agua residual T-101. Actualmente, el sistema de secado de lodos solo se lleva a cabo empleando los lechos de arena, esto se debe a que el personal de la planta desconoce el funcionamiento de los filtros prensa (F-101A/B) por lo que la finalidad de este Trabajo Especial de Grado es llevar a cabo el funcionamiento y puesta en marcha de este sistema de filtración de lodos.

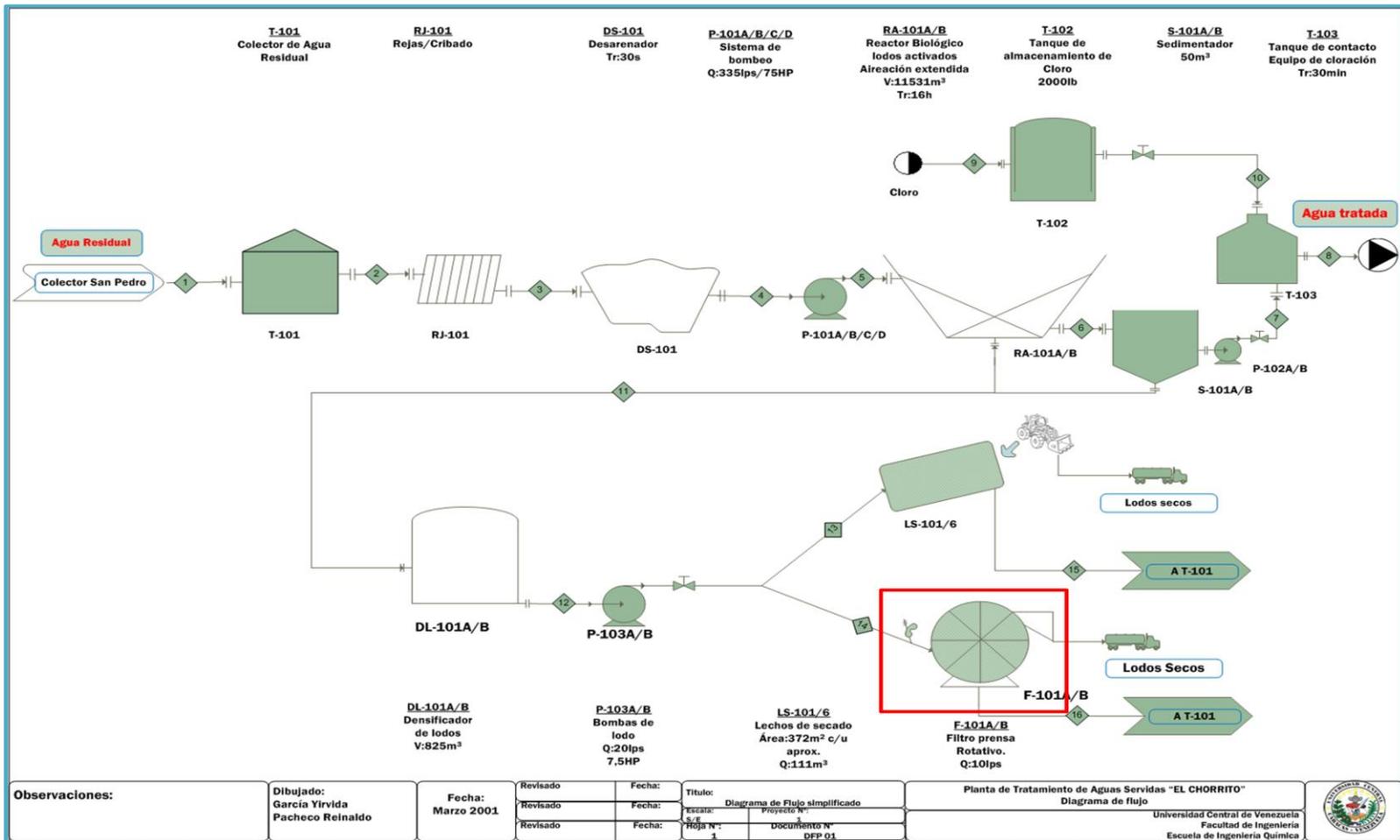


Figura N° 7. Diagrama de Flujo de Proceso



CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

A continuación se presenta la secuencia que se empleó en este Trabajo Especial de Grado para cumplir con los objetivos planteados.

La metodología preliminar para cumplir los objetivos planteados fue la siguiente:

- Se realizó una revisión bibliográfica acerca del tratamiento de aguas residuales y específicamente en el uso de filtros prensas rotativos en procesos de secado de lodos.
- Se definió como materia prima a tratar, el lodo proveniente de los sedimentadores, recolectado en un lapso de 5 días, 7 días y 12 días de espesamiento.

III.1. Caracterizar los lodos generados en el sistema de tratamiento de aguas servidas

La determinación de las características físico-químicas del lodo proveniente del densificador de la Planta de Tratamiento de Aguas Servidas “El Chorrillo” permitió determinar las necesidades de coagulación para producir un lodo que ofrezca una mínima resistencia.

Los análisis realizados para el lodo a lo largo del estudio siguieron las técnicas descritas en los Métodos Estándar (APHA-AWWA-WPCF, 1998)

En la siguiente tabla se presenta los diferentes métodos utilizados para la caracterización del lodo a tratar en la P.T.A.S “El Chorrillo”:



Tabla N° 3. Métodos de análisis para la caracterización de los lodos.

Características Físico-Químicas del lodo	Método Analítico	Equipo Base
Humedad	Standard Methods AWWA 1998 – N° 2540 B	Portamuestra, estufa, balanza analítica
Sólidos Totales	Standard Methods AWWA 1998 – N° 2540 B	Portamuestra, estufa, desecador, balanza analítica
pH	Standard Methods AWWA 1998 – N° 4500-H ⁺ B	Potenciómetro
Alcalinidad	Standard Methods AWWA 1998 – N° 2320 B	Potenciómetro, bureta
Gravedad Específica	Standard Methods AWWA 1998 – N° 2710 F	Recipiente, balanza analítica
Resistencia a la drenabilidad	Standard Methods AWWA 1998 – N° 2710 H	Embudo Buchner, cilindro graduado, bomba de vacío, papel de filtro

Fuente: APHA-AWWA-WPCF, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th Edition, 1998.

III.2. Caracterizar el polímero a ser empleado en la deshidratación de lodos

Debido a la influencia que tiene el polímero agregado a los lodos a secar, ya que acelera la captura de sólidos y aumenta la eficiencia en la deshidratación de lodos, es necesario conocer las siguientes propiedades del mismo: apariencia física, gravedad específica, pH en solución, naturaleza de la carga (polímero catiónico o aniónico), método de adición, toxicidad, densidad y viscosidad.

La densidad del polímero se determinó en el laboratorio, mientras que para la obtención de las otras propiedades se recurrió a la información descrita en la etiqueta del contenedor del polímero, la cual fue suministrada por la empresa proveedora del producto (ver Figura N° 21 , Sección Anexos).



La densidad del polímero se determinó empleando la siguiente metodología:

- Medir la masa inicial del picnómetro (vacío) y el volumen.
- Llenar el picnómetro con el polímero hasta su máxima capacidad.
- Introducir la tapa del picnómetro para botar el exceso de polímero y secarlo bien.
- Medir la masa del picnómetro lleno.

III.3. Establecer la relación óptima entre la dosificación del polímero y la cantidad de lodos

En el laboratorio se realizaron pruebas de filtrado con el polímero a concentraciones diferentes para obtener la dosis más adecuada en la remoción de humedad. La dosis óptima corresponde a aquella que permite un mayor volumen de líquido filtrado en menor tiempo y para ello se midió el volumen de agua eliminada por filtración controlada, a una cierta cantidad de lodo que contiene una dosis de polímero, en un rango de tiempo establecido. Para cada dosis de polímero aplicada se realizaron tres ensayos.

La experiencia realizada requirió un embudo Büchner, papel de filtro, una bomba para generar vacío con un respectivo lector de presión y un cilindro graduado que permite la lectura del volumen de líquido filtrado.

Para el montaje de este equipo fue necesario que antes de conectar el vacío, todo se encontrara hermético, para ello se empleó un tapón en la conexión del embudo con la probeta. Antes de filtrar fue conveniente humedecer el papel filtro una vez colocado en el embudo, se debió tener consideración con el líquido filtrado ya que éste no debe excederse al nivel de la salida de vacío de la probeta, debido a que esto permitiría la entrada de líquido en la bomba y podría dañar la misma.

A continuación se muestran los pasos empleados en las pruebas de filtrado:

- Una vez conocida la densidad del polímero se preparó una solución madre del mismo a una concentración del 1% en volumen, para ello se tomaron 10 mL de



polímero y se agregaron en un balón aforado de 1000 mL. Posteriormente se agregó agua hasta llegar al aforo. Es importante señalar que el agua usada es la misma que emplea el filtro prensa rotativo en la P.T.A.S “El Chorrito” y la cual se obtiene de un pozo. Se agitó vigorosamente la mezcla. Debido a la viscosidad del polímero se realizó la conversión de volumen a masa empleando la densidad del polímero; se estimó la masa requerida del mismo y se procedió a pesar.

- Se tomaron 100 mL de lodo y se le añadió la dosis apropiada de polímero, con la cual se realizaron las pruebas.
- Se agitó vigorosamente por un tiempo de 40 segundos la mezcla de lodo-polímero, para flocular controladamente las partículas de lodo.
- Se colocó un papel de filtro en un embudo de Büchner, con la ayuda de una piseta se humedeció el papel de filtro con agua destilada permitiendo adherencia entre el medio filtrante y el embudo.
- Se ajustó con la ayuda de un tapón o corcho el embudo sobre el kitasato, verificando que quedó totalmente hermético.
- Se conectó la probeta, empleando una manguera, con la bomba de succión al vacío (Figura N° 8).

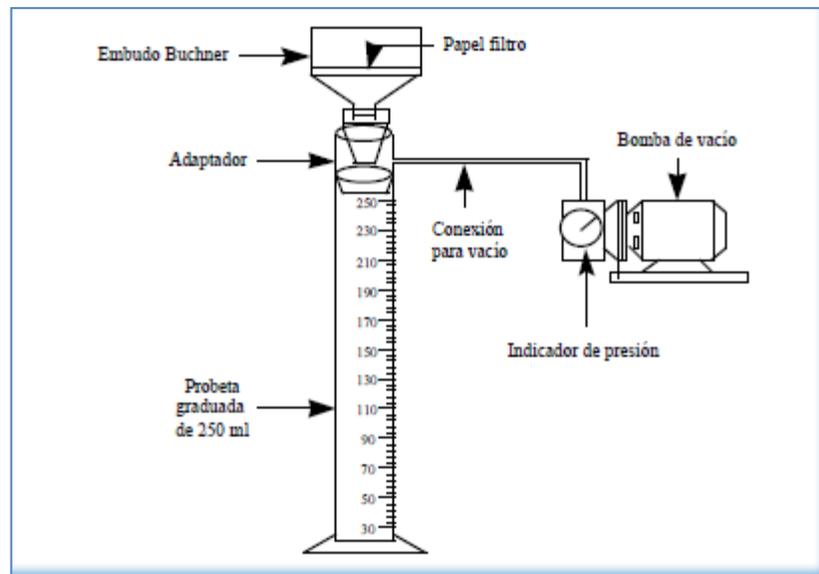
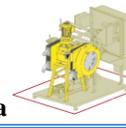


Figura N° 8. Equipo para determinar la resistencia específica de la torta



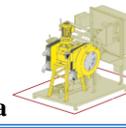
- Se agregó la mezcla lodo-polímero sobre el papel de filtro.
- Se encendió la bomba y se ajustó el vacío a 374-500 mmHg, para quitarle el agua a la suspensión.
- Se encendió el cronómetro, se listaron los volúmenes de filtrado en un cilindro de 100 mL a intervalos de tiempo de 10 segundos hasta la ruptura del vacío. El vacío existirá mientras haya líquido sobre la torta.
- Se apagó la bomba de vacío.
- Se calculó la resistencia específica r a partir de la Ecuación 3 del Capítulo II.
- Se repitió el procedimiento para cada dosis de polímero aplicada.

Una vez realizada las diferentes pruebas para cada dosis se determinó la dosificación óptima de polímero a partir del gráfico resistencia específica en función de la dosis de polímero. La dosificación óptima corresponde al mínimo de la curva de resistencia específica.

III.4. Operar el filtro prensa rotativo y establecer las variables de operación

Para cumplir con este objetivo se procedió a revisar el filtro prensa rotativo y así familiarizarse con el funcionamiento del mismo, el cual es la pieza principal del sistema de secado y los distintos componentes que lo acompañan como panel de control, bomba de lodos, válvula de desvío (by-pass) del lodo, compresor de aire, sistema dosificador de polímero; todos estos componentes son importantes en el desempeño del filtro y permitieron la manipulación de las principales variables de operación del mismo.

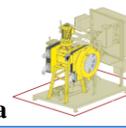
Debido a la importancia de definir las condiciones de operación del filtro prensa rotativo que permita un mejor rendimiento, se establecieron como variables de operación: el caudal de alimentación de lodo, la dosificación del polímero, la velocidad de rotación de la prensa y la presión en la compuerta de restricción en la descarga de la prensa. Para la evaluación del filtro prensa rotativo se procedió de la siguiente forma:



- 4.1. Se fijó la velocidad de rotación de la prensa en 30% de la velocidad máxima y la presión de la compuerta de restricción neumática en 0 psi.
- 4.2. Mediante la bomba de desplazamiento positivo, se fijó el caudal de lodo en 5 GPM. Se escogió como dosificación de polímero la determinada en el laboratorio.
- 4.3. Se recogió una muestra de lodo, líquido filtrado y torta.
- 4.4. Se determinó la eficiencia del filtro prensa rotativo (porcentaje de sólidos en el lodo de alimentación que queda en la torta de lodo que se descarga) a partir de la Ecuación 5 del Capítulo II y la cantidad de sólidos suspendidos en el filtrado con la Ecuación 15 (Ver Apéndice G).
- 4.5. Se repitieron los pasos 4.2, 4.3 y 4.4 para caudales de lodo de 10, 15, 20, 25, 30 y 35 GPM con el fin de obtener el caudal óptimo de lodos.
- 4.6. Se incrementó la presión de la compuerta de restricción neumática hasta 5 psi.
- 4.7. Se repitieron los pasos 4.2 hasta 4.5 con el fin de obtener la presión de la compuerta de restricción neumática de mayor eficiencia.
- 4.8. Se incrementó la velocidad de rotación a 40% de la velocidad máxima.
- 4.9. Se repitieron los pasos 4.2 hasta 4.5 con el fin de obtener la velocidad de rotación de mayor eficiencia.
- 4.10. Se fijó el caudal óptimo de alimentación de lodos, la presión de la compuerta más eficiente y la velocidad de rotación de mayor eficiencia. Posteriormente se varió la dosis de polímero a 0,1; 0,2; 0,3; 0,4% v/v, para verificar la dosificación de polímero que permite la mayor eficiencia para el uso del filtro prensa rotativo.

III.6. Caracterizar los productos obtenidos en el proceso de filtración (filtrado y torta)

El líquido filtrado obtenido en el proceso de filtración se caracterizó midiendo en laboratorio propiedades como turbiedad, pH y conductividad específica. Estos son parámetros que definen la calidad del líquido filtrado y con ellos se controla la cantidad de sólidos en suspensión (calidad del proceso de filtrado), acidez y



alcalinidad (un elevado pH inactiva las bacterias patógenas y virus) y la presencia de sales minerales en el mismo. En la siguiente tabla se presentan los diferentes métodos a utilizar para la caracterización del filtrado en la P.T.A.S “El Chorrito”:

Tabla N° 4. Métodos de análisis para la caracterización del filtrado.

Características Físico-Químicas del filtrado	Método de Análisis	Equipo Base
Sólidos Suspendidos Totales	Standard Methods AWWA 1998 – N° 2540 D	Portamuestra, estufa, balanza analítica
Turbiedad	Standard Methods AWWA 1998 – N° 2130 B	Turbidímetro, celdas
pH	Standard Methods AWWA 1998 – N° 4500-H ⁺ B	Potenciómetro
Conductividad Específica	Standard Methods AWWA 1998 – N° 2510 B	Conductímetro

Fuente: APHA-AWWA-WPCF, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th Edition, 1998.

Para la torta de lodos se determinaron: porcentaje de humedad y sólidos totales, de manera que cumpla con el intervalo de porcentajes de humedad en el lodo para ser dispuesto en un relleno sanitario (60% - 80%).

En la siguiente tabla se presentan los diferentes métodos utilizados para la caracterización de la torta en la P.T.A.S “El Chorrito”:

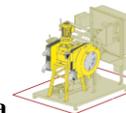


Tabla N° 5. Métodos de análisis para la caracterización de la torta.

Características Físico-Químicas de la torta	Método Analítico	Equipo Base
Humedad	Standard Methods AWWA 1998 – N° 2540 B	Portamuestra, estufa, balanza analítica
Sólidos Totales	Standard Methods AWWA 1998 – N° 2540 B	Portamuestra, estufa, balanza analítica

Fuente: APHA-AWWA-WPCF, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th Edition, 1998.

III.7. Definir las condiciones de rendimiento y eficiencia del proceso de filtración

Para el cumplimiento de este objetivo se procedió al análisis de los comportamientos (gráficos y tablas) de cada una de las variables involucradas en el proceso de filtración con la finalidad de definir el rango en el cual cada variable permite que el filtro prensa rotativo opere con el mayor rendimiento y eficiencia en la recuperación de sólidos.



CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados y las características más relevantes de la investigación durante la ejecución de las experiencias, así como también sus respectivas interpretaciones y análisis:

IV.1. Lodos generados en el sistema de tratamiento de aguas servidas

En la siguiente tabla se muestran los valores de las características físico-químicas de los tres lodos estudiados:

Tabla N° 6. Características Físico-Químicas del lodo

Características Físico-Químicas	Período de espesamiento					
	5 días		7 días		12 días	
	Valor Promedio	Desviación Estándar	Valor Promedio	Desviación Estándar	Valor Promedio	Desviación Estándar
Humedad (%)	93,8	0,06	93,0	0,02	91,8	0,03
Sólidos Totales (%)	6,2	0,06	7,0	0,02	8,2	0,03
pH	7,0	0,1	6,8	0,1	6,7	0,1
Alcalinidad a pH 4,5 mg/L CaCO ₃	2627	83	2653	61	3280	69
Gravedad Específica	1,02	0,01	1,026	0,004	1,047	0,003
Resistencia a la drenabilidad (cm/g)	3,85x10 ¹¹	6,45x10 ¹⁰	5,62x10 ¹¹	2,38x10 ¹⁰	7,62x10 ¹¹	5,68x10 ¹⁰

Se aprecia en la Tabla N° 6 como la composición promedio de los tres lodos estudiados presenta una diferencia en sus características, el grado de concentración del lodo se evidencia a través de los valores de humedad (%), sólidos totales (%) y gravedad específica (adim), aumentando el porcentaje de sólidos totales en el lodo a medida que aumenta el tiempo de espesamiento. Esto concuerda con la bibliografía



consultada en donde se establece que el densificador tiene como función asentar y compactar el lodo removiendo parte de la fracción líquida y de esta manera se reduce el volumen. El lodo que se extrae por el fondo de esta estructura se concentra más a medida que permanece más tiempo en la misma (Ramalho, 1983).

En la misma tabla se aprecia que a mayor tiempo de espesamiento, la alcalinidad del lodo aumenta, esto debido a la mayor concentración de iones carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos. La alcalinidad presente es representativa de la drenabilidad de cada lodo estudiado por lo que un incremento de la misma ocasiona un aumento en la resistencia específica de la torta y con ello una disminución en la velocidad de remoción de agua por filtración (Maskew, 1971). La alta alcalinidad en los lodos implica una mayor dosis de coagulante requerida, esto se debe a que una alta concentración de iones como bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos presentes, influye en el proceso de neutralización de las cargas eléctricas de los coloides en suspensión del lodo quedando en exceso las cargas negativas en la disolución, aumentando las fuerzas de repulsión y por lo tanto el potencial Z de los coloides; por lo que se necesita una mayor dosis de polímero catiónico como lo es la poliácridamida empleada, para neutralizar las cargas y así llevar a cabo una buena separación por coagulación y floculación.

La resistencia específica de los tres tipos de lodos estudiados mostró valores en el rango normal de lodos sin acondicionamiento químico, variando entre $3,85 \times 10^{11}$ y $7,62 \times 10^{11}$ cm/g como se observa en la Tabla N° 6. Lodos con resistencia específica menor a 1×10^{11} cm/g, son considerados de fácil deshidratación, mientras que lodos con resistencia mayor que 10×10^{11} cm/g presentan pobres características de deshidratación (A.W.W.A, 1998).

Con base en esto y en los resultados obtenidos con los lodos de 5, 7 y 12 días de espesamiento se presentan los resultados para los 5 días, dejando los de 7 y 12 días en la sección de apéndices ya que para estos tiempos la tendencia del comportamiento se mantuvo.



La caracterización del lodo permite determinar el polímero requerido para el proceso de deshidratación. En la siguiente tabla se presentan los resultados de las características físico-químicas del polímero empleado:

Tabla N° 7. Características físico-químicas del polímero

Características Generales		Emulsión Poliacrilamida
Apariencia física		Gel/ambar
Densidad (g/cm ³)		1,00-1,05
Peso Molecular		Alto
pH en solución		6,6
Naturaleza de la carga		Catiónica
Toxicidad		Baja
Viscosidad (cps)	0,50%	120
	1,00%	310
	2,00%	820
Viscosidad Aparente (cps)		>2000
Contenido sólido (%)		>40

Fuente: <http://www.waterabsorbingpolymers.com>. All Rights Reserved. 2010

En la Tabla N° 7 se observa algunas de las características físico-químicas del polímero, una de ellas como la naturaleza de la carga, resulta de gran importancia. Debido a que desde el punto de vista de las cargas eléctricas los coloides predominantes en las aguas residuales incluyen proteínas, almidones, semicelulosas, polipéptidos que poseen todas cargas negativas por lo que la adición de un polímero catiónico como la emulsión de poliacrilamida será ventajoso (alta densidad de carga y alto peso molecular) para neutralizar la carga y así obtener partículas más voluminosas y pesadas que puedan ser separadas más fácilmente del agua (Sasia, 1996), esto permite extraer aun más, parte del agua ligada y transformarla en agua libre.

Las emulsiones están en una forma líquida fáciles de manejar y pueden aumentar la eficiencia en el proceso (Prime Solution, 2010), ya que se obtiene una aplicación final sobre el lodo más uniforme y las mismas no se degradan con el tiempo (Sasia, 1996).



En la misma tabla se observa que posee una baja toxicidad por lo que el operador del equipo no corre riesgo al entrar en contacto con el polímero. La alta viscosidad de la emulsión (>2000 cps) hace necesario el empleo de una bomba dosificadora que alimente polímero al sistema. También se puede apreciar que la cantidad de materia activa (>40 %) es alta, de manera que los requerimientos de dosificación del polímero serán bajos, causando en el lodo una rápida precipitación y baja turbidez.

IV.2. Relación óptima entre la dosificación del polímero y la cantidad de lodos

A continuación se muestra la dosis más adecuada en la remoción de humedad para cada lodo estudiado:

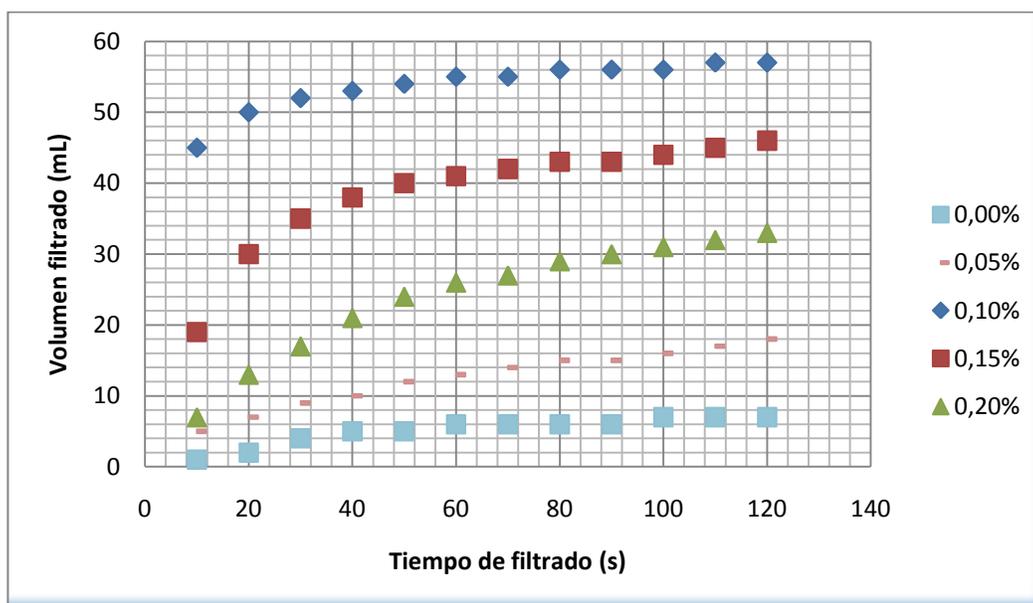


Figura N° 9. Pruebas de filtrabilidad. Lodo de 5 días

En la Figura N° 9 se observa que la mejor dosis de polímero para un lodo de 5 días de espesamiento es de 0,10% v/v, ya que se obtiene un mayor volumen de filtrado en menor tiempo respecto a las otras dosis. Adicionalmente, para esta dosis de polímero se obtiene un mínimo en la curva de resistencia específica como puede apreciarse en la siguiente figura:

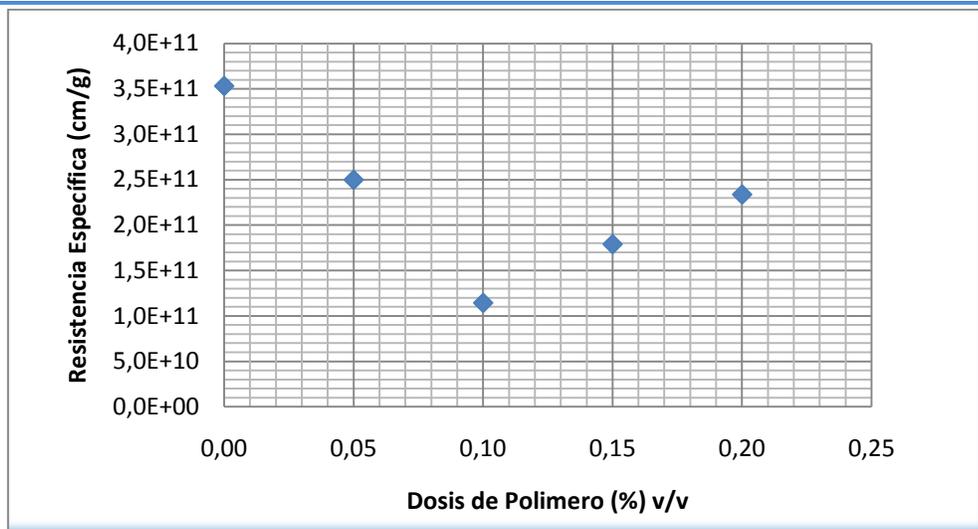


Figura N° 10. Gráfico de resistencia específica en función de la dosis de polímero. Lodo de 5 días

Se observa en la Figura N° 10 que al agregar polímero al lodo, la resistencia específica de la torta disminuye, favoreciendo de esta manera la deshidratación del lodo, ya que al disminuir la resistencia específica el paso del filtrado se hace con más facilidad, aumentando así la velocidad de filtrado. Esto coincide con la bibliografía consultada donde se establece que el uso del polímero disminuye la resistencia (Méndez, 1994).

En la misma figura, se observa que el uso de grandes dosis de polímero no permite lo expresado con anterioridad, ya que agregar concentraciones del mismo por encima de un valor que sugiere ser apropiado, la resistencia específica de la torta tiende a aumentar, como lo expresa en su investigación (Escobar, 2002) quien además sugiere que se podría llegar a aumentar la resistencia a valores mayores a cuando no se agrega polímero. Esto se explica por la posible reestabilización de las partículas sólidas.

Esta tendencia se debe a que el aumento en la alcalinidad del lodo trae como consecuencia un incremento en la cantidad de polímero requerido (Ramalho, 1983).



IV.3. Variables de operación del filtro prensa rotativo

El primer parámetro de operación estudiado fue el caudal de lodo. Las corridas hechas variando este parámetro entre 20-35 GPM a intervalos de 5 GPM, se efectuaron tomando en cuenta: la dosis de polímero en 0,10% v/v (obtenida mediante pruebas de filtrabilidad en el laboratorio) para lodos de 5 días de espesamiento. La velocidad de rotación en 30% y la presión de la compuerta en 0 psi. Para diferentes caudales se evidencia que este parámetro influye significativamente en la eficiencia del equipo, tal como se observa en las Figura N° 11 y Figura N° 12. Es importante señalar que debido al inestable comportamiento que presenta el flujo de lodo en las tuberías que lo alimentan al sistema de filtrado, se generó como consecuencia dificultad en el control del caudal de entrada al filtro. Para contrarrestar este efecto se sugiere el uso de un tanque que permita garantizar la continuidad en la alimentación.

A continuación se muestra el comportamiento de la eficiencia en función del caudal de lodo:

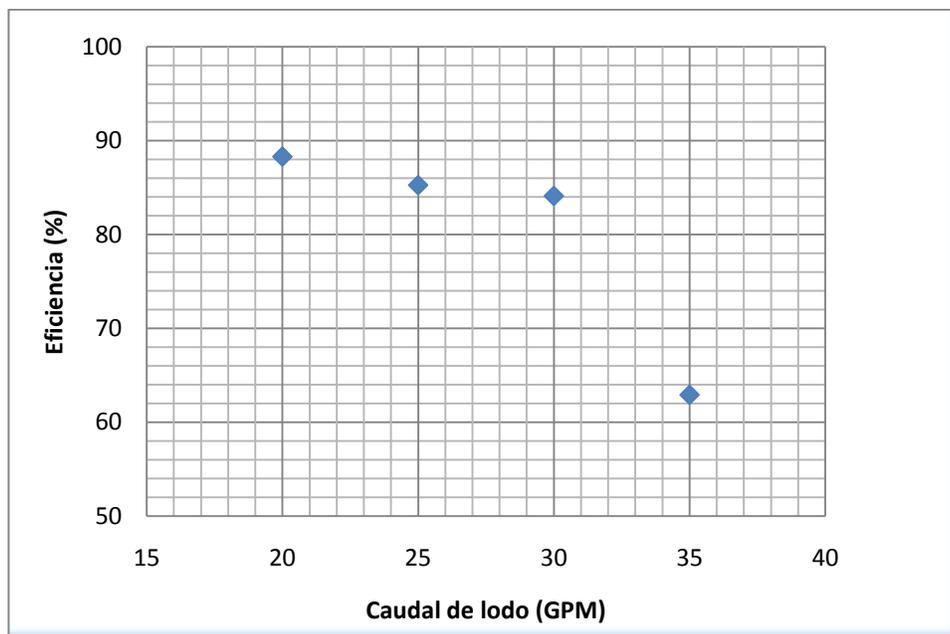
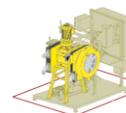


Figura N° 11. Eficiencia del filtro prensa en función del caudal de lodo



En la Figura N° 11 se observa que la eficiencia del filtro prensa rotativo disminuye en función del rango de caudales estudiados, se seleccionó este rango debido a que cuando se trabajo para caudales inferiores a 20 GPM se obtuvo tortas secas con bajo porcentaje de humedad, pero el rendimiento del filtro respecto al tiempo es bajo; mientras que cuando se operó el filtro para caudales superiores a 35 GPM se obtuvo la ruptura del tapón formado por los sólidos en la compuerta de descarga de torta, permitiendo la salida de la mezcla lodo/polímero, por lo tanto se considera un caudal de 35GPM como límite para evitar que el filtro se inunde. Una vez definido el rango de operatividad del filtro para lodos con 5 días de espesamiento, en la figura se puede observar que la eficiencia no varía significativamente para caudales de 20 a 30 GPM, mientras que para el caudal de 35 GPM, la eficiencia decrece de forma brusca, por lo que se define el rango de operatividad de 20-35 GPM con un valor óptimo de 30 GPM donde se alcanza la mejor relación eficiencia/rendimiento.

De igual forma el caudal de lodo tiene un efecto significativo en la cantidad de sólidos suspendidos en el filtrado como se muestra en la siguiente figura:

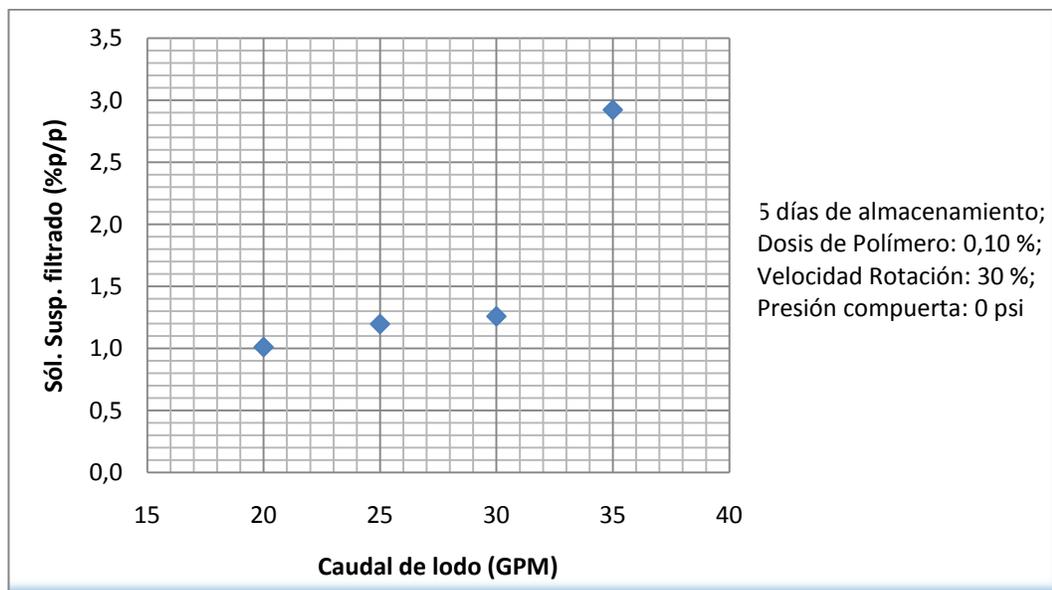


Figura N° 12. Sólidos suspendidos en el filtrado en función del caudal de lodo.

