

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE RECIRCULACIÓN Y EXTRACCIÓN DE
LODOS EN UN MÓDULO DE TECNOLOGÍA DENSEDEG DE UNA PLANTA DE
TRATAMIENTO DE AGUA

Presentado por:

FERGIE LILIAN FERNÁNDEZ LÓPEZ

Trabajo de Grado presentado ante la Universidad de Oriente como
requisito parcial para optar al título de:

INGENIERO QUÍMICO

Puerto la Cruz, diciembre de 2010

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE RECIRCULACIÓN Y EXTRACCIÓN DE
LODOS EN UN MÓDULO DE TECNOLOGÍA DENSEDEG DE UNA PLANTA DE
TRATAMIENTO DE AGUA

ASESORES

Ing. Químico Yuvi Moreno, Esp.
Asesor académico

Ing. Químico Jonathan Salazar
Asesor industrial

Puerto la Cruz, diciembre de 2010

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE RECIRCULACIÓN Y EXTRACCIÓN DE
LADOS EN UN MÓDULO DE TECNOLOGÍA DENSADEG DE UNA PLANTA DE
TRATAMIENTO DE AGUA

JURADOS

Ing. Químico Yuvi Moreno, Esp.
Asesor académico

Ing. Químico Milena Amundaraín, M. Sc
Jurado principal

Ing. Químico Alexis Cova, M. Sc.
Jurado principal

Puerto la Cruz, diciembre de 2010

RESOLUCIÓN

De acuerdo al artículo 41 del reglamento de Trabajos de Grado:

“Los Trabajos de Grado son exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente y sólo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del consejo de núcleo respectivo, el cual participará al consejo universitario”

DEDICATORIA

Esta tesis, fruto de la constancia, trabajo, entrega y compromiso, hoy se la dedico a:

Mi mami, Luisa López, por ser mi columna y mi fuerte en todo momento tanto en mi vida personal como en mi vida profesional. ¡Te amo mami!

Mi papi, Trino Fernández, porque fuiste, eres y seguirás siendo la guía de mi camino a través de tus hermosos ojos verdes. ¡Te amaré por siempre papi!

Los admiro. ¡Sé que ansiaban este logro tanto como yo!

Y por último, pero no menos importante, a *la mia piccola*, Fabiana Fernández, espero seguir siendo un modelo a seguir para ti. ¡Ti amo piccola!

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, quiero agradecer a Dios por permitirme gozar de vida y salud para poder culminar esta etapa de mi vida y mi carrera, por darme una oportunidad nueva todos los días al amanecer para poder seguir adelante y por ofrecerme la fuerza, constancia, dedicación y ganas de empezar, desarrollar y culminar este proyecto. ¡Él sabe lo que hace y porqué lo hace!

Agradezco profundamente a mis padres, porque nunca escuché una negativa de su parte con respecto a mi decisión de estudiar ingeniería, nunca me dejaron caer y estuvieron presentes en todo momento. Gracias por confiar en mí, por inculcarme valores tan estrictamente, hoy entiendo el porqué de eso. No puedo agradecerles a ustedes solo por este trabajo. Les agradezco toda una vida y estas palabras se quedan cortas.

También les quiero dar las gracias a:

Mis hermanos, Fabiana, Nilamar y Trino José porque a pesar de que nunca entendían de qué hablaba, siempre me escucharon, me apoyaron en todo momento y porque cada uno, a su manera, hacía lo que estaba en sus manos para complacerme y ayudarme en lo que necesitara. Así como también a *mamá Tina*, porque mejor no me ha podido tratar, sé que soy su tercera hija.

Mis tíos, Diego, Yolanda, Gladys y Martina, mis primas, Yoanny y Fabiola porque siempre han estado pendientes de mí y han puesto, a su manera, su granito de arena para ayudarme a cumplir esta meta.

Mis amigos del alma, Emilio y Jose, nunca se han cansado de decir que están orgullosos de que yo haya estudiado esta carrera. Gracias por creer en mí siempre y seguir juntos los tres después de once años.

Mis manitas, Marybeth, Daniela, Marlen y Marlene que iniciaron conmigo en la UDO y me dieron ánimos para seguir siempre. Así como también al “combo UDO-IQ”, Aniliana, Antonio, Cariana, Diego, Ivanna, Jesús, Luis Alejandro ‘Blanco’, María Fernanda y Moira, gracias a todos por su apoyo incondicional, por permitirme ser parte de este grupo genial de amigos que hemos formado que ya se parece más a una familia. Gracias por tenderme la mano y ayudarme a levantar en momentos difíciles a lo largo de estos cinco años. Mejores que ustedes, difícil de encontrar.

Mis tutores, Yuvi Moreno y Jonathan Salazar y a la profesora Milena Amundarán, por ayudarme y guiarme en el desarrollo de este proyecto. Asimismo, agradezco a Emelys Gómez, Manuel García, José López, Emilio Totesaut, José Castillo, José Linares, Gerardo Olim, José Hernández, Arturo Maza, Roiman Villael, Damian Guerra, Johan, Oscarina y María, por haberme prestado apoyo técnico.

RESUMEN

Para la evaluación del sistema de recirculación y extracción de lodos en el módulo D-200 de la planta de tratamiento de aguas perteneciente a Pequiven-Jose, se realizó un balance de masa para el cálculo de la cantidad de lodos extraíbles del sistema, de manera que éste permaneciera en equilibrio; para ello se utilizaron las concentraciones de sólidos suspendidos y totales presentes en las distintas corrientes de flujo. Posteriormente, con la cantidad de lodos extraíbles, se calculó el tiempo y la frecuencia de extracción, observándose que algunos de los caudales calculados presentaron picos altos con respecto al resto, debido a las diferentes condiciones de formación de los lodos. El funcionamiento de la planta, se verificó mediante el cálculo de distintos parámetros operacionales como la carga superficial, porcentaje de remoción de sólidos, velocidad de sedimentación y flujo másico de extracción de lodos, para luego compararlos con los establecidos por diseño, encontrándose que la planta estaba funcionando bien durante el período de estudio, salvo la velocidad de sedimentación, la cual fue muy baja. Asimismo, se estudiaron los instrumentos de control para el nivel de la capa de lodos, donde se observó que actualmente no se encuentran en la planta. El estudio hidráulico permitió conocer la capacidad de las bombas BV-204A del sistema de recirculación y BV-208B del sistema de extracción de lodos, obteniéndose que la bomba BV-204A trabaja en condiciones adecuadas (200 rpm), mientras que la bomba BV-208B en ocasiones trabaja fuera del rango preestablecido (575 rpm). En base a los resultados obtenidos por esta evaluación, se propuso trabajar la bomba BV-208B a una menor velocidad (150 rpm) para asegurar una mayor vida útil del equipo y la adquisición de nuevos medidores de nivel para el control de la capa de lodos en el sedimentador.

ÍNDICE

RESOLUCIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTOS	vi
RESUMEN.....	viii
ÍNDICE	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiv
CAPÍTULO I.....	16
EL PROBLEMA	16
1.1. Descripción General de la Empresa	16
1.1.1. Ubicación Geográfica	16
1.1.2. Instalaciones y servicios.....	17
1.2. Planteamiento del Problema.....	17
1.3. Objetivos	19
1.3.1. Objetivo General.....	19
1.3.2. Objetivos Específicos.....	20
CAPÍTULO II	21
FUNDAMENTOS TEÓRICOS	21
2.1. Antecedentes	21
2.2. El Agua: un Disolvente Universal	22
2.2.1. Calidad del Agua.....	23
2.2.2 Sólidos y Residuos Presentes en el Agua.....	24
2.3. Descripción del Proceso.....	25
2.4. Operaciones Unitarias del Tratamiento de Agua	28
2.4.1. Coagulación-Floculación	28

2.4.2. Sedimentación.....	29
2.4.3. Filtración.....	38
2.5. Espesamiento de Lodos.....	40
2.5.1. Manejo de Lodos.....	41
2.5.2. Extracción Periódica.....	43
2.5.3. Velocidades Mínimas de Arrastre de Tuberías de Extracción.....	44
2.5.4. Efecto de la recirculación de lodos sobre la remoción de la turbidez del agua cruda.....	45
2.6. Balance de Masa.....	45
2.6.1. Clasificación de los procesos.....	46
2.6.2. Ecuación General de Balance.....	47
2.7. Evaluación Hidráulica.....	48
2.7.1. Teorema de Bernoulli.....	48
2.7.2. Factor de Fricción de Darcy.....	49
2.7.3. Pérdidas de Presión Debidas a Válvulas y Accesorios. Coeficiente de Resistencia K.....	50
2.7.4. Pérdidas de Carga por Reología del Lodo.....	51
2.7.5. Carga del Sistema.....	52
2.7.6. Curva de Fricción y de Carga del Sistema.....	53
2.7.7. Carga Neta Positiva de Succión (NPSH).....	54
2.7.8. Bomba de Cavidad Progresiva (Rotatoria de Tornillo).....	56
2.8. Componentes Básicos de los Sistemas de Control.....	58
CAPÍTULO III.....	61
DESARROLLO DEL PROYECTO.....	61
3.1. Cálculo del Caudal, el Tiempo y la Frecuencia de Extracción de Lodos Mediante el Balance de Masa del Proceso de Coagulación-Floculación.....	61
3.1.1. Balance de Masa en el Proceso de Coagulación-Floculación.....	69
3.1.2. Cálculo del Tiempo de Extracción de Lodos.....	74
3.1.3. Cálculo de la Frecuencia de Extracción.....	75

3.2. Comparación de los Valores de la Carga Superficial, Porcentaje de Remoción de Sólidos, Velocidad de Sedimentación y Flujo Másico de Extracción de Lodos Operacionales con respecto a los Valores de Diseño.....	76
3.2.1. Carga Superficial.....	76
3.2.2. Porcentaje de Remoción de Sólidos.....	77
3.2.3. Velocidad de Sedimentación.....	78
3.2.4. Flujo másico de Extracción de Lodos.....	80
3.3. Estudio de los Instrumentos para el Control del Nivel de Lodos así como el Desempeño de las Bombas del Sistema.....	81
3.3.1. Instrumentos para el Control del Nivel de Lodos.....	81
3.3.2. Estudio Hidráulico para las Bombas del Sistema de Lodos.....	83
3.4. Propuestas de Mejoras al Sistema de Recirculación y Extracción de Lodos en el Módulo Densadeg D-200.....	99
CAPÍTULO IV.....	99
DISCUSIÓN DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	99
4.1. Discusión de Resultados.....	99
4.1.1. Cálculo del Caudal, el Tiempo y la Frecuencia de Extracción de Lodos mediante el Balance de Masa del Proceso de Coagulación-Floculación.....	99
4.1.2. Comparación de los Valores de la Carga Superficial, Porcentaje de Remoción de Sólidos, Velocidad de Sedimentación y Flujo Másico de Extracción de Lodos Operacionales con Respecto a los Valores de Diseño	106
4.1.3. Estudio de los Instrumentos para el Control del Nivel de Lodos así como el Desempeño de las Bombas del Sistema.....	113
4.1.4. Propuestas de Mejoras al Sistema de Recirculación y Extracción de Lodos en el Módulo Densadeg d-200.....	121
4.2. Conclusiones.....	127
4.3. Recomendaciones.....	128
BIBLIOGRAFÍA.....	131
METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO.....	134