En la Figura N° 12 se puede visualizar como la calidad del filtrado disminuye a medida que aumenta el caudal de lodo debido a que aumenta el contenido de sólidos



en el mismo, esto coincide con los resultados de (Méndez, 1994) que afirman que cuando el lodo se bombea con un caudal por encima del caudal óptimo provoca el paso de sólidos al filtrado, desmejorando la calidad del mismo y desfavoreciendo el proceso de filtración. Se debe tener en cuenta que en la práctica lo que se desea es obtener un buen rendimiento del equipo en cuanto a la producción de torta de lodo, con una concentración de sólidos dentro de lo esperado y con una calidad satisfactoria del licor obtenido por ser estos parámetros los que definen un buen filtrado, sin embargo para fines de la PTAS “El Chorrillo” el mayor interés se encuentra en la producción de torta ya que este líquido filtrado es enviado al tanque receptor de aguas crudas del proceso sin tener efecto adverso al ambiente. Por lo que se concluye que el caudal óptimo a procesar para lodos almacenados 5 días es de 30 GPM donde ocurre la mejor relación entre el rendimiento y el porcentaje de sólidos suspendidos en el filtrado.

Por otro lado, el cambio en la presión de la compuerta de descarga influyó en la eficiencia del filtro, para el estudio de este parámetro se tomó en cuenta: la dosis de polímero en 0,10% v/v (obtenida mediante pruebas de filtrabilidad en el laboratorio), la velocidad de rotación en 30%, las corridas de caudales (20 a 35 GPM) fueron hechas para valores en la presión de la compuerta de 0 psi y 5psi como se muestra en la siguiente figura:

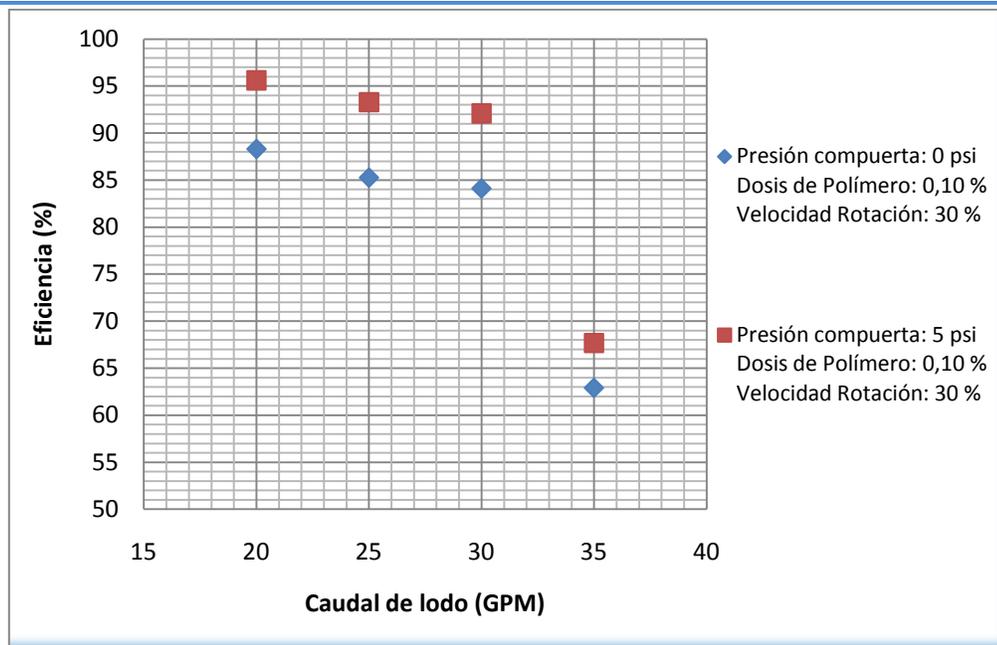
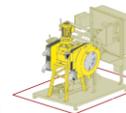


Figura N° 13. Eficiencia del filtro prensa. Presión en la compuerta. Lodo de 5 días

Se puede apreciar en la Figura N° 13 como la presión en la compuerta de restricción de 5 psi tiene una mayor eficiencia que la de 0 psi ya que produce tortas con menor contenido de humedad, esto se debe a que al aumentar la presión, aumenta la restricción en la salida provocando una gran extrusión de la torta que sale de la prensa dando como resultado que la misma tenga un bajo contenido de agua. Sin embargo, para valores de presión por encima de 5 psi se obstruye la salida de la torta, disminuyendo la velocidad de salida de la misma de forma significativa y aumenta el porcentaje de sólidos suspendidos en el filtrado, por lo que un aumento en la presión de la compuerta por encima de 5 psi desmejora el proceso.

La velocidad de rotación del filtro prensa es otro de los factores que influyen en el desempeño del equipo, el estudio de este parámetro se consideró: la dosis de polímero en 0,10% v/v, la presión de la compuerta en 5 psi, las corridas de caudales (20 a 35 GPM) fueron hechas para valores de la velocidad de rotación de 30% y 40% como se muestra a continuación:

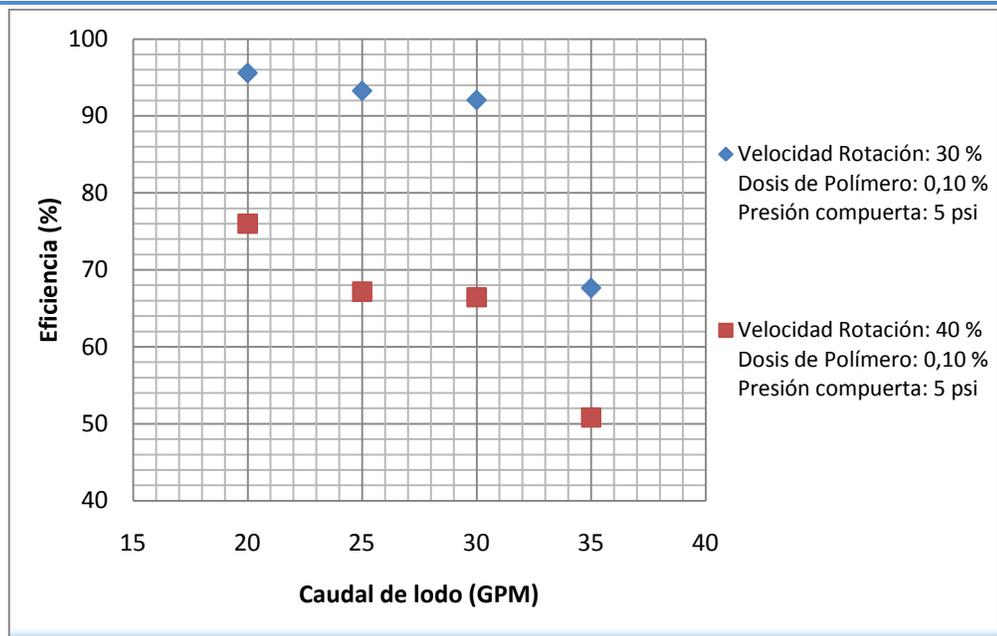


Figura N° 14. Eficiencia del filtro prensa. Velocidad de rotación. Lodo de 5 días

En la Figura N° 14 se puede observar como la velocidad de rotación de 30% tiene una mayor eficiencia que la de 40% ya que produce tortas con mayor contenido de sólidos, esto se debe a que con una velocidad de rotación de 30% (velocidad con la que giran los platos filtrantes) los sólidos permanecen más tiempo en la zona de secado obteniéndose una torta más seca, si bien es cierto que con una velocidad de rotación de 40% la producción de torta es un poco mayor que la obtenida con una de 30%, este hecho no compensa la menor recuperación de sólidos (Méndez, 1994).

La última variable estudiada, comprobando que las pruebas de filtrabilidad en el laboratorio son fiables, fue la dosificación óptima de polímero, dicho parámetro se estudió incorporando las siguientes variables: la dosis de polímero (0 a 0,30% v/v), el caudal de lodo en 30 GPM, la presión de la compuerta en 5 psi y la velocidad de rotación en 30%, como se muestra a continuación:

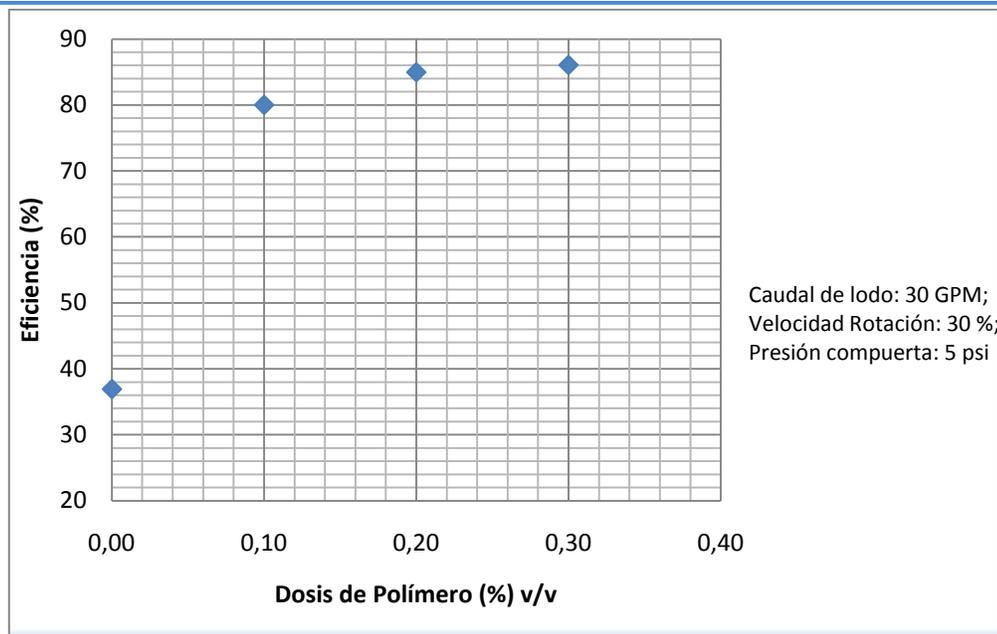


Figura N° 15. Eficiencia del filtro prensa. Dosis de polímero. Lodo de 5 días

Para este lodo, la dosis más adecuada de polímero es de 0,10%; esta selección se realiza tanto en el laboratorio (Figura N° 10) como por medio de una prueba con el filtro prensa rotativo (Figura N° 15). Si bien es cierto y como se observa en la Figura N° 15 una dosis de 0,30% permite obtener una eficiencia un poco mayor que con la dosis de 0,10%; esto no compensa el hecho de que se necesite triplicar la cantidad de polímero para lograr obtener una pequeña ganancia en la eficiencia. La eficiencia de recuperación de sólidos aumenta a medida que se incrementa la dosis de polímero, de igual forma aumenta la calidad del filtrado. A dosis alta se obtiene menor humedad en la torta de lodo y un líquido clarificado más cristalino ya que estimula la captura de partículas formando flóculos.

Tabla N° 8. Comparación dosis óptima obtenida en el laboratorio y en el filtro prensa

Tiempo de espesamiento de lodo (días)	Dosis optima (% v/v)	
	Laboratorio	Filtro prensa rotativo
5	0,10	0,10
7	0,15	0,15
12	0,20	0,20



De acuerdo con la Tabla N° 8, los valores de dosis óptima obtenidos, tanto en el laboratorio como en el filtro prensa rotativo coinciden. Esto es de vital importancia para el funcionamiento adecuado del equipo, mientras una selección a escala de laboratorio y ensayos de desempeño no se realicen, el tipo y dosis de polímero para acondicionar un lodo particular no pueden ser determinados con seguridad (Escobar, 2002).

IV.4. Productos obtenidos en el proceso de filtración (líquido filtrado y torta)

A continuación se muestran los resultados obtenidos en el estudio del proceso de filtración:

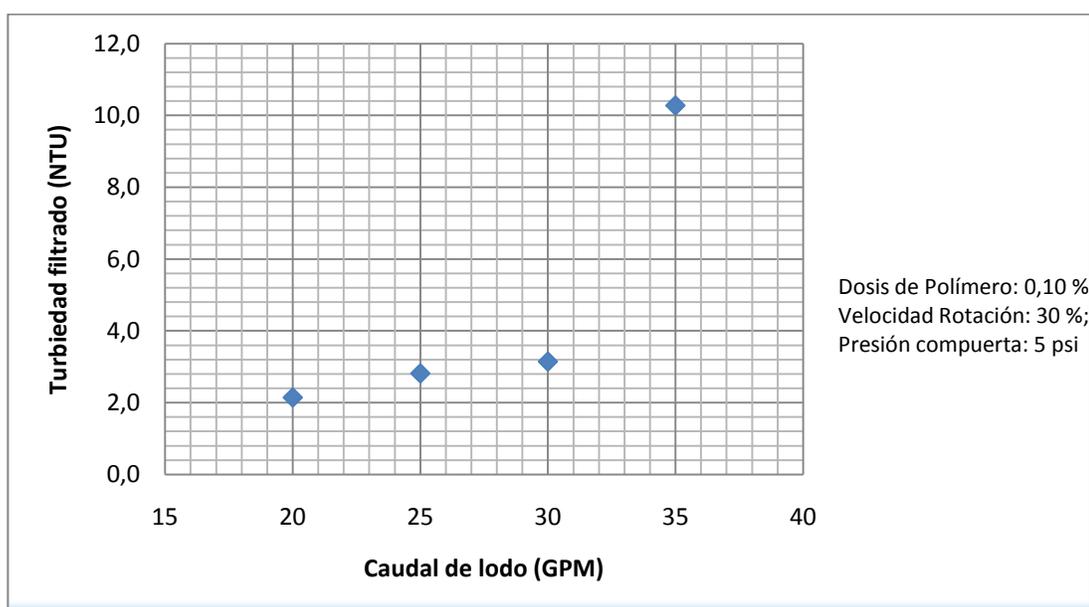


Figura N° 16. Turbiedad del filtrado. Lodo de 5 días

En la Figura N° 16 se puede visualizar como la turbiedad del filtrado aumenta a medida que se incrementa el caudal de lodo alimentado al filtro prensa, esto se debe a que cuando el lodo se bombea con un caudal por encima del óptimo se provoca el paso de un número excesivo de partículas finas al filtrado, pues bien la turbiedad del filtrado se debe a estos sólidos en suspensión como sedimentos, materia orgánica finamente dividida, organismos microscópicos y materiales similares. La presencia de estos sólidos desvían (o dispersan) la luz cuando pasa a través de la muestra de



filtrado (A.W.W.A, 1998). Cuantos más sólidos en suspensión hay en el filtrado, más luz se desvía y por ende mayor es la turbiedad.

Otra de los parámetros estudiados que definen la calidad del líquido filtrado es la conductividad eléctrica, para la cual se obtuvo la siguiente información:

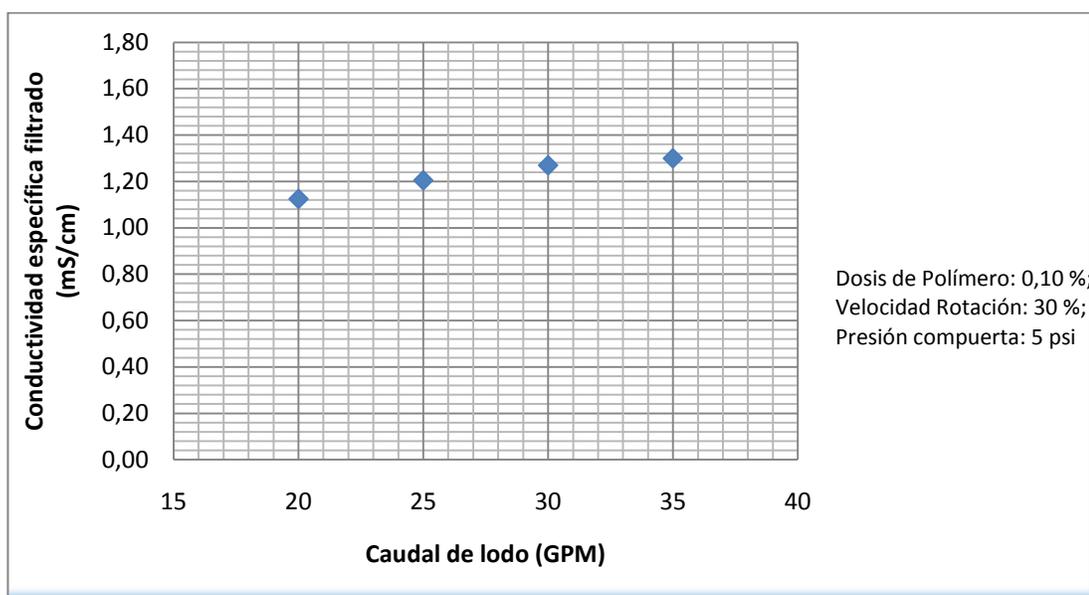


Figura N° 17. Conductividad específica del filtrado. Lodo de 5 días

En la Figura N° 17 se observa como la conductividad del filtrado aumenta muy poco a medida que se incrementa el caudal de lodo. En el filtrado la conductividad es directamente proporcional a la concentración de sólidos disueltos, por lo tanto cuanto mayor sea dicha concentración, mayor será la conductividad. Sin embargo, en este caso el resultado esperado es que la conductividad se mantenga constante ya que la relacion polimero-lodo se mantiene constante, la cual es una medida de la captura de sólidos presentes en el lodo, por lo tanto la cantidad de sólidos disueltos debe mantenerse constante y por ende la conductividad.

En el caso de la torta de lodo se generó la siguiente información:

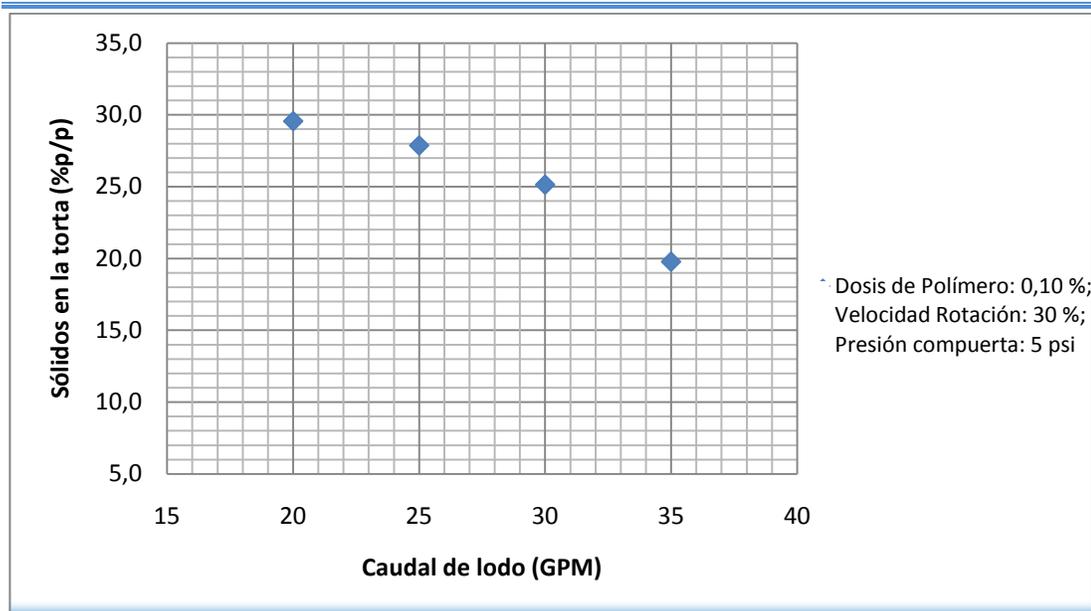


Figura N° 18. Sólidos en la torta. Caudal de lodo. Lodo de 5 días

Se visualiza en la Figura N° 18 como el contenido de sólidos en la torta disminuye a medida que aumenta el caudal de alimentación de lodos, un exceso en el caudal de lodos sobrecarga la prensa por lo que no se logra una buena separación, el porcentaje de humedad se logra mantener por debajo del 80%, que es el límite permisible para la disposición de lodos en rellenos sanitarios. Sin embargo, un caudal de lodo por encima de 30 GPM produce tortas con un contenido de humedad por encima del 80%, por lo que emplear caudales superiores a este último desfavorece el proceso de filtración.

IV.5. Condiciones de rendimiento y eficiencia del proceso de filtración

De acuerdo con los resultados obtenidos de las principales variables de operación del filtro prensa rotativo y el posterior análisis de las mismas se observa que la mayor eficiencia y rendimiento para el filtro prensa rotativo corresponde a los siguientes valores:



Tabla N° 9. Condiciones de rendimiento y eficiencia del filtro

Tiempo de espesamiento (días)	Variables de Operación			
	Caudal de lodo (GPM)	Dosis de polímero (% v/v)	Velocidad de rotación (%)	Presión en la compuerta (psi)
5	30	0,10	30	5
7	25	0,15	30	5
12	20	0,20	30	5

Se observa en la Tabla N° 9 que variables como la velocidad de rotación y la presión en la compuerta de descarga en 30% y 5 psi respectivamente, representan los valores óptimos del equipo para cada lodo estudiado, en cambio para las otras dos variables como caudal de lodo y dosis de polímero se obtuvieron valores diferentes, disminuyendo el caudal de lodo óptimo y aumentando la dosis de polímero óptima al aumentar el tiempo de espesamiento del mismo. Este comportamiento responde principalmente a las características de cada lodo. La cantidad de sólidos totales en el lodo aumenta al incrementarse el tiempo de espesamiento. Tomando en cuenta que el filtro prensa rotativo, como todo equipo de separación mecánica, tiene un límite en cuanto a su capacidad de procesamiento y para no sobrecargar el equipo, se requerirá un mayor caudal de lodo con menor tiempo de espesamiento en comparación a uno con mayor tiempo de espesamiento (Geankoplis, 1998). Este hecho garantizaría que se esté alimentando al filtro una cantidad equitativa de sólidos.

IV.6. Operar el filtro prensa rotativo

Las variables anteriormente analizadas permiten generar un procedimiento para operar el filtro prensa rotativo; el mismo representa los pasos que debe seguir el operador para el correcto funcionamiento del filtro prensa instalado en la PTAS “El Chorrito”.

- Encender el panel de control colocando la perilla ubicada en la puerta del panel en posición “ON”. Tirar de los botones de emergencia (rojos) hacia afuera y presionar los pulsadores de encendido (verdes).
- Verificar el funcionamiento del compresor y esperar unos minutos para que cargue el tanque a presión.



- Antes de enviar el lodo hacia la prensa operar el sistema a través del by-pass. Para ello abrir la válvula de compuerta de 4" ubicada en la parte posterior del equipo
- Abrir las válvulas de alimentación de lodo al sistema y la línea de agua de lavado. Fijar el caudal de agua por medio del rotámetro a los siguientes valores:
 - Lodo con 5 días de espesamiento: 3,0 GPM
 - Lodo con 7 días de espesamiento: 3,8 GPM
 - Lodo con 12 días de espesamiento: 4,0 GPM
- Encender la bomba de alimentación de lodos ajustando su velocidad de acuerdo al número de días que tenga el lodo almacenado, como sigue:
 - Lodo con 5 días de espesamiento: 25% de la velocidad máxima
 - Lodo con 7 días de espesamiento: 20% de la velocidad máxima
 - Lodo con 12 días de espesamiento: 15% de la velocidad máxima
- Encender la bomba dosificadora de polímero ajustando la frecuencia del impulso a (en el panel de control) y la longitud del impulso (stroke) (mediante la perilla ubicada en la parte frontal de la bomba dosificadora) de la siguiente forma:
 - Lodo con 5 días de espesamiento: frecuencia: 23% de la frecuencia máxima, longitud de impulso: 10% de la máxima.
 - Lodo con 7 días de espesamiento: frecuencia: 28% de la frecuencia máxima, longitud de impulso: 10% de la máxima.
 - Lodo con 12 días de espesamiento: frecuencia: 30% de la frecuencia máxima, longitud de impulso: 10% de la máxima.

Nota: la longitud del impulso siempre debe ser menor que la frecuencia.
- Tomar muestras de lodo y observar la formación de flóculos consistentes que se pueden separar del agua al exprimirlos.
- Abrir las válvulas de lavado interno de la prensa (para ambos canales).
- Ajustar la velocidad de rotación de la prensa en 30% de la velocidad máxima.
- Ajustar la presión de las compuertas de restricción neumática a la salida de cada canal en 5 psi.
- Encender la correa transportadora.
- Abrir las válvulas neumáticas de alimentación a cada canal (frontal y posterior).



- Cerrar lentamente la válvula de compuerta del by-pass para desviar los lodos hacia la prensa y así comenzar a formar un tapón de sólidos en las compuertas de restricción neumáticas. Tener cuidado de no sobrecargar hidráulicamente la prensa al comienzo de la operación de secado ya que esto puede ocasionar la expulsión del tapón de sólidos secos y la repentina descarga de lodo líquido. Cuando el tapón se ha formado, comenzará a salir la torta con bajo contenido de humedad.

Con la finalidad de facilitar al operador llevar el registro de los valores de las principales variables de operación para el control y operación del filtro prensa rotativo en forma tabulada, se presenta la siguiente planilla de control:



Planilla de Control

Mes: _____ Año: _____ Tiempo de Espesamiento: _____ Operador: _____

Corrida	Velocidad de Rotación Prensa (%)	Velocidad Bomba de Lodo (%)	Frecuencia del Impulso, Polímero	Longitud del Impulso, Polímero	Presión compuerta salida (Psi)	Flujo de Agua (GPM)	Presión Polímero (Psi)	Presión Agua (Psi)	Flujo Sección Frontal (GPM)	Flujo Sección Trasera (GPM)	Flujo Total (GPM)
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											
10											
11											
12											
13											
14											
15											
16											

Observaciones: _____

Como ejemplo del registro que debe ser llenado por el operador se incorpora la planilla de control con los valores de las corridas realizadas para lodos almacenados un período de 5 días, que permitieron obtener el caudal óptimo de operación.

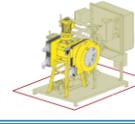


Planilla de Control

Mes: Enero Año: 2011 Tiempo de Espesamiento: 5 días Operador: Yirvida y Reinaldo

Corrida	Velocidad de Rotación Prensa (%)	Velocidad Bomba de Lodo (%)	Frecuencia del Impulso, Polímero	Longitud del Impulso, Polímero	Presión compuerta salida (Psi)		Flujo de Agua (GPM)	Presión Polímero (Psi)	Presión Agua (Psi)	Flujo Sección Frontal (GPM)	Flujo Sección Trasera (GPM)	Flujo Total (GPM)
1	30	15	15	10	0	0	2,0	40	15	10,0	10,0	20
2	30	20	19	10	0	0	2,5	40	15	12,5	12,5	25
3	30	20	23	10	0	0	3,0	40	15	15,0	15,0	30
4	30	25	26	10	0	0	3,5	40	15	17,5	17,5	35
5	30	15	15	10	5	5	2,0	40	15	10,0	10,0	20
6	30	20	19	10	5	5	2,5	40	15	12,5	12,5	25
7	30	20	23	10	5	5	3,0	40	15	15,0	15,0	30
8	30	25	26	10	5	5	3,5	40	15	17,5	17,5	35
9	40	15	15	10	5	5	2,0	40	15	10,0	10,0	20
10	40	20	19	10	5	5	2,5	40	15	12,5	12,5	25
11	40	20	23	10	5	5	3,0	40	15	15,0	15,0	30
12	40	25	26	10	5	5	3,5	40	15	17,5	17,5	35
13	30	20	0	0	5	5	0,0	40	15	15,0	15,0	30
14	30	20	23	10	5	5	3,0	40	15	15,0	15,0	30
15	30	25	45	10	5	5	6,0	40	15	15,0	15,0	30
16	30	25	68	10	5	5	9,0	40	15	15,0	15,0	30

Observaciones: _____



CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones establecidas por los resultados obtenidos.

CONCLUSIONES

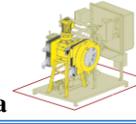
- La cantidad de sólidos totales en el lodo aumenta a medida que aumenta su tiempo de espesamiento en los densificadores, de igual forma aumenta la alcalinidad.
- Las propiedades fisicoquímicas del polímero estudiado repercuten de forma favorable al proceso de filtración de lodos residuales.
- Los valores de dosis de polímero obtenido en el laboratorio y en el filtro mostraron que el método aplicado ayuda en la determinación de la dosis apropiada.
- El aumento en la alcalinidad de los lodos trae como consecuencia un incremento en la dosis de polímero a emplear.
- Los valores de dosis óptima para cada lodo estudiado son los siguientes: lodo con 5 días de espesamiento: 0,10%; con 7 días: 0,15% y con 12 días: 0,20%.
- El caudal de lodo óptimo alimentado al filtro prensa para cada lodo estudiado es la siguiente: lodo con 5 días de espesamiento: 30 GPM; con 7 días: 25 GPM y con 12 días: 20 GPM.
- La dosis óptima en el filtro prensa para cada lodo estudiado es la siguiente: lodo con 5 días de espesamiento: 0,10%; con 7 días: 0,15% y con 12 días: 0,20%.
- La velocidad de rotación óptima en el filtro prensa resultó ser de 30%.
- La presión en la compuerta de descarga óptima en el filtro prensa resultó ser de 5 psi.
- Se generó un procedimiento que permite el funcionamiento óptimo del filtro prensa rotativo.



- El diseño de la planilla de control facilitará al operador llevar un control de las principales variables que afectan funcionamiento del filtro prensa rotativo.

RECOMENDACIONES

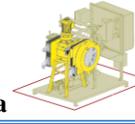
- Debido a los cambios que pueden ocurrir diariamente en las características del lodo es recomendable realizar siempre ensayos para ajustar la dosis de operación.
- Se recomienda aplicar el proceso de elutriación o lavado a los lodos con la finalidad de disminuir la alcalinidad de los mismos y así reducir las necesidades de coagulación.
- Implementar un mejor diseño en la distribución del lodo hacia el filtro prensa rotativo, esto debido a que la planta cuenta con dos de estos equipos pero sólo ha sido posible el uso de uno de ellos, mientras que el otro permanece inactivo al no recibir suficiente lodo.
- Realizar estudios que permitan determinar el potencial fertilizante de los lodos residuales provenientes del tratamiento de aguas servidas.
- Dado el comportamiento con que llega el lodo al sistema de filtrado se recomienda colocar un contenedor de lodo (sludge catcher) y así garantizar una alimentación continua al filtro.
- Realizar un mantenimiento mensual de los equipos que conforman el sistema de filtrado, a fin de garantizar un buen funcionamiento



CAPÍTULO VI

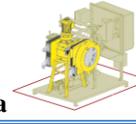
BIBLIOGRAFÍA

1. Angulo, J. L. (1994). **Caracterización Físico-Química de Polímeros**. Editorial Limusa. Texas, USA.
2. A.P.H.A., A.W.W.A. W.P.C.F (1998); **Standard Methods for the examination of water and wastewater**. 20th edition. A.P.H.A. Washington, D.C.
3. Azocar, J. (1996). **Estudio del Comportamiento de Polímero JR-A1 como Agente Controlador de Filtrado en Lodos de Perforación Base Agua**. Trabajo de grado. Universidad Central De Venezuela.
4. Badger y Banchemo. (1977). **Introducción a la Ingeniería Química**. McGraw-Hill. México.
5. Cardoso, L.; Ramirez A. **Identificación de Sistemas de Tratamientos de lodos residuales**. Instituto de Tecnología del agua. D.F, México.
6. Fernández I. J. (2006) **Polímeros en Solución**. PDVSA-Intevep, Los Teques, Venezuela.
7. Mc Cabe, W. (1991) **Operaciones Unitarias en ingeniería química**. 4^a edición. Editorial Reverté. Barcelona, España.
8. **Ley de aguas**. Gaceta n° 38.595, 2 de enero de 2007. Caracas, Venezuela.
9. **Ley Orgánica del ambiente**. Gaceta oficial n° 5833, extraordinario 22 de



diciembre 2006. Caracas, Venezuela.

10. Méndez P. O. E. (1994) **Evaluación de la necesidad de instalación de un sistema de secado de lodos y las diferentes variables que permiten su diseño y construcción para los efluentes líquidos de la industria Remavenca, ubicada en la Encrucijada estado Aragua.** Trabajo de grado, Universidad Central De Venezuela.
11. Metcalf; Eddy. (1979). **Wastewater Engineering Treatment, Diposal and Reuse.** 2nd Edition. McGraw-Hill Inc, New York.
12. Nemerow, N. L. (1977) **Agua Residuales Industriales.** Ediciones H. Blume. Madrid, España.
13. Perry, Ret. al. (1997) **Manual del Ingeniero Químico.** 7 ma edición. Volumen III. Editorial McGraw-Hill. México
14. Pérez M. A. (1995). **Determinación de las Características de Filtración de los Lodos Rojos.** Trabajo de grado. Universidad Central De Venezuela.
15. Prime Solution (2005). **Manual Filtro Prensa Rotativo.** Disponible en la planta de tratamiento de aguas servidas “El Chorrito” Los Teques, Venezuela.
16. Prime Solution. **Prime Rotary fan pres applications.** Disponible en <http://psirotary.com/portals>. Fecha de consulta 27/09/2010.
17. Ramalho, R. S, (1983). **Tratamiento de Aguas Residuales.** Editorial Reverté, S.A. Quebec, Canadá.



18. Reynold, K. A. (2002). **Tratamiento de Aguas Residuales en Latinoamérica.** Disponible en <http://www.esd.worldbank.org>; <http://www.aguaslatinoamericana.com>. Fecha de consulta 20/10/2010.
19. Sasia M. (1996) **Polímeros de Acrilamida y Copolímeros Derivados para el Tratamiento de Aguas.** Vizcaya, España.
20. Sette, R. Domingo, J; De Lora. (1996) **Tratamiento de Aguas Residuales.** Editorial Reverté. Barcelona, España.
21. Seymour, R. B. (1995). **Introducción a la Química de los Polímeros.** Editorial Reverté S.A. Florida, USA.
22. Geankoplis, C. J. (1998). **Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias.** 3 ra Edición. Editorial Continental, S.A. de C.V. México.
23. Tebbutt, T.HY (2008). **Fundamentos Del Control De Calidad del Agua.** Editorial Limusa. Noruega Editores – México.



APÉNDICES



Apéndice A. Resultados pruebas de filtrabilidad en el laboratorio. Lodo de 5 días de espesamiento

(a) Caracterización del polímero.

Dosis de polímero ($C_p \pm 0,01$) % v/v	Concentración solución madre ($C_{sm} + 0,1$) % v/v	pH solución madre ($pH_{sm} \pm 0,1$) adim	Volumen de Lodo ($V_L \pm 1$)mL	Volumen solución madre ($V_{sm} \pm 0,2$) mL	Volumen de Agua ($V_a + 0,2$) mL	Volumen de Polímero ($V_{pol} + 0,2$) mL	Masa de Polímero ($m_{pol} + 0,0001$) g
0,05	1,0	6,6	100	5	1000,0	10,0	10,5100
0,10			100	10			
0,15			100	15			
0,20			100	20			

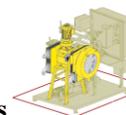
(b) Porcentaje de sólidos totales.

Ensayo	Masa del portamuestra ($m_P + 0,0001$) g	pH del lodo ($pH_L \pm 0,1$) adim	Masa de lodo húmedo con portamuestra ($m_{LH} + 0,0001$) g	Masa de lodo seco con portamuestra ($m_{LS} + 0,0001$) g	Porcentaje de sólidos totales en el lodo ($\%ST_L + 0,06$) %
1	35,7414	6,9	85,6859	38,8135	6,15
2	39,1342	7,0	89,0458	42,2623	6,27
3	37,3895	7,0	87,3265	40,4948	6,22



(c) Filtración al vacío.