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de los procesos de clarificación por sedimentación (Arboleda, 2000).	30
Tabla 2. Tipos de sedimentadores según el sentido del flujo (Arboleda, 2000).	31
Tabla 3. Velocidades de arrastre del lodo en tuberías de extracción (Arboleda, 2000).	44
Tabla 4. Caudales del proceso coagulación-floculación para el tiempo de estudio establecido.....	63
Tabla 5. Masas y volumen de las muestras para el cálculo de sólidos suspendidos de EBP-1 (agua cruda).	64
Tabla 6. Masas de las muestras para el cálculo de sólidos totales en la corriente de extracción de lodos.....	65
Tabla 7. Masa y volumen de lodo para la obtención de la densidad.....	66
Tabla 8. Densidades del lodo en distintos días y la densidad promedio.	67
Tabla 9. Sólidos suspendidos en las distintas corrientes del proceso coagulación-floculación para el tiempo de estudio establecido.....	68
Tabla 10. Alturas obtenidas por el cono de imhof para el cálculo de la velocidad de sedimentación en un tiempo determinado.....	78
Tabla 11. Válvulas y accesorios presentes en el sistema de extracción de lodos.	88
Tabla 12. Diagrama hidráulico de la bomba de recirculación de lodos BV-204A. ...	94
Tabla 13. Válvulas y accesorios presentes en el sistema de recirculación de lodos. .	97
Tabla 14. Caudales de extracción de lodos en el tiempo de estudio establecido.	99
Tabla 15. Tiempo de extracción de lodos de acuerdo al caudal de extracción obtenido.....	102
Tabla 16. Frecuencia de extracción de lodos para el tiempo de estudio establecido.	104

Tabla 17. Carga superficial obtenida en la unidad de sedimentación.	106
Tabla 18. Porcentaje de remoción de sólidos obtenidos en la unidad de sedimentación.....	108
Tabla 19. Velocidades de sedimentación manejadas en el proceso de la planta D-200.	110
Tabla 20. Flujos máxicos de extracción de lodos obtenidos en el módulo D-200, así como de diseño.....	112
Tabla 21. Cargas mínimas y máxicas del sistema hidráulico de la bomba de extracción de lodos BV-208B del módulo D-200 en un rango de caudales establecido a velocidad de 575 rpm.	114
Tabla 22. Carga de diseño del sistema hidráulico para la bomba de extracción de lodos BV-208B con respecto los caudales respectivos para una velocidad de 575 rpm.	115
Tabla 23. NPSH disponible y requerido para la bomba de extracción de lodos BV-208B a una velocidad de 575 rpm.....	116
Tabla 24. Cargas mínimas y máxicas del sistema hidráulico de la bomba de recirculación de lodos BV-204A del módulo D-200 en un rango de caudales establecido para una velocidad de 200 rpm.	118
Tabla 25. Carga de diseño del sistema hidráulico para la bomba de recirculación de lodos BV-204A con respecto a los caudales respectivos para una velocidad de 200 rpm.	118
Tabla 26. NPSH disponible y NPSH requerido para la bomba de recirculación de lodos BV-204A a velocidad de 200 rpm.....	120
Tabla 27. Cargas mínimas y máxicas del sistema hidráulico de la bomba de extracción de lodos BV-208B del módulo D-200 a velocidad de 150 rpm.	121
Tabla 28. Carga de diseño del sistema hidráulico de la bomba de extracción de lodos BV-208B con respecto a los caudales respectivos para una velocidad de 150 rpm.	122
Tabla 29. NPSH disponible y requerido para la bomba de extracción de lodos BV-208B a una velocidad de 150 rpm.....	123

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama esquemático del módulo D-200 (Pequiven y Veneagua, 1998).	26
Figura 2. Desarenador o sedimentador de flujo horizontal (Arboleda, 2000).	31
Figura 3. Decantadores con módulos o placas (Arboleda, 2000).	32
Figura 4. Sedimentador con manto de lodos (Arboleda, 2000).	32
Figura 5. Resultados de la sedimentación por lotes: (a) suspensión original uniforme, (b) zonas de precipitación después de un tiempo determinado, (c) compresión de la zona D después de que desaparecen las zonas B y C, (d) altura de la interfase del líquido claro z.	34
Figura 6. Diagrama del área de un sedimentador horizontal (Arboleda, 2000).	35
Figura 7. Tabla 2.3. Concentración de lodos sedimentados (Arboleda, 2000).	43
Figura 8. Nivel de succión encima de la línea de centro de la bomba (Kenneth, 1993).	52
Figura 9. Característica del sistema para una carga estática variable (Kenneth, 1993).	54
Figura 10. Diagrama de flujo para el balance de sólidos suspendidos en el módulo D-200.	70
Figura 11. Altura del sedimento en función del tiempo de sedimentación para el día 23/08/2010.	79
Figura 12. Control del nivel de lodos en el módulo D-200 (Pequiven y Veneagua, 1998).	82
Figura 13. Diagrama hidráulico de la bomba de extracción de lodos BV-208B.	84
Figura 14. Caudales de extracción de lodos obtenidos en el tiempo de estudio.	100
Figura 15. Caudales de extracción con respecto a los sólidos suspendidos en la corriente de extracción de lodos.	101

Figura 16. Tiempo de extracción en función de los caudales de extracción de lodos.	103
Figura 17. Frecuencia de extracción en función del caudal de extracción de lodos.	105
Figura 18. Cargas superficiales operacionales y de diseño del sistema.	107
Figura 19. Porcentajes de remoción de sólidos suspendidos para los días estudiados.	109
Figura 20. Velocidades de sedimentación operacionales y de diseño en el sedimentador del sistema.	111
Figura 21. Flujos máxicos operacionales y de diseño de la corriente de extracción de lodos.	113
Figura 22. Cargas mínima, máxima y de diseño del sistema hidráulico de extracción de lodos para una velocidad de 575 rpm.	116
Figura 23. NPSH disponible y requerido para la bomba de extracción de lodos BV- 208B a velocidad de 575 rpm.	117
Figura 24. Cargas mínima, máxima y de diseño del sistema hidráulico de recirculación de lodos a una velocidad de 200 rpm.	119
Figura 25. NPSH disponible y requerido para la bomba de recirculación de lodos BV-204A a velocidad de 200 rpm.	121
Figura 26. Cargas mínima, máxima y de diseño del sistema hidráulico de extracción de lodos a una velocidad de 150 rpm.	122
Figura 27. NPSH disponible y requerido para la bomba de extracción de lodos BV- 208B a velocidad de 150 rpm.	123
Figura 28. Componentes de un medidor capacitivo (Sapiens, 2010).....	124
Figura 29. Aplicación del medidor de nivel por radiación en el sistema de interfase agua-lodo (Inele, 2010)	126

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1. Descripción General de la Empresa

Pequiven, Petroquímica de Venezuela, S.A., es la corporación del estado venezolano encargada de producir y comercializar productos petroquímicos con prioridad hacia el mercado nacional y con capacidad de exportación. Fue creada en 1977 asumiendo las operaciones del Instituto Venezolano de Petroquímica (IVP) fundado en 1955. Desde su transformación, Pequiven ha vivido sucesivas etapas de reestructuración, consolidación y expansión, en la que ha ampliado su campo de operaciones, desarrollando un importante mercado interno y externo para sus productos. Para el desarrollo de sus actividades cuenta con tres complejos petroquímicos: Morón ubicado en el estado Carabobo, Ana María Campos en el estado Zulia y Complejo Industrial, Petrolero y Petroquímico José Antonio Anzoátegui en el estado Anzoátegui.

1.1.1. Ubicación Geográfica

La sede de Pequiven en el oriente del país forma parte del Complejo Industrial, Petrolero y Petroquímico General de División José Antonio Anzoátegui, el cual cuenta con una superficie de 740 hectáreas y está ubicado en la costa nororiental del país al oeste de la ciudad de Barcelona en el estado Anzoátegui, teniendo acceso al Mar Caribe.

1.1.2. Instalaciones y servicios

Pequiven actúa como condominio industrial de las empresas mixtas que operan en el área, mediante el suministro de los servicios básicos necesarios para su operación, contando con:

- Un muelle petroquímico: dos plataformas de líquidos, una plataforma de sólidos o granel y una plataforma de contenedores.

- Servicios industriales: energía, agua y gas.

- Servicios generales: servicio médicos, bomberos y seguridad.

1.2. Planteamiento del Problema

La planta de tratamiento de aguas procesa agua cruda proveniente del río Neverí y es tratada para obtener agua potable e industrial que abastece a las distintas instalaciones del complejo, mediante el desarrollo operacional de cuatro plantas de tratamiento: tres módulos de tecnología Densadeg, D-100, D-200 y D-300, respectivamente y una de tecnología Actiflo, M-600, de las cuales dos de ellas (D-300 y M-600) se encuentran completamente automatizadas y es posible controlar los procesos y perturbaciones desde la sala de control correspondiente. Sin embargo, el uso de herramientas estadísticas para el control de los procesos de tratamiento ha evidenciado problemas operacionales bajo condiciones manuales en las otras dos plantas restantes (D-100 y D-200).

El principio de funcionamiento de las plantas tipo Densadeg, se basa en la clarificación del agua por medio de la recirculación de lodos formados en la etapa coagulación-floculación, tomando en cuenta el nivel de turbidez del agua cruda. Es

decir, el agua cruda, inicialmente, pasa por una etapa de coagulación donde se desestabilizan los coloides que dan origen a la turbidez, luego en la floculación, se forman los llamados flóculos y posteriormente, existe un proceso de sedimentación donde éstos por aglomeración, generan una masa de lodo. Seguidamente, el agua pasa por una decantación y finalmente, a los lechos de filtrado.

De la parte inferior del espesador de lodos del Densadeg, se obtiene el caudal de lodo que se extrae del proceso y va a las lagunas de secado, y el que se recircula al proceso inyectándose directamente a la tubería de agua cruda, que conjuntamente con el floculante le da mayor peso a los flóculos para su posterior sedimentación. Para llevar a cabo esta recirculación y extracción de lodos, se cuenta con una sonda de alto nivel y una sonda de bajo nivel, las cuales miden el nivel de lodos en el espesador y dependiendo del mismo, envían una señal de arranque o parada a las bombas de recirculación y extracción respectivas.

Cabe resaltar que el caudal de lodo de recirculación debe ser regulado con la finalidad de mantener un 3% de lodos en el floculador tomando en cuenta también los lodos aportados por el agua cruda. Sin embargo, actualmente no se cumple ésta condición, debido a que las sondas de nivel en el espesador presentan fallas y por ende, no envían las señales adecuadas para el arranque y parada de las bombas del sistema de recirculación y extracción de lodos, generando así, la necesidad de operación manual de dicho sistema por parte de los operadores de la planta. Esta situación altera el porcentaje de recirculación y en consecuencia, las concentraciones y caudales de los distintos componentes presentes en el proceso, ya que puede existir un arrastre de flóculos, que provoca en ocasiones, un producto que no entra en especificación al presentar turbidez fuera del rango, afectando así la calidad del mismo, tanto para el agua potable como para la industrial.

Debido a lo antes expuesto, adquiere suficiente relevancia la realización de éste proyecto para evaluar el sistema de recirculación y extracción de lodos en el módulo D-200 de tecnología densadeg de la planta de tratamiento de agua cruda perteneciente a Pequiven y ubicada en el complejo industrial, petrolero y petroquímico General de División José Antonio Anzoátegui.

Para llevar a cabo el objetivo planteado, primeramente se calculó el caudal, tiempo y frecuencia de extracción de lodos mediante el balance de masa del proceso de coagulación-floculación. Una vez hecho el balance, se procedió a comparar los valores de la carga superficial, porcentaje de remoción de sólidos, velocidad de sedimentación y flujo másico de extracción de lodos operacionales con respecto a los valores de diseño. Seguidamente, se estudiaron los instrumentos que permiten el control del nivel de lodos y el desempeño de las bombas del sistema. Por último, se propusieron mejoras al sistema de recirculación y extracción de lodos en el módulo Densadeg D-200.

La evaluación de este sistema, permitirá realizar correcciones y mejorar el proceso de clarificación del agua cruda, ayudando así a la empresa en su desempeño técnico y obteniendo un producto dentro de las especificaciones de calidad requeridas.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Evaluar el sistema de recirculación y extracción de lodos en el módulo D-200 de tecnología densadeg de una planta de tratamiento de aguas perteneciente a Pequiven ubicada en el complejo petroquímico G/D José Antonio Anzoátegui.

1.3.2. Objetivos Específicos

1. Calcular el caudal, el tiempo y la frecuencia de extracción de lodos, mediante el balance de masa del proceso de coagulación-floculación.

2. Comparar los valores de la carga superficial, porcentaje de remoción de sólidos, velocidad de sedimentación y flujo másico de extracción de lodos operacionales con respecto a los valores de diseño.

3. Estudiar los instrumentos para el control del nivel de lodos así como el desempeño de las bombas del sistema.

4. Proponer mejoras al sistema de recirculación y extracción de lodos en el módulo Densadeg D-200.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Antecedentes

La Rosa evaluó el sistema de bombeo de agua de lavado de la unidad de craqueo catalítico fluidizado de la refinería de Puerto La Cruz, mediante un diagnóstico de las fallas del sistema y posteriormente, hizo un estudio hidráulico del mismo aplicando el teorema de Bernoulli una vez hecho el levantamiento isométrico de las tuberías y por último, presentó distintas mejoras (La Rosa, 2009).

Guarimata evaluó técnica y económicamente el uso de coagulantes y floculantes en un planta de tratamiento de aguas servidas, por medio de la aplicación de pruebas de jarras y análisis de laboratorios para obtener las dosis necesarias, así como también hizo el estudio hidráulico de las bombas que componen el sistema a través de un balance mecánico (Guarimata, 2002).

Pino, por su parte evaluó la influencia de la aplicación de coagulantes primarios en las operaciones unitarias de las plantas de potabilización El Rincón y José Antonio Anzoátegui, para lo cual realizó un estudio de la calidad fisicoquímica de los coagulantes, del agua tratada con éstas sustancias, de la eficiencia de las unidades del proceso, costo y consumo de coagulantes y por último, la acción bacteriológica de estos químicos en la calidad del agua tratada (Pino, 2003).

Ríos realizó una evaluación hidráulica del sistema de succión de las bombas booster, con el fin de determinar la posibilidad de interconectar la corriente de agua proveniente del sistema de agua efluentes norte, SAEN a las bombas booster P-1212

y P-1214 de la planta de inyección de agua para recuperación secundaria de oriente, PIA RESOR. Para esto calculó las caídas de presión y velocidades de flujo a lo largo del sistema de tuberías, llevando cabo la evaluación del sistema bajo condiciones operacionales y por último hizo la evaluación del sistema incluyendo la propuesta de interconexión (Ríos, 2005).

Los trabajos de Guarimata (2002) y Pino (2003) citadas anteriormente sirvieron de soporte para comprender y analizar mejor la formación de lodos producidos en el tratamiento de agua por medio del uso de coagulantes y floculantes, así como la remoción de la turbidez en el proceso unitario de sedimentación. Mientras que todos los antecedentes citados, a excepción del trabajo de Pino (2003) ayudaron con el estudio hidráulico que se aplicó en esta investigación como parte de la evaluación del sistema de recirculación y extracción de lodos de una planta de tratamiento de agua.

2.2. El Agua: un Disolvente Universal

El agua es el constituyente más importante del organismo humano y del mundo. Tiene una gran influencia en los procesos bioquímicos que ocurren en la naturaleza. Esta influencia no sólo se debe a sus propiedades fisicoquímicas como molécula bipolar sino también a los constituyentes orgánicos e inorgánicos que se encuentran en ella. Se considera que el agua es un solvente universal, debido a que es capaz de disolver o dispersar la mayoría de sustancias con las que tiene contacto, sean estas sólidas, líquidas o gaseosas, y de formar con ellas iones, complejos solubles e insolubles, coloides o simplemente partículas dispersas de diferente tamaño y peso (Barrenechea, De Vargas y Maldonado, s.f).

2.2.1. Calidad del Agua

El término *calidad del agua* es relativo y sólo tiene importancia universal si está relacionado con el uso del recurso. Esto quiere decir que una fuente de agua suficientemente limpia que permita la vida de los peces puede no ser apta para la natación y un agua útil para el consumo humano puede resultar inadecuada para la industria. Dada la necesidad de cuantificar éste término, se expresa para cada uso, en función de sus características físicas, químicas y biológicas.

Bajo estas consideraciones, se dice que un agua está contaminada cuando sufre cambios que afectan su uso real o potencial, así como la *turbidez* que pueda presentar, la cual es originada por las partículas en suspensión o coloides (arcillas, limo, tierra finamente dividida, etc.), es decir, aquellas que por su tamaño se encuentran suspendidas y reducen la transparencia del agua en mayor o menor grado. La medición de la turbidez, se realiza mediante un turbidímetro o nefelómetro, las unidades utilizadas son, por lo general, unidades nefelométricas de turbidez -UNT, a efectos prácticos, NTU por sus siglas en inglés-.

En la práctica, la remoción de la turbidez no es un proceso difícil de llevar a cabo en una planta de clarificación de agua; sin embargo es uno de los que más influye en los costos de producción, porque, por lo general, requiere usar coagulantes, ayudantes de coagulación, polímeros floculantes, entre otros químicos. Aunque no se conocen los efectos de la turbidez sobre la salud, ésta afecta la calidad estética del agua, lo que muchas veces, ocasiona el rechazo por parte de los consumidores. Mediante los procesos de coagulación, floculación y sedimentación, se pueden alcanzar un nivel menor a 5 NTU y con una filtración adecuada, se puede obtener un agua clarificada hasta con menos de 1 NTU (Barrenechea, De Vargas y Maldonado, s.f.).

2.2.2 Sólidos y Residuos Presentes en el Agua

Se denomina así a los residuos que se obtienen como materia remanente luego de evaporar y secar una muestra de agua a una temperatura dada. Según el tipo de asociación con el agua, los sólidos pueden encontrarse suspendidos o disueltos, sin embargo, la suma de ambos, da como resultado los *sólidos totales* y se determina a 103-105°C, teniendo así que (Barrenechea, De Vargas y Maldonado, s.f.):

- Sólidos disueltos o residuos disueltos. Mejor conocidos como sólidos filtrables, son los que se obtienen después de una muestra, previamente, filtrada. Comprende sólidos en solución verdadera y sólidos en estado coloidal, no retenidos en la filtración, ambos con partículas inferiores a un micrómetro (1µm).

- Sólidos en suspensión. Corresponden a los sólidos presentes en un agua residual, exceptuados los solubles y los sólidos en fino estado coloidal. Se considera que los sólidos en suspensión son los que tienen partículas superiores a un micrómetro y que son retenidos mediante una filtración en el análisis del laboratorio.

- Sólidos volátiles y fijos. Los sólidos volátiles son aquellos que se obtienen por calcinación a 550°C, mientras que el material remanente, se define como sólidos fijos. La mayor parte de los sólidos volátiles corresponden al material orgánico. Los sólidos fijos corresponden, más bien, a material inorgánico.

- Por otra parte, las partículas pueden estar:

- Disueltas (hasta un milimicrómetro), en cuyo caso, físicamente, no influirán en la turbidez, pero sí podrían definir su color u olor.

- Formando sistemas coloidales (1 a 1.000 milimicrómetros), que son los causantes de la turbidez neta del agua.

- En forma de partículas suspendidas (por encima de 1.000 milimicrómetros), las cuales caen rápidamente, cuando el agua se somete a reposo.

2.3. Descripción del Proceso

El agua cruda que alimenta la planta de tratamiento proviene del río Neverí, la tubería de aducción tiene un diámetro de 30 pulgadas y una longitud de alrededor de 31.350 metros, desde el sitio de captación en la toma de "Los Montones", hasta la planta de tratamiento, ubicada dentro de los terrenos del "Complejo Industrial, Petrolero y Petroquímico G/D José Antonio Anzoátegui". La planta tiene una capacidad de producción de 1.600 litros por segundo, resultado de la operación de cuatro módulos.

En el módulo densadeg D-200, el agua cruda, previamente clorada, ingresa a la planta, a través de una tubería, en la cual es acondicionada químicamente por medio de la adición en línea de un coagulante orgánico y un coagulante mineral (sulfato de aluminio líquido), los cuales ocasionan una neutralización de las cargas eléctricas generalmente negativas, asociadas a la superficie de las partículas coloidales en suspensión presentes en el agua. Una vez pasado el proceso de coagulación, el agua ingresa al compartimiento de mezcla del clarificador-espesador (D-200), donde con la ayuda de un agitador (turbina de floculación HM-202), se mezclan el agua cruda coagulada, un polímero floculante y parte de los lodos formados y decantados que son recirculados a la entrada de la unidad, con lo cual se acelera el proceso de floculación.

Seguidamente, los flóculos pasan por gravedad desde el reactor pistón al compartimiento de clarificación en donde éstos precipitan por su propio peso. En este compartimiento se llevan a cabo los procesos de decantación y espesamiento de lodos (figura 2.1); donde el agua clarificada desborda, superficialmente, por los vertederos del decantador, mientras que los flóculos decantados van al fondo y son concentrados con el cabezal de accionamiento EL-203 (espesador de lodos) formando un lodo espeso.