Ensayo	Muestra	Masa Portamuestra ($m_P + 0,0001$) g	Masa de torta húmeda con portamuestra ($m_{THF} + 0,0001$) g	Masa de torta seca con portamuestra ($m_{TS} + 0,0001$) g	Masa de cilindro con muestra a filtrar ($m_L + 0,0001$) g	Masa cilindro con muestra restante ($m_{LR} + 0,0001$) g	Porcentaje de sólidos totales (%ST + 0,06) %	Porcentaje Sólidos en la Torta (%STH + 0,06) %
1	Lodo sin polímero	39,9988	117,2184	45,2594	202,5987	117,8860	6,21	6,81
	0,05%	39,8464	107,6560	45,1319	205,9867	119,8867	6,14	7,79
	0,10%	36,7001	71,0696	41,9575	205,1382	120,2414	6,19	15,30
	0,15%	41,3120	89,3615	46,7238	205,7644	119,8613	6,30	11,26
	0,20%	36,6246	93,4758	41,8818	205,5586	119,4894	6,11	9,25
2	Lodo sin polímero	39,3988	117,1606	44,7756	203,2057	117,2271	6,25	6,91
	0,05%	37,3714	98,3780	42,8073	203,438	118,341	6,39	8,91
	0,10%	38,5914	74,3870	44,1375	202,9111	118,4313	6,57	15,49
	0,15%	34,6053	86,1913	40,1380	202,9335	117,603	6,48	10,73
	0,20%	33,6075	92,5891	38,9676	203,8701	117,2226	6,19	9,09
3	Lodo sin polímero	36,3834	113,0628	41,7323	202,924	117,2029	6,24	6,98
	0,05%	39,8740	97,3780	45,1406	203,4236	118,4526	6,20	9,16
	0,10%	39,3994	74,9870	44,9956	202,6625	117,3568	6,56	15,73
	0,15%	31,6150	86,1913	36,6852	202,8978	117,3658	5,93	9,29
	0,20%	39,0330	92,9580	44,2511	202,2714	118,0602	6,20	9,68



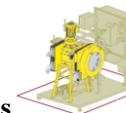
(d) Volumen filtrado obtenido para cada dosis de polímero.

Ensayo	Tiempo de Filtrado (t ± 0,01) s	Dosis de Polímero (Cp + 0,01) % v/v				
		0,00	0,05	0,10	0,15	0,20
		Volumen Filtrado (V + 1) mL				
1	10	1	5	45	19	7
	20	2	7	50	30	13
	30	4	9	52	35	17
	40	5	10	53	38	21
	50	5	12	54	40	24
	60	6	13	55	41	26
	70	6	14	55	42	27
	80	6	15	56	43	29
	90	6	15	56	43	30
	100	7	16	56	44	31
	110	7	17	57	45	32
	120	7	18	57	46	33
2	10	2	8	43	16	7
	20	3	11	46	28	14
	30	4	13	48	32	17
	40	5	14	50	35	20
	50	5	15	51	36	22
	60	6	16	52	37	24
	70	6	17	53	38	25
	80	6	18	54	39	26
	90	6	18	55	40	27
	100	6	19	56	41	27
	110	7	19	57	41	28
	120	7	20	57	42	29
3	10	1	6	42	12	7
	20	2	8	45	24	14
	30	3	10	47	28	17
	40	4	11	48	31	20
	50	4	13	49	32	22
	60	5	14	50	33	24
	70	5	15	51	34	25
	80	6	16	52	35	26
	90	6	16	53	36	27
	100	6	17	54	37	27
	110	7	18	55	37	28
	120	7	19	56	38	29



(e) Resistencia a la drenabilidad obtenida para cada dosis de polímero.

Ensayo	Dosis de polímero (Cp + 0,01) % v/v	Pendiente (s/cm ⁶)	% Humedad en el lodo Ci	% Humedad en la torta Cf	C (g/cm ³)	Presión (g/(cm.s ²))	Área (cm ²)	Viscosidad (g/(cm.s))	r (cm/g)
1	0,00	1,250	93,79	93,19	0,702	507949	44	0,01	3,53E+11
	0,05	0,364	93,86	92,21	0,289				2,50E+11
	0,10	0,060	93,81	84,70	0,104				1,14E+11
	0,15	0,129	93,70	88,74	0,143				1,79E+11
	0,20	0,212	93,89	90,75	0,180				2,34E+11
2	0,00	1,133	93,75	93,09	0,654				3,43E+11
	0,05	0,314	93,61	91,09	0,226				2,76E+11
	0,10	0,133	93,43	84,51	0,114				2,31E+11
	0,15	0,237	93,52	89,27	0,164				2,87E+11
	0,20	0,343	93,81	90,91	0,194				3,51E+11
3	0,00	1,371	93,76	93,02	0,592				4,60E+11
	0,05	0,362	93,80	90,84	0,192				3,74E+11
	0,10	0,147	93,44	84,27	0,113				2,59E+11
	0,15	0,258	94,07	90,71	0,164				3,12E+11
	0,20	0,343	93,80	90,32	0,172				3,95E+11



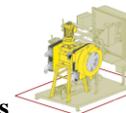
Apéndice B. Resultados de las pruebas de filtrabilidad en el laboratorio. Lodo de 7 días de espesamiento

(a) Caracterización del polímero.

Dosis de polímero ($C_p \pm 0,01$) % v/v	Concentración solución madre ($C_{sm} + 0,1$) % v/v	pH solución madre ($pH_{sm} \pm 0,1$) adim	Volumen de Lodo ($V_L \pm 1$)mL	Volumen solución madre ($V_{sm} \pm 0,2$) ml	Volumen de Agua ($V_a + 0,2$) mL	Volumen de Polímero ($V_{pol} + 0,2$) mL	Masa de Polímero ($m_{pol} + 0,0001$) g
0,05	1,0	6,6	100	5	1000	10,0	10,5100
0,10			100	10			
0,15			100	15			
0,20			100	20			
0,30			100	30			

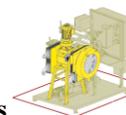
(b) Porcentaje de sólidos totales.

Ensayo	Masa del portamuestra ($m_P + 0,0001$) g	pH del lodo ($pH_L \pm 0,1$) adim	Masa de lodo húmedo con portamuestra ($m_{LH} + 0,0001$) g	Masa de lodo seco con portamuestra ($m_{LS} + 0,0001$) g	Porcentaje de sólidos totales en el lodo ($\%ST_L + 0,02$) %
1	35,0410	6,7	85,0966	38,5450	7,00
2	39,6396	6,8	89,7067	43,1322	6,98
3	38,2764	6,8	88,3822	41,7915	7,02



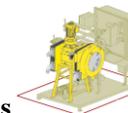
(c) Filtración al vacío.

Ensayo	Muestra	Masa Portamuestra ($m_p + 0,0001$) g	Masa de torta húmeda con portamuestra ($m_{THF} + 0,0001$) g	Masa de torta seca con portamuestra ($m_{ts} + 0,0001$) g	Masa de cilindro con muestra a filtrar ($m_p + 0,0001$) g	Masa cilindro con muestra restante ($m_{LR} + 0,0001$) g	Porcentaje de sólidos totales (%ST + 0,06) %	Porcentaje Sólidos en la Torta (%STH + 0,06) %
1	Lodo sin polímero	38,1264	101,7316	44,1660	204,4062	118,5154	7,03	9,50
	0,05%	30,8407	91,5135	36,8196	204,3265	118,7322	6,99	9,85
	0,10%	38,5801	79,8576	44,6036	204,1939	118,4436	7,02	14,59
	0,15%	35,8217	74,6374	41,9836	204,5321	118,0568	7,13	15,87
	0,20%	37,6267	77,7972	43,6816	204,6687	117,6768	6,96	15,07
	0,30%	38,1431	87,6603	44,1786	204,6980	118,4714	7,00	12,19
2	Lodo sin polímero	34,2835	97,6226	40,2928	204,3654	118,6252	7,01	9,49
	0,05%	34,9204	94,9856	40,9526	204,6602	118,4879	7,00	10,04
	0,10%	37,5009	78,6975	43,5536	204,3689	118,2502	7,03	14,69
	0,15%	36,9242	75,1173	43,0326	204,6004	117,8668	7,04	15,99
	0,20%	37,5849	78,8726	43,6351	204,6833	118,0741	6,99	14,65
	0,30%	39,2716	86,2402	45,3193	204,3491	118,2357	7,02	12,88
3	Lodo sin polímero	38,1287	101,8204	44,1164	204,1738	118,8277	7,02	9,40
	0,05%	39,9367	96,8825	45,9181	204,8435	118,9047	6,96	10,50
	0,10%	35,5072	77,1092	41,5404	204,7801	118,3613	6,98	14,50
	0,15%	36,3240	74,5747	42,3681	203,5846	117,7132	7,04	15,80
	0,20%	39,5165	79,9580	45,5655	204,1357	118,0301	7,03	14,96
	0,30%	39,5892	87,4790	45,5884	204,3025	118,6429	7,00	12,53



(d) Volumen filtrado obtenido para cada dosis de polímero.

Ensayo	Tiempo de Filtrado ($t \pm 0,01$) s	Dosis de Polímero ($C_p + 0,01$) % v/v					
		0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,30
		Volumen Filtrado ($V + 1$) mL					
1	10	3	18	20	35	29	4
	20	5	24	27	42	34	7
	30	5	28	31	45	38	9
	40	6	30	34	48	42	11
	50	6	31	36	52	45	12
	60	7	33	38	54	48	13
	70	8	34	40	56	49	14
	80	8	35	41	58	51	15
	90	9	35	42	59	52	16
	100	10	36	43	61	53	16
	110	11	37	44	62	54	17
	120	12	37	45	63	55	18
2	10	2	17	21	36	28	2
	20	4	23	26	41	34	4
	30	4	26	30	44	40	6
	40	5	29	32	47	44	7
	50	5	30	34	50	46	8
	60	6	31	36	52	47	9
	70	7	32	38	54	48	10
	80	7	33	40	56	49	11
	90	8	34	41	58	50	11
	100	9	35	42	60	51	12
	110	10	36	43	62	52	13
	120	11	37	44	64	53	14
3	10	4	16	19	35	29	2
	20	6	23	28	42	36	4
	30	6	28	32	45	39	6
	40	7	30	36	47	42	7
	50	7	31	38	49	44	8
	60	8	32	40	51	46	9
	70	9	33	41	53	47	10
	80	9	34	42	55	48	11
	90	10	35	43	57	49	12
	100	11	36	45	59	49	13
	110	12	37	46	60	50	14
	120	13	38	47	61	51	15



(e) Resistencia a la drenabilidad obtenida para cada dosis de polímero.

Ensayo	Dosis de polímero (Cp + 0,01) % v/v	Pendiente (s/cm6)	% Humedad en el lodo Ci	% Humedad en la torta Cf	C (g/cm3)	Presión (g/(cm.s2))	Área (cm2)	Viscosidad (g/(cm.s))	r (cm/g)
1	0,00	0,792	92,97	90,50	0,271	507949	44	0,01	5,80E+11
	0,05	0,267	93,01	90,15	0,240				2,21E+11
	0,10	0,089	92,98	85,41	0,135				1,30E+11
	0,15	0,058	92,87	84,13	0,129				8,89E+10
	0,20	0,067	93,04	84,93	0,129				1,03E+11
	0,30	0,323	93,00	87,81	0,164				3,90E+11
2	0,00	0,724	92,99	90,51	0,268				5,35E+11
	0,05	0,232	93,00	89,96	0,231				1,99E+11
	0,10	0,098	92,97	85,31	0,135				1,44E+11
	0,15	0,059	92,96	84,01	0,126				9,30E+10
	0,20	0,127	93,01	85,35	0,133				1,89E+11
	0,30	0,365	92,98	87,12	0,154				4,68E+11
3	0,00	0,798	92,98	90,60	0,277				5,72E+11
	0,05	0,171	93,04	89,50	0,206				1,64E+11
	0,10	0,076	93,02	85,50	0,135				1,12E+11
	0,15	0,064	92,96	84,20	0,127				1,00E+11
	0,20	0,092	92,97	85,04	0,132				1,38E+11
	0,30	0,278	93,00	87,47	0,159				3,47E+11



Apéndice C. Resultados pruebas de filtrabilidad en el laboratorio. Lodo de 12 días de espesamiento

(a) Caracterización del polímero.

Dosis de polímero ($C_p \pm 0,01$) % v/v	Concentración solución madre ($C_{sm} \pm 0,1$) % v/v	pH solución madre ($pH_{sm} \pm 0,1$) adim	Volumen de Lodo ($V_L \pm 1$)mL	Volumen solución madre ($V_{sm} \pm 0,2$) mL	Volumen de Agua ($V_a \pm 0,2$) mL	Volumen de Polímero ($V_{pol} \pm 0,2$) mL	Masa de Polímero ($m_{pol} \pm 0,0001$) g
0,10	1,0	6,6	100	10	1000,0	10,0	10,5100
0,20			100	20			
0,30			100	30			
0,40			100	40			

(b) Porcentaje de sólidos totales.

Ensayo	Masa del portamuestra ($m_P \pm 0,0001$) g	pH del lodo ($pH_L \pm 0,1$) adim	Masa de lodo húmedo con portamuestra ($m_{LH} \pm 0,0001$) g	Masa de lodo seco con portamuestra ($m_{LS} \pm 0,0001$) g	Porcentaje de sólidos totales en el lodo ($\%ST_L \pm 0,03$) %
1	35,8529	6,7	86,4765	39,9835	8,16
2	40,1522	6,8	91,0163	44,2823	8,12
3	38,6370	6,8	89,3498	42,748	8,11



(c) Filtración al vacío.

Ensayo	Muestra	Masa Portamuestra ($m_P + 0,0001$) g	Masa de torta húmeda con portamuestra ($m_{THF} + 0,0001$) g	Masa de torta seca con portamuestra ($m_{TS} + 0,0001$) g	Masa de cilindro con muestra a filtrar ($m_L + 0,0001$) g	Masa cilindro con muestra restante ($m_{LR} + 0,0001$) g	Porcentaje de sólidos totales (%ST + 0,06) %	Porcentaje Sólidos en la Torta (%STH + 0,06) %
1	Lodo sin polímero	39,9976	114,0140	46,4696	202,3881	123,8093	8,24	8,74
	0,10%	35,8211	105,7910	42,4368	204,2498	123,6073	8,20	9,46
	0,20%	38,3917	84,3790	45,1003	203,4857	123,2510	8,36	14,59
	0,30%	37,2158	92,8580	43,8763	203,8580	122,7470	8,21	11,97
	0,40%	31,3733	93,6541	38,2335	204,7022	120,5870	8,16	11,01
2	Lodo sin polímero	34,5101	113,2570	41,2945	204,3672	120,0490	8,05	8,62
	0,10%	40,5748	111,1430	47,2513	204,1608	121,7960	8,11	9,46
	0,20%	35,9913	86,8360	42,7754	203,4120	120,2405	8,16	13,34
	0,30%	39,3995	92,1635	46,2348	203,9102	119,5741	8,10	12,95
	0,40%	31,6150	85,2675	38,4722	203,7349	119,8525	8,17	12,78
3	Lodo sin polímero	38,1432	113,0140	44,8566	203,4221	121,6725	8,21	8,97
	0,10%	36,7855	108,5629	43,6827	203,9566	120,5631	8,27	9,61
	0,20%	36,3091	77,2198	43,1253	203,1952	119,1768	8,11	16,66
	0,30%	40,0397	90,5405	46,8383	203,7716	119,6594	8,08	13,46
	0,40%	37,0307	91,8962	43,8433	203,7666	119,9863	8,13	12,42



(d) Volumen filtrado obtenido para cada dosis de polímero.

Ensayo	Tiempo de Filtrado (t ± 0,01) s	Dosis de Polímero (Cp + 0,01) % v/v				
		0,00	0,10	0,20	0,30	0,40
		Volumen Filtrado (V + 1) mL				
1	10	1	7	38	28	12
	20	1	9	42	32	20
	30	2	11	44	36	26
	40	2	12	46	38	28
	50	2	12	47	40	30
	60	3	13	47	41	31
	70	3	13	48	42	32
	80	3	14	48	43	33
	90	4	14	49	44	34
	100	4	15	49	45	35
	110	4	15	49	46	36
	120	5	16	50	47	37
2	10	2	7	33	28	12
	20	2	10	38	33	23
	30	3	11	41	36	26
	40	3	12	43	37	28
	50	3	13	44	39	29
	60	4	13	45	40	31
	70	4	14	46	41	32
	80	4	15	47	42	33
	90	5	15	48	43	34
	100	5	16	49	43	35
	110	5	16	50	44	35
	120	5	17	51	44	35
3	10	1	9	38	26	14
	20	2	11	43	29	21
	30	2	12	46	32	27
	40	3	13	48	34	30
	50	3	13	50	35	32
	60	3	14	51	36	33
	70	4	14	52	37	34
	80	4	15	53	38	35
	90	4	15	54	39	36
	100	5	16	55	40	37
	110	5	16	56	41	38
	120	5	16	57	42	39



(e) Resistencia a la drenabilidad obtenida para cada dosis de polímero.