Los micro-flóculos son separados gracias a la ayuda de un compartimiento de módulos plásticos lamelares, los cuales consisten en una serie de placas inclinadas a 60° , unidas entre sí, formando canales de sección hexagonal de un diámetro pequeño; al fluir el agua a través de ellos, en forma ascendente, a muy baja velocidad, se anula cualquier turbulencia, y da la oportunidad a que los micro-flóculos que no hayan floculado queden retenidos allí y se deslicen hacia el fondo, gracias a la pendiente de las placas.

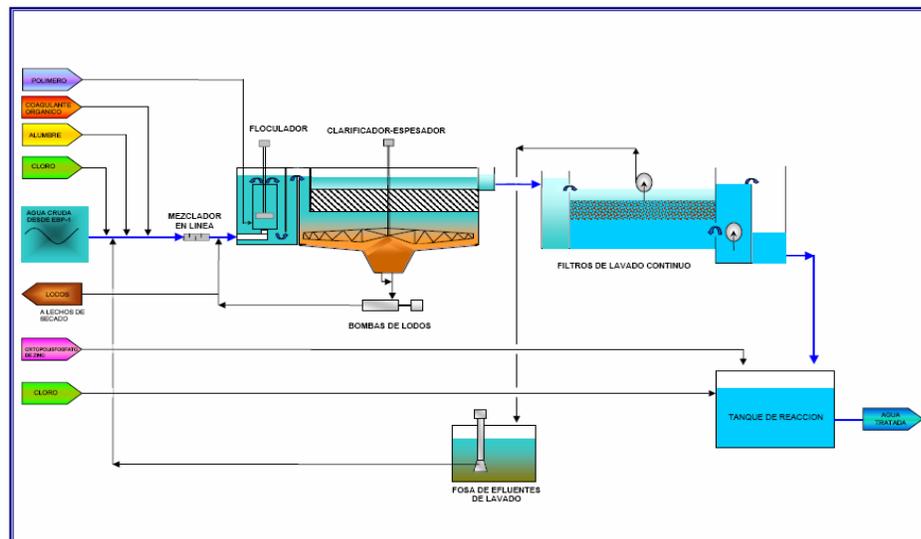


Figura 1. Diagrama esquemático del módulo D-200 (Pequiven y Veneagua, 1998)

Parte de los lodos espesados son extraídos de manera automática del clarificador-espesador y son enviados a las lagunas de secado. El resto de los lodos son recirculados continuamente al clarificador-espesador para mantener una concentración adecuada de sólidos en suspensión dentro del compartimiento de floculación. El proceso de extracción de lodos y de recirculación se lleva a cabo con las bombas de cavidad progresiva BV-208A/B y BV-204A/B, respectivamente.

El agua clarificada procedente de la unidad de clarificación-espesamiento (D-200) ingresa por gravedad al sistema de filtración, conformado por dos filtros de arena (F-601A/B), tipo lavado continuo en el clarificador-espesador. En la filtración las trazas de partículas son retenidas en el seno del lecho de arena, el cual las atrapa dentro de los intersticios vacíos, formando de esta manera una torta, que será retirada posteriormente en una operación de lavado.

El agua filtrada es conducida hacia el tanque de reacción (TKC-C) en donde se pone en contacto con cloro y con un inhibidor de corrosión (ortopolifosfato de zinc) como parte final del tratamiento, debido al prolongado tiempo de permanencia del agua en los estanques de almacenamiento (lagunas) ubicados a ambos lados del sistema de bombeo (EBP-1) de la planta de tratamiento de aguas crudas y dado a su tamaño, y a las condiciones ambientales existentes, estas aguas son susceptibles de contaminación por el crecimiento acelerado de microorganismos unicelulares y multicelulares, particularmente algas. Estas deben ser controladas porque pueden establecer su hábitat, también en los equipos de la planta de tratamiento y en las instalaciones del complejo, produciendo una serie de trastornos en los equipos de proceso.

Una vez aplicadas las dosis de cloro y el inhibidor de corrosión, el agua es llevada a través de un sistema de bombeo (EBP-2) desde el tanque de reacción (TKC-C) hasta los tanques de almacenamiento de aguas industriales (TQ-101, TQ-102 y

TQ-104) y el tanque de almacenamiento de agua potable (TQ-103) y de estos tanques es succionada por un tercer sistema de bombeo (EBP-3) para ser distribuida a las empresas mixtas y las distintas áreas de Pequiven (Pequiven y Veneagua, 1998).

2.4. Operaciones Unitarias del Tratamiento de Agua

2.4.1. Coagulación-Floculación

Es un proceso complejo que consiste en la desestabilización y posterior agrupamiento de partículas, que debido a sus características no podrían sedimentar por su propio peso y requerirían tiempos excesivamente largos para su decantación, o por su tamaño no sería factible separarlas por filtración, por ello la finalidad es aumentar el peso de dichas partículas y facilitar su asentamiento (Universidad Central de Venezuela, s.f).

En el proceso se distinguen dos etapas: en la primera, mediante la adición de un coagulante químico, se desestabilizan las partículas coloidales productoras de turbidez, llevándose a cabo en una unidad de tratamiento denominada *mezcla rápida*, la cual proporciona condiciones de intensidad de agitación y tiempo de retención que debe reunir la masa de agua en el momento en que se dosifica el coagulante, con la finalidad de que las reacciones de coagulación se den en las condiciones óptimas correspondientes al mecanismo de coagulación predominante (Arboleda, 2000).

En la segunda, por medio de un floculante en una unidad de *mezcla lenta* provista de un agitador, se promueve el acercamiento entre las partículas desestabilizadas para que se aglomeren, aumenten de tamaño y peso, formándose así los llamados flóculos y puedan decantar posteriormente en las unidades de clarificación (Universidad Central de Venezuela; Arboleda, 2000).

La remoción de las partículas coloidales está relacionada estrictamente con una buena coagulación, pues de ella depende la eficiencia de las siguientes etapas: floculación, sedimentación y filtración. La coagulación está, fundamentalmente, en función de las características del agua y de las partículas presentes, las mismas que definen el valor de los parámetros conocidos como: pH, alcalinidad, color verdadero, turbidez, temperatura, potencial Z, fuerza iónica, sólidos totales disueltos, tamaño y distribución de tamaños de las partículas en estado coloidal y en suspensión, entre otros (Barrenechea, De Vargas y Maldonado, s.f).

2.4.2. Sedimentación

Una vez floculada el agua, el problema radica en separar los sólidos del líquido, es decir las partículas coaguladas, del medio en el cual están suspendidas. Esto se puede conseguir dejando sedimentar el agua o filtrándola, o ejecutando ambos procesos consecutivamente que es lo común. La sedimentación y la filtración, por tanto, deben considerarse como procesos complementarios. La sedimentación realiza la separación de los sólidos más densos que el agua y que tienen una velocidad de caída tal que pueden llegar al fondo del tanque sedimentador en un tiempo económicamente aceptable. La filtración, en cambio, separa aquellos sólidos que tienen una densidad muy cercana a la del agua, o que han sido resuspendidos por cualquier causa en el flujo, y que por lo tanto no quedan removidos en el proceso anterior (Arboleda, 2000).

Se entiende por sedimentación a aquellos fenómenos mediante los cuales los sólidos en suspensión en un fluido son separados del mismo, debido al efecto de la gravedad. En un sentido amplio el término sedimentación comprende un grupo de acciones diferentes según el tipo y concentración de sólidos o partículas en suspensión, los que se resumen en los modelos indicados en la tabla 2.1.

Tabla 1. Clasificación de los procesos de clarificación por sedimentación (Arboleda, 2000).

Tipo de clarificación por sedimentación	Características de los sólidos en suspensión	Descripción del proceso	Ejemplos
1	Partículas discretas y aisladas en soluciones diluidas	No hay interacción entre las partículas y entre las partículas y el resto del fluido	Movimiento de sedimentación de partículas en desarenadores o presedimentación
2	Partículas aglomerables en soluciones relativamente diluidas	Las partículas interfieren entre sí en su descenso manteniendo posiciones estables	Sedimentación de los flóculos en decantadores horizontales o de placas
3	Soluciones de concentración intermedia	Las partículas interfieren entre sí en su descenso manteniendo posiciones estables	Deposición de lodos en decantadores de flujo ascendente
4	Soluciones de alta concentración	Se forma una estructura entre las partículas que va modificándose lentamente con el tiempo	Compactación de depósitos de lodos

Cabe destacar que para el modelo de clarificación tipo 1, los sólidos o partículas son idealizadas como discretas y aisladas, es decir, no cambian de densidad, tamaño o forma al descender en el líquido. En cambio, en el modelo de clarificación tipo 2, los sólidos o partículas son pensadas como aglomerables y al descender se adhieren o aglutinan entre sí cambiando de tamaño, forma y peso específico durante la caída. En la clarificación tipo 3 y tipo 4 es el comportamiento conjunto de los sólidos lo que se analiza, debido a las interferencias mutuas entre las partículas que hace que éstas formen un manto de lodos que flota en el líquido.

Al respecto, Camp considera que cuando la concentración volumétrica de sólidos excede en un 0,5% (5.000 ppm) en volumen se presenta una reducción de velocidad de asentamiento, produciéndose una sedimentación que se ha dado en denominar “autointerferida” y que responde al modelo de clarificación tipo 3; “según McNown y Pin-Nan-Lin, las velocidades de asentamiento en suspensiones de 1.000 ppm pueden disminuir hasta en un 13%; en las de concentraciones de 10.000 ppm hasta en un 25%” (Arboleda, 2000).

No parece, sin embargo, que pueda establecerse, “según Bond una definición precisa para caracterizar el inicio de la interferencia ya que ésta depende de las características de la suspensión”. Los tipos de sedimentadores, clasificados según el sentido del flujo (figuras 2.2, 2.3 y 2.4), utilizados en las unidades de decantación y el tipo de clarificación que se genera se resumen en la tabla 2.2.

Tabla 2. Tipos de sedimentadores según el sentido del flujo (Arboleda, 2000).

Sentido del flujo	Tipo de sedimentación	Ejemplo	Rata de flujo (m ³ /m ² .d)
Horizontal	1 y 2	Desarenadores	200 - 420
			15 - 30
Vertical	2 y 3	Manto de lodos	45 - 60
Inclinado	1 y 2	Decantadores con módulos o placas	120 - 180

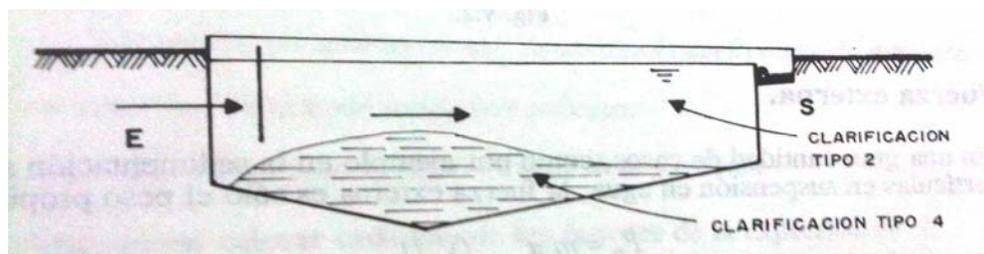


Figura 2. Desarenador o sedimentador de flujo horizontal (Arboleda, 2000).