Ensayo	Dosis de polímero (Cp + 0,01) % v/v	Pendiente (s/cm ⁶)	% Humedad en el lodo Ci	% Humedad en la torta Cf	C (g/cm ³)	Presión (g/(cm.s ²))	Área (cm ²)	Viscosidad (g/(cm.s))	r (cm/g)
1	0,00	5,916	91,76	91,26	1,419	507949	44	0,01	8,27E+11
	0,10	0,750	91,80	90,54	0,620				2,40E+11
	0,20	0,075	91,64	85,41	0,196				7,59E+10
	0,30	0,120	91,79	88,03	0,262				9,10E+10
	0,40	0,204	91,84	88,99	0,314				1,29E+11
2	0,00	4,533	91,95	91,38	1,218				7,38E+11
	0,10	0,632	91,89	90,54	0,566				2,21E+11
	0,20	0,123	91,84	86,66	0,210				1,16E+11
	0,30	0,147	91,90	87,05	0,216				1,35E+11
	0,40	0,224	91,83	87,22	0,227				1,96E+11
3	0,00	3,550	91,79	91,03	0,976				7,21E+11
	0,10	0,902	91,73	90,39	0,594				3,01E+11
	0,20	0,103	91,89	83,34	0,158				1,29E+11
	0,30	0,163	91,92	86,54	0,202				1,60E+11
	0,40	0,215	91,87	87,58	0,236				1,81E+11



Apéndice D. Resultados de las pruebas con el filtro prensa rotativo. Lodo de 5 días de espesamiento

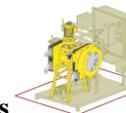
(a) Variables de operación del filtro prensa rotativo

Corrida	Velocidad de Rotación Prensa (%)	Velocidad Bomba de Lodo (%)	Frecuencia del Impulso, Polímero (%)	Longitud del Impulso, Polímero (%)	Presión compuerta salida (Psi)		Flujo de Agua (GPM)	Presión Polímero (Psi)	Presión Agua (Psi)	Front Flow (GPM)	Rear Flow (GPM)	Total Flow (GPM)
1	30	15	15	10	0	0	2,0	40	15	10,0	10,0	20
2	30	20	19	10	0	0	2,5	40	15	12,5	12,5	25
3	30	20	23	10	0	0	3,0	40	15	15,0	15,0	30
4	30	25	26	10	0	0	3,5	40	15	17,5	17,5	35
5	30	15	15	10	5	5	2,0	40	15	10,0	10,0	20
6	30	20	19	10	5	5	2,5	40	15	12,5	12,5	25
7	30	20	23	10	5	5	3,0	40	15	15,0	15,0	30
8	30	25	26	10	5	5	3,5	40	15	17,5	17,5	35
9	40	15	15	10	5	5	2,0	40	15	10,0	10,0	20
10	40	20	19	10	5	5	2,5	40	15	12,5	12,5	25
11	40	20	23	10	5	5	3,0	40	15	15,0	15,0	30
12	40	25	26	10	5	5	3,5	40	15	17,5	17,5	35
13	30	20	0	0	5	5	0,0	40	15	15,0	15,0	30
14	30	20	23	10	5	5	3,0	40	15	15,0	15,0	30
15	30	25	45	10	5	5	6,0	40	15	15,0	15,0	30
16	30	25	68	10	5	5	9,0	40	15	15,0	15,0	30

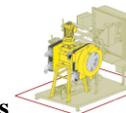


(b) Volumen y masa del lodo a filtrar y del filtrado

Corrida	Ensayo	Volumen Lodo a filtrar (mL)	Masa cilindro + lodo a filtrar (g)	Volumen Filtrado (mL)	Masa cilindro + filtrado (g)
1	1	50	165,4158	50	164,7488
	2	50	165,7945	50	164,9690
2	1	50	165,7157	50	165,1010
	2	50	165,0550	50	164,9130
3	1	50	165,0483	50	164,9395
	2	50	165,3023	50	165,1306
4	1	50	165,8684	50	165,1515
	2	50	165,5519	50	165,2976
5	1	50	165,3149	50	165,0031
	2	50	165,3652	50	165,0725
6	1	50	165,3292	50	164,8477
	2	50	165,9306	50	165,2116
7	1	50	165,5178	50	165,2012
	2	50	165,8025	50	165,5725
8	1	50	165,9138	50	165,2563
	2	50	164,7529	50	164,0896
9	1	50	164,5236	50	164,3625
	2	50	165,2381	50	164,8931
10	1	50	165,5992	50	164,8401
	2	50	165,2667	50	165,0191

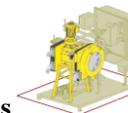


Corrida	Ensayo	Volumen Lodo a filtrar (mL)	Masa cilindro + lodo a filtrar (g)	Volumen Filtrado (mL)	Masa cilindro + filtrado (g)
11	1	50	165,8529	50	165,4931
	2	50	165,0607	50	164,8465
12	1	50	165,1263	50	164,6743
	2	50	165,7302	50	165,0123
13	1	50	165,5163	50	165,2491
	2	50	165,5812	50	165,3321
14	1	50	165,7785	50	165,1360
	2	50	164,7454	50	164,0952
15	1	50	165,1134	50	164,9598
	2	50	165,5134	50	164,7537
16	1	50	165,6462	50	165,1219
	2	50	165,3561	50	165,1057



(c) Características del lodo a filtrar

Corrida	Ensayo	Masa portamuestra (g)	Masa de lodo seco con portamuestra (g)	Porcentaje de sólidos en el lodo a filtrar (%)	Promedio Porc. Sól. Lodo a filtrar (%)
1	1	34,6062	37,7630	6,23	6,4
	2	35,8210	39,2163	6,65	
2	1	39,9966	43,1556	6,20	6,2
	2	35,7411	38,8269	6,14	
3	1	32,9793	35,9106	5,83	6,0
	2	38,1430	41,2737	6,19	
4	1	35,9405	39,1780	6,33	6,2
	2	38,5799	41,6213	5,99	
5	1	38,3923	41,4588	6,07	6,2
	2	37,0189	40,2532	6,39	
6	1	36,3092	39,6170	6,54	6,4
	2	40,5754	43,7373	6,18	
7	1	37,5737	40,8426	6,44	6,2
	2	37,3711	40,4632	6,06	
8	1	39,3983	42,6477	6,35	6,3
	2	36,3098	39,4454	6,27	
9	1	35,6130	38,6856	6,17	6,4
	2	35,3706	38,7152	6,63	
10	1	35,9387	38,9690	5,96	6,0
	2	38,5936	41,6159	5,98	



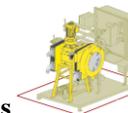
Capítulo VII. Apéndices

Corrida	Ensayo	Masa portamuestra (g)	Masa de lodo seco con portamuestra (g)	Porcentaje de sólidos en el lodo a filtrar (%)	Promedio Porc. Sól. Lodo a filtrar (%)
11	1	38,3256	41,4475	6,11	6,1
	2	37,5129	40,5620	6,06	
12	1	36,3092	39,5170	6,37	6,4
	2	40,5325	43,8373	6,48	
13	1	32,7572	35,9598	6,31	6,3
	2	36,2543	39,4736	6,33	
14	1	38,5536	41,6442	6,06	6,1
	2	35,5234	38,6269	6,21	
15	1	35,7173	38,8630	6,25	6,3
	2	36,9325	40,1161	6,27	
16	1	37,8549	41,0776	6,33	6,4
	2	36,3571	39,6124	6,43	



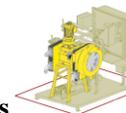
(d) Características del filtrado obtenido

Corrida	Ensayo	Masa Portamuestra (g)	Masa de sólidos secos con portamuestra (g)	Porcentaje de Sól. Susp. en el filtrado (%)	Promedio Porc. Sól. Susp. filtrado (%)	pH filtrado ($\text{pH}_f \pm 0,1$)	Promedio pH filtrado ($\text{pH}_f \pm 0,1$)	Conductividad filtrado ($L_f \pm 0,01$) mS/cm	Promedio Conductividad filtrado ($L_f \pm 0,01$) mS/cm	Turbiedad filtrado ($T \pm 0,1$) N.T.U.	Promedio Turbiedad filtrado ($T \pm 0,1$) N.T.U.
1	1	39,0323	39,5105	1,0	1,0	7,1	7,1	1,15	1,14	4,2	4,4
	2	36,6245	37,1611	1,1		7,1		1,13		4,6	
2	1	30,5881	31,2030	1,2	1,2	7,1	7,0	1,21	1,23	5,1	5,1
	2	36,7006	37,2897	1,2		7,0		1,25		5,0	
3	1	38,3923	39,0054	1,2	1,3	7,1	7,1	1,31	1,33	5,1	8,4
	2	38,5796	39,2334	1,3		7,1		1,35		5,4	
4	1	39,4746	40,9072	2,8	2,9	6,9	7,0	1,49	1,46	11,2	11,5
	2	31,0400	32,5566	3,0		7,0		1,42		11,8	
5	1	37,0300	37,2136	0,4	0,3	7,0	7,0	1,10	1,13	2,2	2,1
	2	37,9537	38,1152	0,3		7,0		1,15		2,1	
6	1	32,9791	33,3248	0,7	0,5	6,9	7,0	1,23	1,21	3,3	2,8
	2	38,1436	38,3436	0,4		7,0		1,18		2,3	
7	1	39,4746	39,8072	0,7	0,6	6,9	6,9	1,25	1,27	3,2	3,1
	2	31,0400	31,3567	0,6		6,9		1,29		3,1	
8	1	38,3923	39,6354	2,5	2,6	7,0	7,0	1,32	1,30	9,7	10,3
	2	38,5796	39,9334	2,7		7,0		1,28		10,8	
9	1	39,0491	39,9105	1,7	1,9	6,8	6,9	1,38	1,39	7,0	7,5
	2	36,3403	37,3611	2,0		6,9		1,40		8,1	
10	1	30,9387	32,2122	2,5	2,3	6,9	6,9	1,53	1,58	10,0	9,3
	2	36,3166	37,3897	2,1		6,9		1,62		8,5	



Capítulo VII. Apéndices

Corrida	Ensayo	Masa Portamuestra (g)	Masa de sólidos secos con portamuestra (g)	Porcentaje de Sól. Susp. en el filtrado (%)	Promedio Porc. Sól. Susp. filtrado (%)	pH filtrado ($\text{pH}_f \pm 0,1$)	Promedio pH filtrado ($\text{pH}_f \pm 0,1$)	Conductividad filtrado ($L_f \pm 0,01$) mS/cm	Promedio Conductividad filtrado ($L_f \pm 0,01$) mS/cm	Turbiedad filtrado ($T \pm 0,1$) N.T.U.	Promedio Turbiedad filtrado ($T \pm 0,1$) N.T.U.
11	1	37,3407	38,6136	2,5	2,5	6,9	7,0	1,63	1,64	9,9	9,7
	2	36,2625	37,4791	2,4		7,1		1,65		9,6	
12	1	32,5497	34,5248	4,0	3,8	6,8	6,8	1,79	1,78	15,9	15,0
	2	38,1524	39,9436	3,6		6,8		1,77		14,2	
13	1	37,2524	39,9125	5,3	4,9	7,0	7,0	2,46	2,33	21,9	20,2
	2	31,1567	33,4567	4,5		7,0		2,19		18,5	
14	1	38,1741	38,9158	1,5	1,5	6,9	7,0	1,35	1,38	6,0	6,2
	2	38,3519	39,1294	1,6		7,0		1,41		6,4	
15	1	39,1439	39,7105	1,1	1,2	6,8	6,8	1,16	1,23	4,8	5,0
	2	36,8467	37,4613	1,2		6,8		1,29		5,2	
16	1	31,6762	32,1961	1,0	1,1	6,9	6,9	1,15	1,14	4,5	4,7
	2	36,8114	37,3897	1,1		6,9		1,12		4,9	



(e) Características de la torta obtenida

Corrida	Ensayo	Masa Portamuestra (g)	Masa de torta sin portamuestra (g)	Masa de torta seca con portamuestra (g)	Porcentaje de sólidos en la torta (%)	Promedio Porc. Sól. Torta (%)	Eficiencia (%)
1	1	35,9901	30,1460	42,4211	21,3	22,2	88
	2	38,3917	30,1589	45,3623	23,1		
2	1	36,2874	30,3701	42,6888	21,1	21,8	85
	2	35,8211	30,5426	42,6895	22,5		
3	1	36,2769	30,1230	42,3971	20,3	20,9	84
	2	32,9794	30,3701	39,5123	21,5		
4	1	39,8061	30,5284	45,1801	17,6	17,8	63
	2	35,9398	30,2132	41,3691	18,0		
5	1	34,1715	30,2389	42,8383	28,7	29,5	96
	2	36,7005	30,6802	46,0379	30,4		
6	1	37,5870	30,9178	46,239	28,0	27,9	93
	2	38,3094	30,1339	46,6681	27,7		
7	1	37,4703	30,7858	45,1826	25,1	25,1	92
	2	39,3975	30,6114	47,1145	25,2		
8	1	36,3080	30,3338	42,144	19,2	19,8	68
	2	39,8303	30,5236	46,0251	20,3		
9	1	36,3834	30,1542	44,4696	26,8	26,2	76
	2	39,8740	30,2351	47,6196	25,6		
10	1	39,3994	30,3132	46,4368	23,2	24,8	67
	2	31,6150	30,1717	39,5846	26,4		



Corrida	Ensayo	Masa Portamuestra (g)	Masa de torta sin portamuestra (g)	Masa de torta seca con portamuestra (g)	Porcentaje de sólidos en la torta (%)	Promedio Porc. Sól. Torta (%)	Eficiencia (%)
11	1	39,0330	30,1533	45,9203	22,8	23,4	66
	2	35,9698	30,1198	43,1763	23,9		
12	1	32,8725	30,1256	38,6335	19,1	20,5	51
	2	34,2831	30,1695	40,8727	21,8		
13	1	36,8802	30,8529	40,4302	11,5	12,4	37
	2	37,2806	30,5135	41,3587	13,4		
14	1	32,0652	30,1442	40,2123	27,0	25,0	80
	2	36,9322	30,5862	43,9631	23,0		
15	1	34,1658	30,6489	42,376	26,8	26,2	85
	2	33,4461	30,4801	41,2694	25,7		
16	1	34,9172	30,4669	44,1801	30,4	29,7	86
	2	35,6054	30,2393	44,3691	29,0		



Apéndice E. Resultados de las prueba con el filtro prensa rotativo. Lodo de 7 días de espesamiento

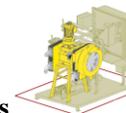
(a) Variables de operación del filtro prensa rotativo

Corrida	Velocidad de Rotación Prensa (%)	Velocidad Bomba de Lodo (%)	Frecuencia del Impulso, Polímero (%)	Longitud del Impulso, Polímero (%)	Presión compuerta salida (Psi)		Flujo de Agua (GPM)	Presión Polímero (Psi)	Presión Agua (Psi)	Front Flow (GPM)	Rear Flow (GPM)	Total Flow (GPM)
1	30	15	17	10	0	0	2,3	30	15	7,5	7,5	15
2	30	20	23	10	0	0	3,0	30	15	10,0	10,0	20
3	30	20	28	10	0	0	3,8	40	12	12,5	12,5	25
4	30	25	34	10	0	0	4,5	40	12	15,0	15,0	30
5	30	15	17	10	5	5	2,3	30	15	7,5	7,5	15
6	30	20	23	10	5	5	3,0	30	15	10,0	10,0	20
7	30	20	28	10	5	5	3,8	30	15	12,5	12,5	25
8	30	20	34	10	5	5	4,5	30	15	15,0	15,0	30
9	40	15	17	10	5	5	2,3	30	15	7,5	7,5	15
10	40	20	23	10	5	5	3,0	30	15	10,0	10,0	20
11	40	20	28	10	5	5	3,8	30	15	12,5	12,5	25
12	40	25	34	10	5	5	4,5	30	15	15,0	15,0	30
13	30	20	0	0	5	5	0,0	30	15	12,5	12,5	25
14	30	20	19	10	5	5	2,5	30	15	12,5	12,5	25
15	30	20	28	10	5	5	3,8	30	15	12,5	12,5	25
16	30	20	38	10	5	5	5,0	30	15	12,5	12,5	25

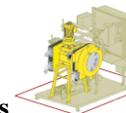


(b) Volumen y masa del lodo a filtrar y del filtrado

Corrida	Ensayo	Volumen Lodo a filtrar (mL)	Masa cilindro + lodo a filtrar (g)	Volumen Filtrado (mL)	Masa cilindro + filtrado (g)
1	1	50	163,9883	50	161,9660
	2	50	163,4583	50	163,3113
2	1	50	163,2399	50	164,3286
	2	50	164,8691	50	163,5062
3	1	50	163,0811	50	162,7756
	2	50	164,8405	50	164,1881
4	1	50	163,3167	50	163,0407
	2	50	164,1881	50	163,8405
5	1	50	163,7814	50	163,7197
	2	50	164,7643	50	164,1198
6	1	50	163,2399	50	163,2065
	2	50	164,3387	50	163,4232
7	1	50	165,8815	50	164,7520
	2	50	164,2845	50	163,6744
8	1	50	163,1291	50	163,0474
	2	50	164,3442	50	163,2005
9	1	50	163,6565	50	163,0226
	2	50	163,5940	50	163,1643
10	1	50	164,3194	50	164,4409
	2	50	164,4886	50	163,5558

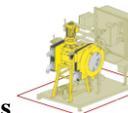


Corrida	Ensayo	Volumen Lodo a filtrar (mL)	Masa cilindro + lodo a filtrar (g)	Volumen Filtrado (mL)	Masa cilindro + filtrado (g)
11	1	50	162,2528	50	162,4746
	2	50	164,1722	50	163,8959
12	1	50	160,7062	50	161,3401
	2	50	164,4865	50	163,9101
13	1	50	165,1825	50	164,5893
	2	50	164,5431	50	163,9712
14	1	50	162,2765	50	162,6769
	2	50	164,1740	50	163,3780
15	1	50	163,0073	50	164,8828
	2	50	164,2095	50	163,4615
16	1	50	163,8148	50	163,3917
	2	50	164,3811	50	163,7969