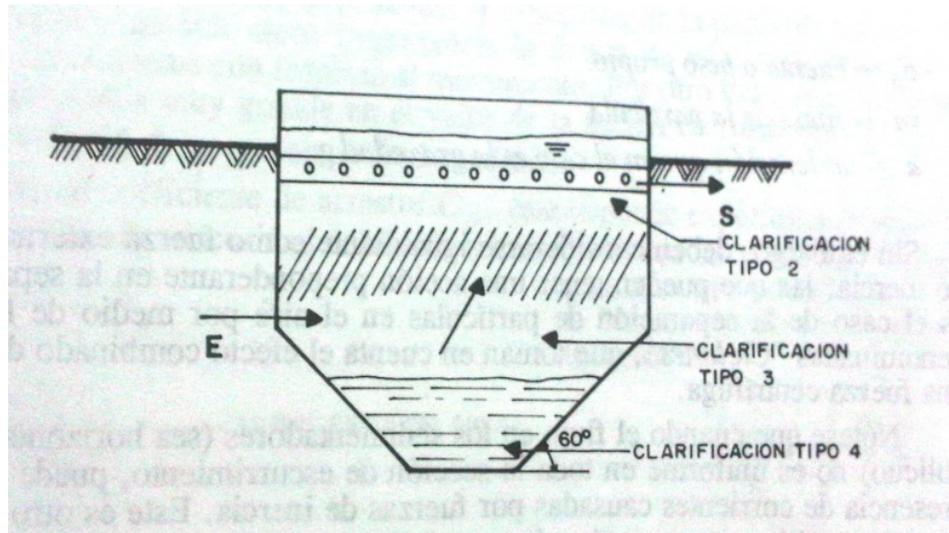


Figura 3. Decantadores con módulos o placas (Arboleda, 2000).

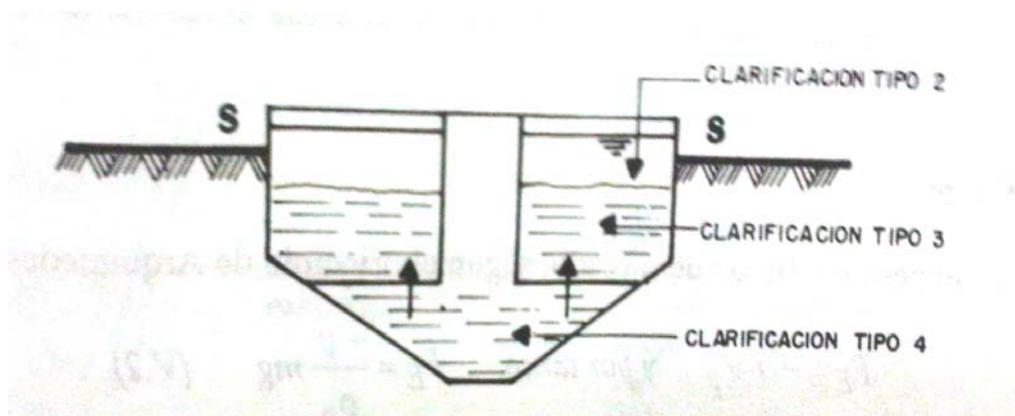


Figura 4. Sedimentador con manto de lodos (Arboleda, 2000).

2.4.2.1. Sedimentación convencional modelo Hazen y Camp

Antes de desarrollar la metodología de diseño de sedimentadores de flujo horizontal es conveniente introducir un modelo teórico que describa el funcionamiento de un sedimentador con clarificación tipo 1 ya que ayuda a definir

conceptos y establecer parámetros que son, como se verá más adelante, aplicables también al caso de partículas aglomerables. El modelo desarrollado por Hazen en 1904 y luego retomado por Camp, lo definió como “*el decantador hipotético en el cual, la sedimentación se realiza exactamente en la misma manera que un recipiente de igual profundidad que contenga un líquido en reposo*”. El modelo responde a las siguientes características (Arboleda, 2000):

1. Se identifican en el tanque de sedimentación cuatro zonas independientes: entrada, salida, sedimentación y retención de partículas sedimentadas.
2. Hay una distribución uniforme de partículas en la entrada. La concentración de partículas de cada tamaño es por lo tanto la misma en todos los puntos de la sección transversal de entrada.
3. En la zona de sedimentación la dirección del flujo es horizontal y la velocidad es la misma en todos los puntos, por lo que responde a un modelo de flujo tipo pistón.
4. Toda partícula que entra a la zona de lodos queda atrapada y se considera removida.
5. Las partículas, aún siendo de diferentes tamaños, se comportan como partículas discretas y aisladas en la zona de sedimentación, es decir, se produce clarificación tipo 1.

El comportamiento de partículas de diferentes velocidades de sedimentación corresponde a trayectorias rectas en la zona de sedimentación debido a la composición de los dos movimientos: el de desplazamiento con el fluido de velocidad y el de sedimentación respecto al fluido de velocidad (Arboleda, 2000).

2.4.2.2. Determinación de la Velocidad de Sedimentación

En la figura 2.5, se grafica la altura z de la interfase de líquido claro en función del tiempo. Como se muestra, la velocidad de sedimentación, que es la pendiente de la línea, es constante al principio. El punto crítico se encuentra en el punto C . Como los sedimentos se forman a velocidades muy diferentes, se necesita encontrar experimentalmente la velocidad de sedimentación de cada sedimento. Kynch y Fitch describen un método a partir de la prueba de precipitación por lotes (Geankoplis, 1998).

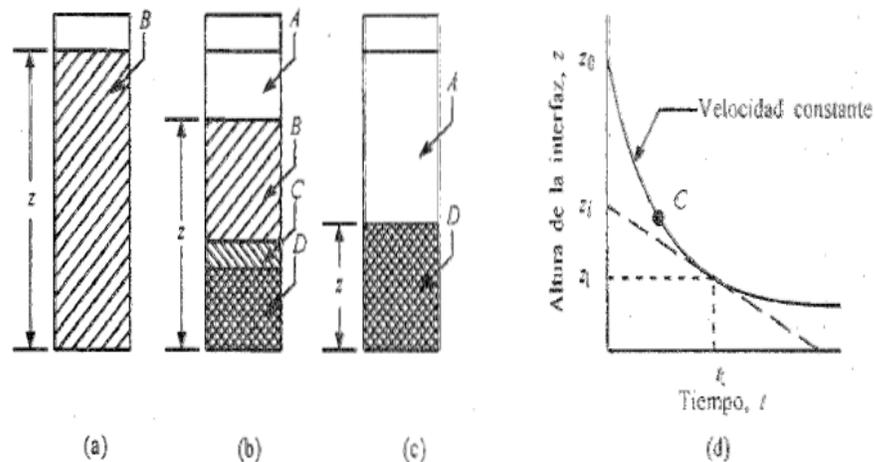


Figura 5. Resultados de la sedimentación por lotes: (a) suspensión original uniforme, (b) zonas de precipitación después de un tiempo determinado, (c) compresión de la zona D después de que desaparecen las zonas B y C , (d) altura de la interfase del líquido claro z

La velocidad de sedimentación v se determina trazando una tangente a la curva de la figura 2.5 en un tiempo dado t_1 y la pendiente es $-dt/dz = v_i$. En este punto la

altura es z_1 y z_i es la intersección de la tangente a la curva, entonces la ecuación para el cálculo de la velocidad de sedimentación resulta (Geankoplis, 1998):

$$v_s = \frac{z_i - z_1}{t_1 - 0} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Donde:

v_s = velocidad de sedimentación (cm/min)

z_i = altura dada por la intersección de la tangente trazada con el eje de las abscisas (cm)

z_1 = altura dada por el punto donde la tangente corta a la curva de velocidad (cm)

t_1 = tiempo dado por el punto donde la tangente corta a la curva de velocidad (min)

2.4.2.3. Carga Superficial

El sedimentador ideal se diseña para eliminar el 100% de partículas que tengan una determinada velocidad de sedimentación crítica o mayor, que son las que estando en las posiciones extremas de la zona de sedimentación (a-a) son retenidas en las posiciones extremas de la zona de lodos (b-b). La figura 2.6 muestra el área de un sedimentador horizontal (Arboleda, 2000):

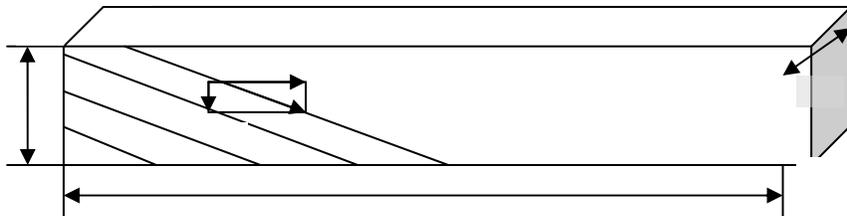


Figura 6. Diagrama del área de un sedimentador horizontal (Arboleda, 2000).

La velocidad del flujo viene dada por:

$$V_F = \frac{Q}{B \cdot H} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Donde:

V_F = Velocidad de flujo (m/h)

Q = flujo del sedimentador (m^3/h)

B = base del sedimentador (m)

H = altura del sedimentador (m)

De la semejanza de triángulos formados por H y L y por el diagrama vectorial de velocidades, se tiene:

$$\frac{V_{SC}}{V_F} = \frac{H}{L}$$

$$C_S = V_{SC} \cdot V_F = \frac{H}{L} = \frac{Q}{BHL} = \frac{Q}{BL} = \frac{Q}{A_S} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

Donde:

V_{SC} = velocidad crítica de sedimentación (m/h)

L = longitud del sedimentador (m)

A_S = área superficial del sedimentador (m^2)

C_S = carga superficial ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)

Al cociente Q/A_s que tiene esencialmente dimensiones de velocidad se le denomina *carga superficial* y se expresa en:

$$\frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{día}} \quad \text{ó} \quad \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$$

Se puede deducir que, de acuerdo a este modelo, todo conjunto de partículas de velocidad de sedimentación igual o mayor que la velocidad crítica de sedimentación quedará retenido con una eficiencia del 100% y todo conjunto de partículas de velocidad de sedimentación menor que la carga superficial será retenido en forma parcial.

Como puede verse en la expresión anterior, la velocidad de sedimentación de las partículas que son removidas en un 100% en el sedimentador ideal es sólo función del flujo y del área superficial de la zona de sedimentación del tanque, es decir, de la carga superficial. No es función de la altura del tanque ni del tiempo de retención. En palabras de Hazen, se ha demostrado que “la proporción de sedimento removido es función del área del decantador y de la cantidad de agua tratada por unidad de tiempo (caudal) y es completamente independiente de la profundidad del sedimentador” (Arboleda, 2000).

La *carga superficial* no es sino la velocidad crítica mínima de sedimentación Q/A , que se espera que en promedio tenga un cierto porcentaje (70-98%) de partículas de la suspensión y depende de:

- Calidad del agua (si predomina el color o la turbidez).
- Peso y grado de hidratación del flóculo.

- Forma y tipo de sedimentador que se adopte.
- Cuidado en el control del proceso.
- Coagulantes que se usen (sales de aluminio o de hierro, con o sin polielectrolitos).
- Grado de eficiencia que se desee.

Según Azevedo Netto (1972), los flóculos de sulfato de aluminio sedimentan con una velocidad comprendida entre 0,015 y 0,070 cm/s (entre 13 y 60 m/día). Por lo tanto, podría concluirse que la carga superficial debería variar entre 13 y 60 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ (Arboleda, 2000).

2.4.3. Filtración

En general, es la operación final de clarificación que se realiza en una planta de tratamiento de agua y, por consiguiente, es la responsable principal de la producción de agua de calidad coincidente con los estándares de potabilidad. El avance logrado por la técnica de filtración es el resultado de un esfuerzo conjunto dirigido a lograr que la teoría exprese los resultados de las investigaciones experimentales, de tal modo que sea posible prever, en el diseño, cómo va a operar la unidad de filtración en la práctica.

Como las fuerzas que mantienen a las partículas removidas en suspensión adheridas a las superficies de los granos del medio filtrante son activas para distancias relativamente pequeñas (algunos ángstroms), la filtración es usualmente considerada como resultado de dos mecanismos distintos pero complementarios: transporte y adherencia. Inicialmente, las partículas por remover son transportadas de la

suspensión a la superficie de los granos del medio filtrante. Ellas permanecen adheridas a los granos, siempre que resistan la acción de las fuerzas de cizallamiento debidas a las acciones hidrodinámicas del escurrimiento.

El transporte de partículas es un fenómeno físico e hidráulico, afectado principalmente por los parámetros que gobiernan la transferencia de masa. La adherencia entre partículas y granos es básicamente un fenómeno de acción superficial, que es influenciado por parámetros físicos y químicos. Los mecanismos que pueden realizar transporte son los siguientes:

- Cernido.
- Sedimentación.
- Intercepción.
- Difusión.
- Impacto inercial.
- Acción hidrodinámica.
- Mecanismos de transporte combinados.

Mientras que los mecanismos de adherencias son los siguientes:

- Fuerzas de Van Der Waals.

- Fuerzas electroquímicas.

- Puente químico.

Cuál de estos mecanismos es el que controla el proceso de filtración ha sido asunto de largos debates. Es indudable que no todos necesariamente tienen que actuar al mismo tiempo y que, en algunos casos, la contribución de uno o varios de ellos para retener el material suspendido es quizás mínima. Pero hay que tener en cuenta que dada la complejidad del fenómeno, más de un mecanismo deberá entrar en acción para transportar los diferentes tamaños de partículas a la superficie de los granos del medio filtrante y adherirlas (Barrenechea, De Vargas y Maldonado, s.f.).

2.5. Espesamiento de Lodos

En el tratamiento de agua cruda, los sólidos en suspensión y algunos otros disueltos en dicha agua, junto con los residuos de los coagulantes y otros reactivos empleados en el tratamiento, son separados, quedando residuos de distintas naturalezas, que, en un tratamiento convencional, pueden ser los siguientes:

- Residuos de la coagulación-floculación generados, principalmente en los decantadores y en los filtros.

- Residuos de posibles procesos de ablandamiento.

- Residuos de la eliminación de hierro, manganeso y del empleo de permanganato potásico.

- Residuo de carbón activo (si se emplea carbón en polvo en el proceso de potabilización).

Los lodos que se originan en las plantas de tratamiento de agua cruda, se extraen a través de la purga de los decantadores, donde, generalmente, precipitan por gravedad y los del lavado de los filtros que son considerados poco concentrados. También se conocen, dadas sus características como “lodos de hidróxido”, ya que el hidróxido de aluminio es uno de sus componentes principales. El valor de las concentraciones depende de varios factores, como son, en primer lugar las características de agua cruda (turbidez, color, materia orgánica, metales como hierro y manganeso), dosis de coagulante y otros reactivos empleados, características y tipos de decantadores.

Respecto a las características químicas de los lodos, cabe destacar que la composición química, por precisa que sea, no da una suficiente especificación de las características fisicoquímicas de los sólidos en suspensión. Por ejemplo, la granulometría o tamaño de las partículas, superficie, carga electrostática, y la fuerza de capilaridad que retienen el agua, son factores importantes para determinar el tratamiento a aplicar a un lodo (Ramírez, 2008).

2.5.1. Manejo de Lodos

Uno de los aspectos más críticos en la operación de plantas de tratamiento es el manejo de lodos producidos en los procesos de sedimentación y filtración, según sean provenientes de coagulación con sulfato de aluminio, o de compuestos férricos, para remoción de color o de turbidez, ya que tanto sus características fisicoquímicas como sus volúmenes son distintos en cada caso. Los lodos que se producen en los sedimentadores constituyen entre el 60 y el 70% de los sólidos totales y en los filtros

entre el 30 y el 40%. Los polielectrolitos tienden a reducir el volumen de esos lodos, los cuales pueden extraerse de dos formas:

- En forma periódica, por llenado y vaciado.

- En forma continua.

- Debe además distinguirse entre:
 - Los lodos líquidos que involucran el agua de arrastre.

 - Los lodos concentrados a los que se les ha sacado, por sedimentación u otro método similar, buena parte del agua de arrastre.

 - Los lodos semisolidificados que son los mismos concentrados pero a los que se les ha extraído aún más la humedad, al punto de dejarlos manejables y transportables en estado semisólidos en filtros prensa.

El volumen de los primeros puede estimarse así: los sedimentadores producen entre el 2 y el 4% del caudal que procesan y los filtros entre el 1 y el 2%. En total el flujo de lodos de una planta no debe ser mayor, en promedio del 5% pero hay casos en que es mayor. Esto quiere decir que por cada m^3/s que se procesa podría estimarse un flujo de lodos líquidos de $0,05 \text{ m}^3/\text{s}$, es decir, de $4.320 \text{ m}^3/\text{d}$ lo que es relativamente alto aceptando que $0,05$ del caudal es el valor del lodo líquido.

Este volumen se concentra en el fondo de los decantadores cuando se usa el sistema de vaciado y llenado periódico; o en concentradores especiales, provistos de lentas paletas, que giran para romper los puentes entre partículas y permitir así que el lodo se compacte en la base del tanque, mientras el agua sobrenadante es extraída por

arriba. La concentración del lodo permite reducir su volumen del 3 al 25% y en la tabla 2.3 se muestran las distintas concentraciones de acuerdo al tipo de lodo (Arboleda, 2000).

Figura 7. Tabla 2.3. Concentración de lodos sedimentados (Arboleda, 2000).

Tipo de lodo	Concentración
Lodos de sedimentación con coagulación de sulfato de aluminio	3,1 a 7,8%
Lodos de sedimentación con coagulación de hierro	12,2 a 21,1 %
Lavado con coagulación de aluminio y cal	3,96 a 10,1%
Lavado con coagulación de hierro y cal	4,62%
Lavado con coagulación de hierro solo	4,62 a 8,95%
Lavado con coagulación de catfloc	11,3%
Lodos de ablandamiento	15,2 a 25,3%

2.5.2. Extracción Periódica

Es el sistema más tradicional que consiste en llenar los sedimentadores y dejarlos trabajar durante un período que puede variar entre 15 días y uno o varios meses, según sea la turbidez del agua cruda durante ese período, la dosis y tipo de coagulantes y el volumen muerto dejado en el tanque para almacenamiento de fangos. Éste suele, de forma empírica, especificarse que sea del 10 al 20% del volumen total del tanque para decantadores de flujo horizontal y hay que tener en cuenta que los lodos no se depositan uniformemente en toda el área del tanque, especialmente en dichos decantadores.

Es por esto que colocan bocas de desagües en la mitad del primer tercio y/o se adicionan una o dos series de tolvas con pendientes de 60° en esa parte para poder facilitar la limpieza y espaciar el vaciado, abriendo periódicamente la válvula de

drenaje, a fin de disminuir la altura de los fangos acumulados en ese sitio por medio de mangueras de alta presión conectadas a las bocas de desagües (Arboleda, 2000).

2.5.3. Velocidades Mínimas de Arrastre de Tuberías de Extracción

Durante los trabajos realizados por López y colaboradores (1981) uno de los puntos investigados fue la velocidad de arrastre mínima que debería dejarse en las tuberías de aspiración de lodos para garantizar el correcto funcionamiento de las mismas. En la tabla 2.4 se puede observar que la velocidad mínima (para lodos sin arena ni polielectrolito) es de 0,30 m/s y la más alta es de 1,00 m/s para lodos con arena y polielectrolito. Estas velocidades son menores para partículas floculentas sin compactar o que han sido suspendidas por turbulencia hidráulica o mecánica durante la succión (Arboleda, 2000).

Tabla 3. Velocidades de arrastre del lodo en tuberías de extracción (Arboleda, 2000).

Tipo de sedimento	Coagulante usado	Tiempo de sedimentación	Rango de velocidades (m/s)
Arcilloso	Sulfato de aluminio	6 horas o menos	0,25 – 0,35
		24 horas	0,50 – 0,65
		48 horas o más	0,60 – 0,65
Arcilloso	Sulfato y polielectrolitos	12 horas o menos	0,45 – 0,55
		24 horas	0,55 – 0,66
		48 horas o más	0,60 – 0,65
Arcilloso – arenoso (20% arena, 80% arcilla)	Sulfato de aluminio	24 horas	0,85 – 0,95
		48 horas o más	0,85 – 0,95
Arcilloso – arenoso (20% arena, 80% arcilla)	Alumbre y polielectrolito	24 horas	0,85 – 0,95
		48 horas o más	0,90 – 1,00

2.5.4. Efecto de la recirculación de lodos sobre la remoción de la turbidez del agua cruda

En los clarificadores donde existe una recirculación de lodos que sale de la base de la zona de sedimentación hacia el centro de la zona de reacción, se obtiene una cantidad de lodos en la zona de mezcla rápida que sirven de semilla para la floculación inicial. La principal ventaja de este diseño es que es independiente tanto del caudal de agua cruda como del nivel de la capa de lodos (Lipessa, 1998).