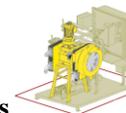
(c) Características del lodo a filtrar

Corrida	Ensayo	Masa portamuestra (g)	Masa de lodo seco con portamuestra (g)	Porcentaje de sólidos en el lodo a filtrar (%)	Promedio Porc. Sól. Lodo a filtrar (%)
1	1	36,4741	40,0656	7,031	7,1
	2	38,2816	41,8924	7,143	
2	1	40,0075	43,5855	7,108	7,1
	2	37,3225	41,0102	7,097	
3	1	42,2662	45,7869	7,017	7,1
	2	37,6659	41,3672	7,127	
4	1	39,9838	43,5434	7,061	7,1
	2	37,6512	41,2672	7,051	
5	1	42,4454	46,0550	7,095	7,1
	2	40,3457	43,9832	7,014	
6	1	38,8736	42,4502	7,106	7,1
	2	39,3009	42,9503	7,095	
7	1	37,2634	40,9084	6,880	6,9
	2	39,6507	43,2191	6,945	
8	1	39,1987	42,7159	7,003	7,0
	2	38,6489	42,2826	7,064	
9	1	43,8702	47,3224	6,802	6,8
	2	38,849	42,3127	6,833	
10	1	35,6051	39,1733	6,940	7,0
	2	38,3671	41,9732	6,991	



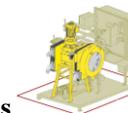
Capítulo VII. Apéndices

Corrida	Ensayo	Masa portamuestra (g)	Masa de lodo seco con portamuestra (g)	Porcentaje de sólidos en el lodo a filtrar (%)	Promedio Porc. Sól. Lodo a filtrar (%)
11	1	36,4896	39,9962	7,106	7,1
	2	40,4476	44,0977	7,120	
12	1	41,4182	44,6698	6,802	6,9
	2	37,3257	40,9054	6,940	
13	1	40,9260	44,5926	7,014	7,0
	2	37,3708	40,9902	7,009	
14	1	38,4658	41,9390	7,035	7,1
	2	37,6634	41,2972	7,088	
15	1	32,8569	36,3046	6,881	6,9
	2	39,3689	42,9503	6,981	
16	1	40,4908	43,9586	6,812	6,9
	2	39,6594	43,2191	6,915	



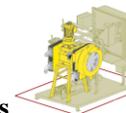
(d) Características del filtrado obtenido

Corrida	Ensayo	Masa Portamuestra (g)	Masa de sólidos secos con portamuestra (g)	Porcentaje de Sól. Susp. en el filtrado (%)	Promedio Porc. Sól. Susp. filtrado (%)	pH filtrado ($\text{pH}_f \pm 0,1$)	Promedio pH filtrado ($\text{pH}_f \pm 0,1$)	Conductividad filtrado ($L_f \pm 0,01$) mS/cm	Promedio Conductividad filtrado ($L_f \pm 0,01$) mS/cm	Turbiedad filtrado ($T \pm 0,1$) N.T.U.	Promedio Turbiedad filtrado ($T \pm 0,1$) N.T.U.
1	1	40,4357	41,0905	1,3	1,3	6,9	6,9	1,35	1,37	6,5	6,4
	2	40,6699	41,3283	1,3		6,9		1,39		6,4	
2	1	33,6297	34,3994	1,5	1,4	7,0	6,9	1,49	1,46	7,1	6,9
	2	32,6223	33,3279	1,4		6,8		1,43		6,7	
3	1	37,8336	38,7591	1,9	1,8	7,0	6,9	1,50	1,49	8,4	8,3
	2	31,6062	32,539	1,8		6,9		1,48		8,3	
4	1	40,9771	43,4026	4,8	4,9	6,7	6,8	1,53	1,54	21,1	21,6
	2	31,5825	34,139	5,0		6,8		1,55		22,0	
5	1	38,7148	39,0476	0,7	0,6	6,8	6,8	1,30	1,28	4,1	4,0
	2	40,5212	40,8433	0,6		6,8		1,25		4,0	
6	1	35,3025	35,6916	0,8	0,8	6,7	6,8	1,30	1,25	4,5	4,4
	2	37,7417	38,1162	0,7		6,8		1,20		4,4	
7	1	40,4699	41,0622	1,1	1,1	6,7	6,7	1,35	1,38	5,8	5,6
	2	34,6489	35,1826	1,1		6,7		1,40		5,5	
8	1	36,9369	38,6794	3,5	3,6	6,8	6,8	1,56	1,58	14,9	15,5
	2	41,6235	43,5145	3,8		6,8		1,59		16,2	
9	1	36,0884	36,9121	1,6	1,6	6,6	6,7	1,30	1,29	7,6	7,5
	2	36,5616	37,3574	1,6		6,7		1,28		7,4	
10	1	35,2608	36,1685	1,8	1,8	6,7	6,7	1,40	1,39	8,1	8,2
	2	38,0737	38,994	1,8		6,7		1,39		8,3	



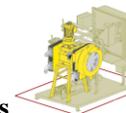
Capítulo VII. Apéndices

Corrida	Ensayo	Masa Portamuestra (g)	Masa de sólidos secos con portamuestra (g)	Porcentaje de Sól. Susp. en el filtrado (%)	Promedio Porc. Sól. Susp. filtrado (%)	pH filtrado ($\text{pH}_f \pm 0,1$)	Promedio pH filtrado ($\text{pH}_f \pm 0,1$)	Conductividad filtrado ($L_f \pm 0,01$) mS/cm	Promedio Conductividad filtrado ($L_f \pm 0,01$) mS/cm	Turbiedad filtrado ($T \pm 0,1$) N.T.U.	Promedio Turbiedad filtrado ($T \pm 0,1$) N.T.U.
11	1	33,5787	34,5598	2,0	1,9	6,7	6,8	1,33	1,35	8,9	8,5
	2	37,0513	37,9551	1,8		6,9		1,38		8,1	
12	1	34,824	36,8265	4,1	4,2	6,6	6,6	2,40	2,48	17,8	18,0
	2	37,4627	39,5983	4,2		6,6		2,55		18,1	
13	1	41,0358	43,5757	4,9	5,0	6,8	6,8	2,61	2,67	21,5	21,9
	2	39,2938	41,8878	5,1		6,8		2,72		22,3	
14	1	35,7756	36,8281	2,1	2,2	6,7	6,8	1,40	1,42	9,4	9,7
	2	41,0578	42,1942	2,3		6,8		1,43		9,9	
15	1	39,6904	40,2817	1,1	1,1	6,6	6,6	1,27	1,24	5,8	5,6
	2	35,2565	35,7812	1,0		6,6		1,20		5,4	
16	1	39,1861	39,6947	1,0	1,0	6,7	6,7	0,43	0,48	5,3	5,4
	2	37,1597	37,6874	1,0		6,7		0,52		5,4	



(e) Características de la torta obtenida

Corrida	Ensayo	Masa Portamuestra (g)	Masa de torta sin portamuestra (g)	Masa de torta seca con portamuestra (g)	Porcentaje de sólidos en la torta (%)	Promedio Porc. Sól. Torta (%)	Eficiencia (%)
1	1	37,0314	30,0602	44,1315	23,6	23,8	86
	2	41,3108	31,6108	48,8848	24,0		
2	1	38,3079	29,9957	44,6865	21,3	21,7	85
	2	38,2254	30,1950	44,8875	22,1		
3	1	36,3753	30,0078	41,7177	17,8	17,5	83
	2	37,6228	30,5291	42,8718	17,2		
4	1	37,5188	30,0078	41,8612	14,5	14,7	45
	2	37,6228	30,5291	42,1718	14,9		
5	1	42,6019	30,0793	51,7147	30,3	30,4	93
	3	39,1711	30,8355	48,5607	30,5		
6	1	31,6081	30,0778	40,2291	28,7	28,4	92
	2	35,1797	30,1981	43,6538	28,1		
7	1	35,9906	30,0014	43,7088	25,7	25,4	88
	2	39,8461	30,9235	47,6265	25,2		
8	1	38,8177	30,0085	45,3949	21,9	21,1	59
	2	39,8093	30,0953	45,9376	20,4		
9	1	41,6854	30,0151	49,2885	25,3	25,6	82
	2	38,2665	30,1014	46,0313	25,8		
10	1	37,5974	30,0164	44,5384	23,1	23,0	81
	2	37,3004	30,4566	44,2914	23,0		



Corrida	Ensayo	Masa Portamuestra (g)	Masa de torta sin portamuestra (g)	Masa de torta seca con portamuestra (g)	Porcentaje de sólidos en la torta (%)	Promedio Porc. Sól. Torta (%)	Eficiencia (%)
11	1	35,9414	30,0216	42,455	21,7	21,0	81
	2	36,9991	30,0519	43,1199	20,4		
12	1	39,3983	30,0433	45,5014	20,3	20,5	50
	2	39,3135	30,2684	45,5932	20,7		
13	1	37,5732	30,1506	43,8398	20,8	20,9	35
	2	40,7473	30,1805	47,0675	20,9		
14	1	36,701	30,0082	43,2159	21,7	21,5	77
	2	37,4489	30,1379	43,8947	21,4		
15	1	38,3932	30,0045	45,4184	23,4	23,3	89
	2	37,9211	30,0712	44,9026	23,2		
16	1	36,3836	30,0930	44,093	25,6	25,9	89
	2	40,1125	30,0821	47,987	26,2		



Apéndice F. Resultados de las prueba con el filtro prensa rotativo. Lodo de 12 días de espesamiento

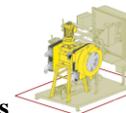
(a) Variables de operación del filtro prensa rotativo

Corrida	Velocidad de Rotación Prensa (%)	Velocidad Bomba de Lodo (%)	Frecuencia del Impulso, Polímero (%)	Longitud del Impulso, Polímero (%)	Presión compuerta salida (Psi)		Flujo de Agua (GPM)	Presión Polímero (Psi)	Presión Agua (Psi)	Front Flow (GPM)	Rear Flow (GPM)	Total Flow (GPM)
1	30	15	15	10	0	0	2,0	30	15	5,0	5,0	10
2	30	15	23	10	0	0	3,0	30	15	7,5	7,5	15
3	30	20	30	10	0	0	4,0	40	12	10,0	10,0	20
4	30	25	38	10	0	0	5,0	40	12	12,5	12,5	25
5	30	15	15	10	5	5	2,0	30	15	5,0	5,0	10
6	30	15	23	10	5	5	3,0	30	15	7,5	7,5	15
7	30	15	30	10	5	5	4,0	30	15	10,0	10,0	20
8	30	20	38	10	5	5	5,0	30	15	12,5	12,5	25
9	40	15	15	10	5	5	2,0	30	15	5,0	5,0	10
10	40	15	23	10	5	5	3,0	30	15	7,5	7,5	15
11	40	15	30	10	5	5	4,0	30	15	10,0	10,0	20
12	40	20	38	10	5	5	5,0	30	15	12,5	12,5	25
13	30	20	0	0	5	5	0,0	30	15	10,0	10,0	20
14	30	15	15	10	5	5	2,0	30	15	10,0	10,0	20
15	30	20	30	10	5	5	4,0	30	15	10,0	10,0	20
16	30	20	45	10	5	5	6,0	30	15	10,0	10,0	20



(b) Volumen y masa del lodo a filtrar y del filtrado

Corrida	Ensayo	Volumen Lodo a filtrar (mL)	Masa cilindro + lodo a filtrar (g)	Volumen Filtrado (mL)	Masa cilindro + filtrado (g)
1	1	50	163,2536	50	164,2954
	2	50	164,8148	50	164,3917
2	1	50	157,8744	50	163,0382
	2	50	165,3261	50	165,5640
3	1	50	163,3902	50	164,5667
	2	50	165,2324	50	165,1164
4	1	50	154,3798	50	163,2430
	2	50	165,4606	50	164,6516
5	1	50	163,3121	50	164,1079
	2	50	165,5432	50	164,4676
6	1	50	164,279	50	163,6568
	2	50	165,8801	50	164,7563
7	1	50	166,9984	50	162,1406
	2	50	165,8964	50	164,6279
8	1	50	163,7454	50	162,7644
	2	50	165,2799	50	164,7085
9	1	50	164,8148	50	164,3917
	2	50	165,1673	50	164,3802
10	1	50	165,2538	50	165,0539
	2	50	164,3435	50	164,0342

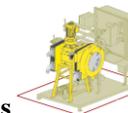


Corrida	Ensayo	Volumen Lodo a filtrar (mL)	Masa cilindro + lodo a filtrar (g)	Volumen Filtrado (mL)	Masa cilindro + filtrado (g)
11	1	50	162,7884	50	163,1789
	2	50	163,7149	50	162,9446
12	1	50	164,9481	50	164,5646
	2	50	165,0653	50	164,3586
13	1	50	163,7316	50	163,2748
	2	50	164,8415	50	164,3113
14	1	50	164,0125	50	163,5074
	2	50	164,3863	50	163,9473
15	1	50	164,8999	50	164,4940
	2	50	164,4276	50	164,2877
16	1	50	164,8171	50	162,3663
	2	50	164,9912	50	164,3859



(c) Características del lodo a filtrar

Corrida	Ensayo	Masa portamuestra (g)	Masa de lodo seco con portamuestra (g)	Porcentaje de sólidos en el lodo a filtrar (%)	Promedio Porc. Sól. Lodo a filtrar (%)
1	1	37,2150	41,2868	8,1	8,1
	2	31,5718	35,7814	8,1	
2	1	37,9466	41,5963	8,1	8,2
	2	40,7954	45,0980	8,2	
3	1	37,4923	41,4527	7,8	7,9
	2	39,1498	43,2762	7,9	
4	1	36,7534	40,1571	8,2	8,2
	2	37,2285	41,5735	8,3	
5	1	37,2150	41,2868	8,1	8,1
	2	37,5631	41,8452	8,1	
6	1	37,2328	41,4076	8,1	8,1
	2	37,1682	41,4852	8,1	
7	1	39,4065	43,8148	8,1	8,2
	2	37,4350	41,7687	8,2	
8	1	36,9306	41,1026	8,2	8,3
	2	39,0612	43,4159	8,3	
9	1	40,8172	45,0226	8,1	8,1
	2	37,1686	41,4255	8,1	
10	1	36,3321	40,4596	7,9	7,9
	2	37,9884	42,0183	7,8	



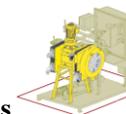
Capítulo VII. Apéndices

Corrida	Ensayo	Masa portamuestra (g)	Masa de lodo seco con portamuestra (g)	Porcentaje de sólidos en el lodo a filtrar (%)	Promedio Porc. Sól. Lodo a filtrar (%)
11	1	40,9391	45,0529	8,2	8,2
	2	37,0590	41,1805	8,1	
12	1	37,2294	41,3204	7,9	7,9
	2	37,3258	41,4679	7,9	
13	1	40,3474	44,4585	8,1	8,1
	2	37,9139	42,1697	8,2	
14	1	38,9276	43,1541	8,3	8,2
	2	37,3588	41,5296	8,1	
15	1	39,6129	43,7309	7,9	8,0
	2	37,7946	41,9083	8,0	
16	1	36,8557	41,0624	8,1	8,1
	2	37,9013	42,1332	8,1	



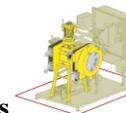
(d) Características del filtrado obtenido

Corrida	Ensayo	Masa Portamuestra (g)	Masa de sólidos secos con portamuestra (g)	Porcentaje de Sól. Susp. en el filtrado (%)	Promedio Porc. Sól. Susp. filtrado (%)	pH filtrado (pH _f ± 0,1)	Promedio pH filtrado (pH _f ± 0,1)	Conductividad filtrado (L _f ± 0,01) mS/cm	Promedio Conductividad filtrado (L _f ± 0,01) mS/cm	Turbiedad filtrado (T ± 0,1) N.T.U.	Promedio Turbiedad filtrado (T ± 0,1) N.T.U.
1	1	34,3115	34,8212	1,0	1,0	7,1	7,1	1,25	1,18	3,9	3,9
	2	36,9497	37,4493	1,0		7,1		1,10		3,9	
2	1	38,9333	39,473	1,1	1,1	7,1	7,1	1,32	1,48	4,2	4,3
	2	39,2657	39,8848	1,2		7,1		1,64		4,5	
3	1	38,5324	39,1816	1,3	1,3	7,0	6,9	1,57	1,78	4,7	4,7
	2	37,9716	38,6347	1,3		6,9		2,00		4,7	
4	1	39,0706	41,4156	4,7	4,5	7,0	7,0	2,25	2,10	15,7	15,3
	2	40,4124	42,7091	4,4		7,0		1,96		14,9	
5	1	32,3011	32,5593	0,5	0,5	6,9	6,9	0,92	1,09	2,6	2,5
	2	36,7602	36,9987	0,5		6,9		1,26		2,4	
6	1	33,4526	33,7966	0,7	0,7	6,9	6,8	1,11	1,33	3,0	3,1
	2	37,5742	37,9437	0,7		6,7		1,54		3,1	
7	1	39,0730	39,6217	1,1	1,1	6,7	6,7	1,18	1,21	4,3	4,3
	2	38,3226	38,9024	1,1		6,8		1,23		4,3	
8	1	37,9554	39,8601	3,8	4,0	6,8	6,8	1,12	1,16	12,8	13,3
	2	38,5534	40,6911	4,1		6,8		1,21		13,8	
9	1	39,0982	39,7247	1,2	1,2	6,9	6,9	1,39	1,41	4,6	4,7
	2	37,2692	37,9253	1,3		6,9		1,42		4,8	
10	1	39,7386	40,5958	1,6	1,6	6,9	6,8	1,45	1,44	5,8	5,6
	2	38,0422	38,8129	1,5		6,7		1,44		5,4	