2.6. Balance de Masa

Los cálculos de balance se basan en los principios de conservación de la materia y la energía y sirven para determinar los flujos, composiciones y temperaturas de todas las corrientes en un diagrama de flujo, contando con información específica o supuesta sobre el funcionamiento de algunos equipos de proceso o las propiedades de algunas corrientes. Debido a que la información de las corrientes de entrada y corrientes deseadas de salida es indispensable para cada pieza del equipo, resulta lógico afirmar que los cálculos de balance son de gran importancia en el diseño o el análisis de un sistema ya existente.

De igual manera, dado que es poco práctico medir todas las corrientes de un proceso, a partir de información conocida sobre algunas corrientes medidas pueden utilizarse los cálculos de balance para determinar los flujos y composiciones de las corrientes no medidas o no medibles en el proceso. Los cálculos de balance desempeñan entonces un papel importante en el diseño preliminar, en el diseño final y en las operaciones del proceso (Reklaitis y Schneider, 1989).

2.6.1. Clasificación de los procesos

Los procesos químicos pueden clasificarse como intermitentes o por lotes, continuos o semicontinuos y en estado estacionario o transitorios. Antes de escribir el balance de materia para un sistema de proceso, es necesario saber a cuál de estas categorías pertenece (Felder y Rousseau, 2007):

•**Proceso intermitente o por lotes.** La alimentación se carga (se introduce) a un recipiente al comienzo del proceso y, transcurrido cierto tiempo, se retira el contenido de dicho recipiente. No hay transferencia de masa más allá de los límites del sistema desde el momento en que se carga la alimentación hasta que se retira el producto.

•**Proceso continuo.** Las corrientes de alimentación y descarga fluyen de manera continua durante todo el proceso.

•**Proceso semicontinuo.** Cualquier proceso que no sea intermitente o por lotes ni continuo.

Si los valores de todas las variables del proceso no cambian con el tiempo, exceptuando, quizá, las fluctuaciones menores en torno a los valores medios constantes, se dice que el proceso opera en *estado estacionario*. Si cualquiera de las variables del proceso cambia con el tiempo, se dice que la operación es *transitoria* o de *estado no estacionario*. Por su naturaleza, los procesos por lotes y semicontinuos son operaciones en estado no estacionario, mientras que los procesos continuos pueden ser de estado estacionario o transitorio (Felder y Rousseau, 2007).

2.6.2. Ecuación General de Balance

El balance de una cantidad que se conserva (masa total, masa de una especie determinada, energía, momentum) en un sistema (una sola unidad de proceso, un conjunto de unidades o un proceso completo) se puede escribir de manera general como (Felder y Rousseau, 2007):

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{entrada} \\ \text{entra} \\ \text{a través} \\ \text{de las} \\ \text{fronteras} \\ \text{del sistema} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{generación} \\ \text{ocurre} \\ \text{dentro} \\ \text{de las} \\ \text{fronteras del} \\ \text{sistema} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{salida} \\ \text{sale} \\ \text{a través} \\ \text{de las} \\ \text{fronteras} \\ \text{del sistema} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{consumo} \\ \text{ocurre} \\ \text{dentro} \\ \text{de las} \\ \text{fronteras} \\ \text{del sistema} \end{array} \right\} = \text{acumulación} \quad (\text{Ec. 2.4})$$

donde la generación, el consumo y la acumulación se producen dentro del sistema, mientras que la entrada y la salida atraviesan las fronteras del mismo, las cuales se han tenido que especificar previamente. Las reglas siguientes pueden aplicarse para simplificar la ecuación de balance de materia:

- Si la cantidad balanceada es la masa total, establecer que *generación* = 0 y *consumo* = 0.
- Si la sustancia balanceada es una especie no reactiva (ni reactivo ni producto), establecer que *generación* = 0 y *consumo* = 0.
- Si un sistema se encuentra en *estado estacionario*, establecer que *acumulación* = 0, sin importar lo que se esté balanceando. Por definición, en un sistema en estado estacionario nada cambia con el tiempo, incluyendo la cantidad de la variable que se balancea.

De acuerdo con la última regla de estas reglas, en procesos continuos en estado estacionario, el término de *acumulación* de la ecuación general de balance, es igual a cero, por lo cual la ecuación se simplifica como sigue:

$$\text{entrada} + \text{generación} = \text{salida} + \text{consumo} \quad (\text{Ec. 2.5})$$

Si se realiza el balance de una especie no reactiva o de la masa total, los términos de *generación* y *consumo* son iguales a cero y la ecuación se reduce a:

$$\text{entrada} = \text{salida} \quad (\text{Ec. 2.6})$$

2.7. Evaluación Hidráulica

2.7.1. Teorema de Bernoulli

El teorema de Bernoulli es una forma de expresión de la aplicación de la ley de la conservación de la energía al flujo de fluidos en una tubería. La energía total en un punto cualquiera por encima de un plano horizontal arbitrario fijado como referencia, es igual a la suma de la altura geométrica, la altura debida a la presión y la altura debida a la velocidad, es decir (Crane, 1993):

$$Z + \frac{P}{\rho \times g} + \frac{V^2}{2g} = H \quad (\text{Ec. 2.7})$$

Si las pérdidas por rozamiento se desprecian y no se aporta o se toma ninguna energía del sistema de tuberías (bombas o turbinas), la altura total **H** en la ecuación anterior permanecerá constante para cualquier punto del fluido. Sin embargo, en la realidad existen pérdidas o incrementos de energía que deben incluirse en la ecuación

de Bernoulli. Por lo tanto, el balance de energía puede escribirse para dos puntos del fluido (Crane, 1993):

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho_1 \times g} + \frac{V_1^2}{2g} + H = Z_2 + \frac{P_2}{\rho_2 \times g} + \frac{V_2^2}{2g} + h_L \quad (\text{Ec. 2.8})$$

Donde:

H: carga del sistema: diferencia en elevación entre los recipientes de succión y de descarga (m)

Z: altura o elevación potencial sobre el nivel de referencia (m)

P: presión manométrica (kPa)

g: aceleración de la gravedad (m/s^2)

V: velocidad (m/s)

h_L : pérdidas de carga por el flujo del fluido (m)

2.7.2. Factor de Fricción de Darcy

El flujo de fluido en las tuberías está siempre acompañado de rozamiento de las partículas del fluido entre sí, y consecuentemente, por las pérdidas de energía disponible; en otras palabras, tiene que existir una pérdida de presión en el sentido del flujo. La ecuación general de la pérdida de presión, conocida como la fórmula de Darcy y que se expresa en metros de fluido es:

$$h_L = \left(f \frac{L}{D} \right) \frac{V^2}{2g} \quad (\text{Ec. 2.9})$$

Donde la relación L/D se refiere a la longitud equivalente en diámetros de tubería recta, que causa la misma pérdida de presión que el obstáculo, en las mismas

condiciones de flujo. La fórmula de Darcy puede deducirse por análisis dimensional con la excepción del factor de fricción f , que debe ser determinado experimentalmente. El factor de fricción para condiciones de flujo laminar ($Re < 2.000$) es función sólo del número de Reynolds, mientras que para el flujo turbulento ($Re > 4.000$) es también función de la rugosidad relativa de las paredes de la tubería (Crane, 1993).

2.7.3. Pérdidas de Presión Debidas a Válvulas y Accesorios. Coeficiente de Resistencia K

Cuando un fluido se desplaza uniformemente por una tubería recta, larga y de diámetro constante, la configuración del flujo indicada por la distribución de la velocidad sobre el diámetro de la tubería adopta una forma característica. Cualquier obstáculo en la tubería, cambia la dirección de la corriente total o parcial, altera la condición característica del flujo y ocasiona turbulencia, causando una pérdida de energía mayor de la que, normalmente, se produce en un flujo por una tubería recta. Ya que las válvulas y accesorios en una línea de tuberías alteran la configuración del flujo, producen una pérdida de presión adicional.

El coeficiente de resistencia K se define como la pérdida de altura de velocidad para una válvula o accesorio. Está siempre relacionado con el diámetro al cual se refiere la velocidad. En la mayor parte de las válvulas o accesorios, las pérdidas por fricción, a lo largo de la longitud real del flujo, son mínimas y vienen dadas por (Crane, 1993):

$$h_L = Kf \frac{v^2}{2g} \quad (\text{Ec. 2.10})$$

La misma pérdida para una tubería recta, se expresa por la ecuación de Darcy, donde:

$$K = \left(f \frac{L}{D} \right) \quad (\text{Ec. 2.11})$$

2.7.4. Pérdidas de Carga por Reología del Lodo

La pérdida de carga que se produce en el bombeo de lodo depende de las propiedades de flujo del mismo (reología), del diámetro de la conducción, y de la velocidad de circulación. Se ha observado que las pérdidas de carga aumentan con el contenido de sólidos, con la mayor presencia de materia volátil, y con la disminución de la temperatura. El bombeo del lodo puede presentar dificultades en aquellos casos en los que el producto de los porcentajes de materia orgánica y de sólidos sea superior a 600.

El agua, el aceite y la mayoría de los fluidos, son “newtonianos”, lo cual quiere decir que, en condiciones de flujo laminar, la pérdida de carga es proporcional a la velocidad y a la viscosidad. Conforme la velocidad aumenta y sobrepasa un valor crítico, el flujo pasa a ser turbulento. Los lodos diluidos, tales como los lodos activados y lodos procedentes de filtros percoladores sin concentrar, tienen un comportamiento similar al del agua. Sin embargo, los lodos de aguas residuales concentrados no son fluidos newtonianos. En el caso de fluidos no newtonianos, la pérdida de carga en condiciones de flujo laminar no es proporcional a la velocidad, de modo que la viscosidad deja de ser constante.

Las pérdidas de carga que se producen en el bombeo de lodos activados y lodos procedentes de filtros percoladores no concentrados pueden ser del orden del 10 al 25 por 100 superiores a las del agua.

En el caso de conducciones para el transporte de lodos de corta longitud, los métodos de cálculos simplificados son prácticos y convenientes en los casos en los que las pérdidas se estiman de forma conservadora. Sin embargo, las conducciones de lodos de gran longitud obligan a emplear métodos de estimación de las pérdidas de carga que merecen un estudio muy detallado basado en consideraciones técnicas, económicas y de explotación (Eddy y Metcalf, 1996).

2.7.5. Carga del Sistema

En términos estrictos, una bomba sólo puede funcionar dentro de un sistema para entregar un volumen dado de líquido en este sistema, la bomba debe aplicar al líquido, una energía formada por los siguientes componentes (Kenneth, 1993):

- **Carga estática**

Significa una diferencia en elevación. Por lo tanto, la “carga estática total” de un sistema es la diferencia en elevación entre los niveles de líquido en los puntos de descarga y succión de la bomba (figura 2.7). La “carga estática de descarga” es la diferencia en elevación entre el nivel de líquido de descarga y la línea de centro de la bomba (Kenneth, 1993).