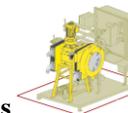
Capítulo VII. Apéndices

Corrida	Ensayo	Masa Portamuestra (g)	Masa de sólidos secos con portamuestra (g)	Porcentaje de Sól. Susp. en el filtrado (%)	Promedio Porc. Sól. Susp. filtrado (%)	pH filtrado ($\text{pH}_f \pm 0,1$)	Promedio pH filtrado ($\text{pH}_f \pm 0,1$)	Conductividad filtrado ($L_f \pm 0,01$) mS/cm	Promedio Conductividad filtrado ($L_f \pm 0,01$) mS/cm	Turbiedad filtrado ($T \pm 0,1$) N.T.U.	Promedio Turbiedad filtrado ($T \pm 0,1$) N.T.U.
11	1	35,1028	36,0282	1,8	1,9	6,9	6,8	1,41	1,43	6,4	6,6
	2	38,8366	39,8234	2,0		6,8		1,45		6,8	
12	1	37,6308	40,1119	4,8	4,8	6,8	6,8	1,53	1,51	16,3	16,4
	2	39,1941	41,6995	4,9		6,8		1,49		16,5	
13	1	38,8971	41,9691	6,1	6,0	6,8	6,8	1,72	1,74	21,3	21,0
	2	36,6374	39,7188	6,0		6,7		1,76		20,8	
14	1	35,7070	37,386	3,3	3,2	6,9	6,9	1,69	1,67	11,1	10,8
	2	38,3946	39,9942	3,1		6,9		1,65		10,5	
15	1	39,2174	40,3977	2,3	2,2	6,9	6,9	1,54	1,55	7,8	7,6
	2	34,9609	36,0559	2,1		6,8		1,56		7,3	
16	1	38,5224	39,5557	2,1	2,0	6,8	6,8	0,73	0,81	7,2	7,0
	2	38,2458	39,2683	2,0		6,9		0,89		6,9	



(e) Características de la torta obtenida

Corrida	Ensayo	Masa Portamuestra (g)	Masa de torta sin portamuestra (g)	Masa de torta seca con portamuestra (g)	Porcentaje de sólidos en la torta (%)	Promedio Porc. Sól. Torta (%)	Eficiencia (%)
1	1	39,1398	32,6315	48,3261	28,2	28,0	91
	2	36,3836	30,0930	44,783	27,9		
2	1	34,5078	30,5378	42,7062	26,8	26,7	90
	2	31,0490	30,6482	39,1594	26,5		
3	1	37,2152	30,2682	44,9898	25,7	25,3	88
	2	35,1810	30,9427	42,8984	24,9		
4	1	39,6389	30,1335	45,9994	21,1	21,5	57
	2	32,9809	30,7737	39,7462	22,0		
5	1	37,0287	30,7418	46,1072	29,5	29,8	96
	3	35,7526	31,1380	45,1104	30,1		
6	1	35,9380	30,3640	44,1651	27,1	27,0	94
	2	40,0004	30,4514	48,1745	26,8		
7	1	32,9776	30,6246	40,9969	26,2	26,0	91
	2	38,5920	30,8744	46,5651	25,8		
8	1	40,5744	30,3661	47,1269	21,6	21,2	64
	2	33,6070	31,1316	40,0747	20,8		
9	1	37,5732	30,1506	45,5398	26,4	26,7	89
	2	36,9543	31,1458	45,3407	26,9		
10	1	31,6074	30,0005	39,3191	25,7	25,8	85
	2	34,2045	30,5613	42,1469	26,0		



Capítulo VII. Apéndices

Corrida	Ensayo	Masa Portamuestra (g)	Masa de torta sin portamuestra (g)	Masa de torta seca con portamuestra (g)	Porcentaje de sólidos en la torta (%)	Promedio Porc. Sól. Torta (%)	Eficiencia (%)
11	1	35,1793	30,0051	41,9313	22,5	22,9	84
	2	37,1206	30,3132	44,1651	23,2		
12	1	38,5799	30,0543	44,7573	20,6	20,8	51
	2	33,0703	30,7882	39,5347	21,0		
13	1	37,6245	30,1677	42,2491	15,3	15,5	42
	2	37,9609	30,3812	42,6988	15,6		
14	1	37,4703	30,0537	44,2673	22,6	22,9	71
	2	34,6382	30,9515	41,8347	23,3		
15	1	39,4725	30,0110	46,4893	23,4	23,5	80
	2	37,5352	30,4131	44,6988	23,6		
16	1	40,0375	30,0301	47,5754	25,1	25,4	81
	2	36,2446	30,7877	44,1583	25,7		



Apéndice G. Cálculos Tipo

A continuación se presentan todas las ecuaciones que se utilizarán para obtener los resultados requeridos en este Trabajo Especial de Grado.

1. Densidad del polímero

$$\rho_P = \frac{m_{PP} - m_{PV}}{V_P} \quad (Ec. 6)$$

Donde:

ρ_P : Densidad del polímero (g/mL)

m_{PP} : Masa del picnómetro con polímero (g)

m_{PV} : Masa del picnómetro vacío (g)

V_P : Volumen del picnómetro (mL)

$$\rho_P = \frac{49,7654g - 23,4825g}{25mL} = 1,051 \frac{g}{mL}$$

2. Porcentaje de sólidos totales en el lodo

$$\%ST_L = \frac{m_{LS} - m_P}{m_{LH} - m_P} \times 100 \quad (Ec. 7)$$

Donde:

$\%ST$: Porcentaje de sólidos totales en el lodo (%)

m_P : masa del portamuestra (g)

m_{LH} : masa de la muestra de lodo húmedo con portamuestra (g)

m_{LS} : masa de la muestra de lodo seco con portamuestra (g)

$$\%ST_L = \frac{38,8135g - 35,7414g}{85,6859g - 35,7414g} \times 100 = 6,15 \%$$



3. Porcentaje de humedad en el lodo

$$c_i = 100 - \%ST_L \quad (Ec. 8)$$

Donde:

c_i : Porcentaje de humedad en el lodo (%)

$$c_i = 100 - 6,15 = 93,85 \%$$

4. Porcentaje de sólidos retenidos en el papel de filtro (torta)

$$\%ST_{PF} = \frac{m_{TSF} - m_P}{m_{THF} - m_P} \times 100 \quad (Ec. 9)$$

Donde:

$\%ST_{PF}$: Porcentaje de sólidos en la torta (en el papel de filtro) (%)

m_P : masa del portamuestra (g)

m_{THF} : masa de torta húmeda (en el papel de filtro) con portamuestra (g)

m_{TSF} : masa de torta seca (en el papel de filtro) con portamuestra (g)

$$\%ST_{PF} = \frac{45,2594g - 39,9988g}{117,2184g - 39,9988g} \times 100 = 6,81 \%$$

5. Porcentaje de humedad en la torta

$$c_f = 100 - \%ST_{PF} \quad (Ec. 10)$$

Donde:

c_f : Porcentaje de humedad en la torta (%)

$$c_f = 100 - 6,81\% = 93,19 \%$$

6. Parámetro c

$$c = \frac{1}{\frac{c_i}{100 - c_i} + \frac{c_f}{100 - c_f}} \quad (Ec. 11)$$



Donde:

c : Concentración de sólidos totales por volumen de filtrado (g/cm^3)

$$c = \frac{1}{\frac{93,79}{100 - 93,79} + \frac{93,19}{100 - 93,19}} = 0,702 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

7. Resistencia específica de la torta o resistencia a la drenabilidad

$$r = \frac{2 \times P \times A^2 \times p}{\mu \times c} \quad (\text{Ec. 12})$$

Donde:

r : Resistencia específica de la torta (cm/g)

P : Presión aplicada a través de la torta ($\text{g}/\text{cm} \cdot \text{s}^2$)

A : Área del embudo (cm^2)

p : Pendiente (s/cm^6)

μ : viscosidad del filtrado ($\text{g}/\text{cm} \cdot \text{s}$)

$$r = \frac{2 \times 507949 \frac{\text{g}}{\text{cm} \times \text{s}^2} \times (63,6 \text{cm}^2)^2 \times 2,202 \frac{\text{s}}{\text{cm}^6}}{0,01 \frac{\text{g}}{\text{cm} \times \text{s}} \times 0,702 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} = 1,29\text{E}09 \frac{\text{cm}}{\text{g}}$$

8. Volumen de la solución madre a agregar en el lodo

$$V_{sm} = \frac{C_p \times V_L}{C_{sm}} \quad (\text{Ec. 13})$$

Donde:

V_{sm} : Volumen de la solución madre (mL)

V_L : Volumen de lodo (mL)

C_p : Dosis de polímero (% v/v)

C_{sm} : Concentración de la solución madre (% v/v)



$$V_{sm} = \frac{0,05\% \times 90 \text{ mL}}{1\%} = 4,5 \text{ mL}$$

9. Eficiencia en la recuperación de sólidos

$$\%E_f = \frac{C_C \times (C_S - C_R)}{C_S \times (C_C - C_R)} \times 100 \quad (\text{Ec. 14})$$

Donde:

$\%E_f$: Porcentaje de eficiencia en la recuperación de sólidos (%)

C_C : Concentración de sólidos en la torta de lodos (% m/m)

C_S : Concentración de sólidos en el lodo de alimentación (% m/m)

C_R : Concentración de sólidos en el líquido clarificado (% m/m)

$$\%E_f = \frac{22,2\% \times (6,4\% - 1,0\%)}{6,4\% \times (22,2\% - 1,0\%)} \times 100 = 88\%$$

10. Porcentaje de sólidos suspendidos en el filtrado

$$\%ST_F = \frac{m_S - m_P}{m_F - m_P} \times 100 \quad (\text{Ec. 15})$$

Donde:

$\%ST_F$: Porcentaje de sólidos totales en el filtrado (%)

m_P : masa del portamuestra (g)

m_F : masa de la muestra de filtrado con portamuestra (g)

m_S : masa de la muestra de sólidos con portamuestra (g)

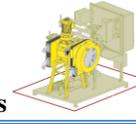
11. Porcentaje de sólidos en la torta

$$\%ST_T = \frac{m_{TS} - m_P}{m_{TH} - m_P} \times 100 \quad (\text{Ec. 16})$$

$$\%H_T = 100 - \%ST_T \quad (\text{Ec. 17})$$

Donde:

$\%ST_T$: Porcentaje de sólidos en la torta (%)



$\%H_T$: Porcentaje de humedad en la torta (%)

m_P : masa del portamuestra (g)

m_{TH} : masa de torta húmeda con portamuestra (g)

m_{TS} : masa de torta seca con portamuestra (g).

12. Medida de la alcalinidad

Dado que el pH de la muestra analizar es inferior a 8,3, se considera que el aporte en la alcalinidad de los grupos hidróxidos y carbonatos es despreciable por lo que la alcalinidad de la muestra estará basada en la concentración de los grupos de bicarbonatos presentes.

$$[HCO_3^{2-}] = \frac{Z \cdot N \cdot 1000}{a} \quad (Ec. 18)$$

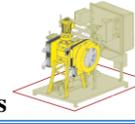
Donde:

Z: Volumen de la lectura de la bureta, al alcanzar la muestra un pH de 4.5 (mL)

N: Normalidad del ácido (N)

a: Volumen de la alícuota de la solución problema (mL)

$$[HCO_3^{2-}] = \frac{6,8.0,2.1000}{25} = \frac{54,4meq}{L} = 2720mgCaCO_3$$



Apéndice H. Deducción del comportamiento lineal del tiempo por volumen en función del volumen.

De la ecuación (1) para la presión se utiliza generalmente una escala relativa en la que la presión atmosférica normal es el nivel cero de esta escala. En este caso, P , es decir la diferencia de presión aplicada a través de la torta, es numéricamente igual al vacío producido, como se muestra en la ecuación (19):

$$P = P_{atmosf} - P_{vacío} = 0 - P_{vacío} = -P_{vacío} \quad (Ec. 19)$$

Donde:

P_{atmosf} : Presión atmosférica (mmHg)

$P_{vacío}$: Presión de vacío aplicada (mmHg)

Por consiguiente ΔP se puede sustituir por P , siendo equivalente al vacío aplicado.

La ecuación (1) puede expresarse como:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{P \cdot A^2}{\mu \cdot (r \cdot c \cdot V + R_m \cdot A)} \quad (Ec. 20)$$

Donde:

P : Presión de vacío aplicada a través de la torta ($\text{g/cm} \cdot \text{s}^2$)

A : Área de filtración (cm^2)

μ : viscosidad del filtrado ($\text{g/cm} \cdot \text{s}$)

r : Resistencia específica de la torta al paso de filtrado (cm/g)

c : Concentración de sólidos totales por volumen de filtrado (g/cm^3)

R_m : Resistencia inicial del medio filtrante (cm/g)

De la ecuación (20) se deduce que cV será la cantidad de sólidos en la torta (g) que corresponden al volumen V de filtrado. La resistencia del medio filtrante es normalmente despreciable en comparación con la de la torta.

El significado físico del parámetro r puede apreciarse si en la ecuación (20) se desprecia el término R_m , resolviendo la ecuación para r nos queda:



$$r = \frac{P \cdot A^2}{\mu \cdot c \cdot V \cdot \frac{dV}{dt}} \quad (\text{Ec. 21})$$

De la ecuación (21) se obtiene que r es numéricamente igual a la diferencia de presión (vacío aplicado P) requerida para tener una velocidad de filtración unidad ($dV/dt=1,0$) por unidad de masa de la torta ($cV=1,0$) y unidad de superficie del filtro ($A=1,0$), suponiendo la viscosidad $\mu=1,0$ ($1cP$); es decir, $r=P$ si $dV/dt=1,0$, $cV=1,0$, $\mu=1,0$ y $A=1,0$. Por lo tanto r representa la mayor o la menor facilidad del lodo para ser filtrado; cuanto mayor sea el valor de r más difícil será la separación (Ramalho, 1983).

La integración de la ecuación (21) se suele hacer suponiendo que la resistencia específica no varía en el tiempo. Si para $t=0$, $V=0$ y para $t=t$, $V=V$, la integración de la ecuación (20) da:

$$\frac{\mu}{A^2 \cdot P} \int_0^V (r \cdot c \cdot V + R_m \cdot A) dV = \int_0^t dt \quad (\text{Ec. 22})$$

Suponiendo que la resistencia específica de la torta es constante:

$$\frac{\mu}{A^2 \cdot P} \left(r \cdot c \int_0^V V \cdot dV + R_m \cdot A \int_0^V dV \right) = \int_0^t dt \quad (\text{Ec. 23})$$

Integrando:

$$\frac{\mu}{A^2 \cdot P} \left(r \cdot c \frac{V^2}{2} + R_m \cdot A \cdot V \right) = t \quad (\text{Ec. 24})$$

Dividiendo ambos miembros de la ecuación (24) por V y ordenando se obtiene la ecuación (2).



ANEXOS

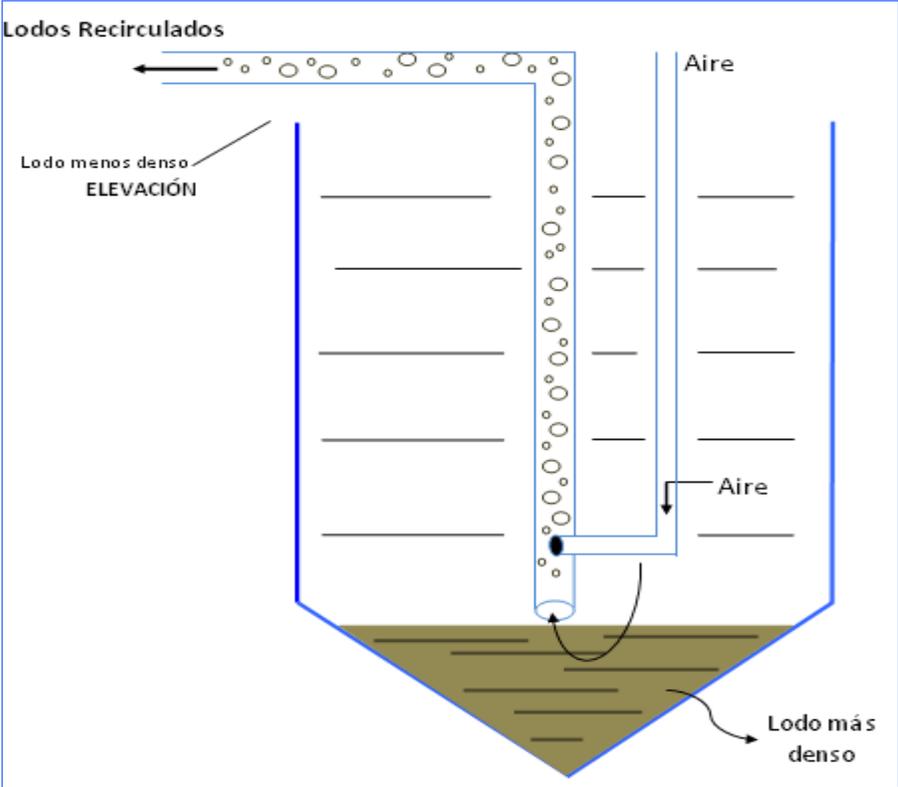


Figura N° 19. Bomba Lift para recircular lodos



Figura N° 20. Densificadores de lodo



Figura N° 21. Contenedor de polímero (Emulsión de poliacrilamida)



Figura N° 22. Filtro prensa rotativo



Figura N° 23. Reactores biológicos