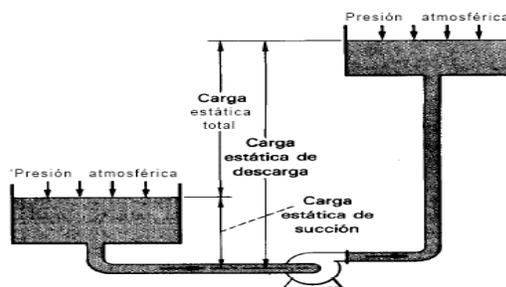


Figura 8. Nivel de succión encima de la línea de centro de la bomba (Kenneth, 1993).

- **Carga de fricción**

La carga de fricción es la necesaria para contrarrestar las pérdidas por fricción ocasionadas por el flujo del líquido en la tubería, válvulas, accesorios y otros componentes como pueden ser los intercambiadores de calor. Estas pérdidas varían más o menos proporcionalmente al cuadrado del flujo en el sistema. También varían de acuerdo con el tamaño, tipo y condiciones de las superficies de tubos y accesorios y las características del flujo bombeado (Kenneth, 1993).

- **Pérdidas en la entrada y en la salida**

Si la toma de la bomba está en un depósito, tanque o cámara de entrada, las pérdidas ocurren en el punto de conexión de la tubería de succión con el suministro. La magnitud de las pérdidas depende del diseño de la entrada al tubo. Una boca acampanada bien diseñada produce la mínima pérdida. Asimismo, en el lado de descarga del sistema cuando el tubo de descarga termina en algún cuerpo de líquido, se pierde por completo la carga de velocidad del líquido y se debe considerar como parte de las pérdidas totales por fricción en el sistema (Kenneth, 1993).

2.7.6. Curva de Fricción y de Carga del Sistema

Para resolver problemas de bombeo es conveniente indicar la relación, en forma de gráfica entre la capacidad y las pérdidas de carga de fricción. Estas pérdidas, por tanto, se calculan con algún flujo predeterminado, sea el esperado o el de diseño, y luego se calcula para todos los demás flujos. La curva resultante se llama curva de fricción del sistema. Cuando se combinan las cargas estáticas, la diferencia en presión y las pérdidas de carga de fricción de cualquier sistema, y se trazan contra la capacidad, se llama curva de carga del sistema.

Al superponer una curva de capacidad contra carga de la bomba a velocidad constante sobre esta curva de carga del sistema, se podrá determinar la capacidad en el punto en que se cruzan las dos curvas. Ésta es la capacidad que entregará al sistema esa bomba a esa velocidad particular. En sistemas que tienen carga estática o diferencia de presión variables, es posible trazar curvas que correspondan a las condiciones mínimas y máximas (figura 2.8). Después, las intersecciones con la curva de carga-capacidad de la bomba determinarán los flujos mínimo y máximo que entregará la bomba en el sistema (Kenneth, 1993).

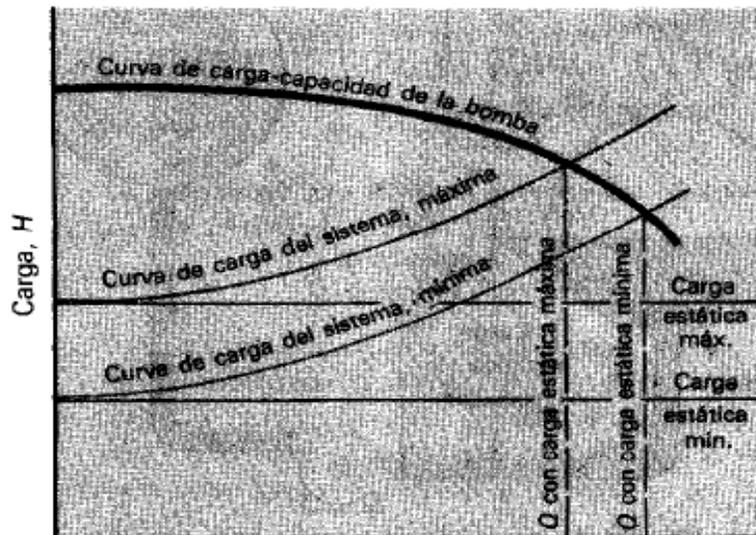


Figura 9. Característica del sistema para una carga estática variable (Kenneth, 1993).

2.7.7. Carga Neta Positiva de Succión (NPSH)

Las condiciones de succión en las bombas rotatorias se expresan como carga neta positiva de succión (NPSH), presión neta positiva de entrada (NPIP) y presión neta de entrada (NZE). En estas bombas, como en cualquier otra se requiere presión positiva en la succión para que se llenen por completo con el líquido. Aunque muchos

tipos de bombas rotatorias tendrán un buen funcionamiento durante largo tiempo cuando bombean una mezcla de líquido y gas, la descarga neta del líquido se reducirá mucho si una parte del caudal dentro de la bomba es una mezcla de gas y líquido o de aire y líquido. Por ello, siempre es necesario asegurar una presión o carga adecuada de succión para que la bomba se llene por completo con líquido y funcione sin cavitación (Kenneth, 1993).

La carga neta positiva de succión disponible ($NPSH_D$) es la presión total de succión disponible en el sistema en la conexión de succión de la bomba menos la presión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo (Kenneth, 1993):

$$NPSH = \frac{F_4 \times g_c}{\rho \times g} (P_0 - P_v) + \Delta Z - h_L \quad (\text{Ec. 2.12})$$

Donde:

F_4 = factor que depende de las unidades usadas (1)

g_c = factor de corrección ($\text{Kg/kPa} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2$)

P_0 = presión del recipiente de succión (kPa)

P_v = presión de vapor del líquido (kPa)

ρ = densidad del fluido (Kg/m^3)

ΔZ = diferencia de altura mínima entre la succión de la tubería y la succión de la bomba (m)

La carga neta positiva de succión requerida ($NPSH_R$) es la presión total de succión requerida por la bomba en su conexión de succión, menos la presión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo. La $NPSH_D$ es función del diseño del sistema y sólo se puede determinar si se conocen las características del sistema y del líquido que se va a bombear, la distribución física del sistema, el tamaño de las tuberías y

otras pérdidas por fricción en los tubos que llegan a la bomba, la elevación estática antes de la bomba, la presión de vapor en el líquido bombeado, la viscosidad y su efecto en las pérdidas.

Por el contrario, la $NPSH_R$ es función del diseño de la bomba y sólo se puede encontrar mediante pruebas de la bomba, el fabricante indicará su valor. Igual que en otras bombas, la $NPSH_D$ debe ser mayor que la $NPSH_R$ si se quiere que la bomba entregue su capacidad nominal y tenga larga duración sin problemas (Kenneth, 1993).

2.7.8. Bomba de Cavidad Progresiva (Rotatoria de Tornillo)

Las bombas de cavidad progresiva están compuestas de dos elementos: el rotor y el estator. La geometría del conjunto constituye dos o más series de cavidades aisladas. Cuando el rotor gira en el interior del estator, las cavidades se desplazan axialmente, a lo largo del estator, constituyendo así el mecanismo de bombeo. El sistema de accionado hace que el rotor gire sobre sí mismo. Cuando el rotor ha girado una vez, su eje ha girado otra en sentido contrario en torno al eje del estator, manteniendo su paralelismo.

Esta bomba, basada en un principio volumétrico, aspira en cuanto gira. Constituye una máquina muy sencilla cuyo comportamiento y duración de funcionamiento sin averías, dependen de algunos parámetros esenciales: comportamiento del elastómero, la velocidad de rotación y la lubricación (Cholet, 1998).

Las bombas de cavidad progresiva son muy usadas en el tratamiento de aguas, sin embargo, se debe tener cuidado con las pastas aguadas y lodos, sabiendo que la concentración típica de sólidos en estas corrientes es entre 0,5% y 15%. El tratamiento fisicoquímico produce corrientes de pastas aguadas de diferentes

composiciones químicas, contenido de sólidos, tamaño de partículas y abrasividad. Los lodos de la industria petrolera y química orgánica se suelen procesar en la zona de tratamiento de aguas negras para eliminar el aceite. Las industrias siderúrgicas y metalúrgicas producen pastas aguadas de composición muy variada. Incluso las centrales generadoras alimentadas con combustible fósil, con lavadores de humo para evitar la contaminación, tienen que manejar y eliminar grandes cantidades de pastas aguadas y lodos. La lista sería interminable, pues cada pasta o lodo es un poco diferente a los demás.

Ha sido común la aplicación incorrecta de bombas para pastas aguadas o lodos, porque no se han investigado a fondo la composición química, tamaño de partículas, abrasividad y otros factores. Con frecuencia los líquidos son no newtonianos. Las bombas rotatorias, en especial las de tornillo, se utilizan mucho para la conducción de pastas aguadas o lodos; la acción de todas ellas es similar. Las partículas en suspensión no influyen en el funcionamiento de esta bomba. La regla general es que si el líquido puede entrar a los elementos de bombeo, también se podrá expulsar.

Estas bombas son autocebantes, con altura de aspiración hasta de 28 pies, produce un caudal de flujo uniforme y, por lo general, no se obstruyen. Las hay de capacidad de centenares de gpm y presiones de descarga hasta de 300 – 400 lbf/pulg². Aunque es común bombear pastas aguadas con 5 a 15% de sólidos, también se han podido mover otras con 70% de sólidos. Las propiedades de la suspensión son las que más influyen en la velocidad de la bomba. Cuanto mayor sea el contenido de sólidos, más caballaje se requiere y menor será la velocidad. Sin embargo, la descarga por revolución del motor es constante con cualquier material. La abarabridad de la suspensión influye en la velocidad de la bomba y se tiene menor capacidad con materiales muy abrasivos (Kenneth, 1993).

2.8. Componentes Básicos de los Sistemas de Control

En un sistema de control, existen cuatro componentes básicos: el *sensor*, que también se conoce como el elemento primario, se conecta físicamente al *transmisor*, el cual se conoce como el elemento secundario y capta la salida del sensor para convertirla en una señal lo suficientemente intensa como para transmitirla al *controlador*, que es el “cerebro” del sistema de control. El controlador recibe la señal, que está en relación con la variable que se quiere controlar, la compara con el valor que se desea y, según el resultado de la comparación, decide qué hacer para mantener la variable en el valor deseado. Con base en la decisión, el controlador envía otra señal al *elemento final de control*, que frecuentemente se trata de una válvula de control, aunque no siempre. Otro elemento final de control comúnmente utilizado son las bombas de velocidad variable.

Con los sensores y transmisores se realizan las operaciones de medición en el sistema de control. En el sensor se produce un fenómeno mecánico, eléctrico o similar, el cual se relaciona con la variable de proceso que se mide; el transmisor, a su vez, convierte este fenómeno en una señal que se puede transmitir y, por lo tanto, ésta tiene relación con la variable del proceso (Corripio, Smith, 2007).

Un sistema que mantiene una relación prescrita entre la salida y la entrada de referencia, comparándolas y usando la diferencia como medio de control se denomina *sistema de control retroalimentado*, llamados también *sistemas de control en lazo cerrado*. En este tipo de sistemas se alimenta al controlador la señal de error de actuación, que es la diferencia entre la señal de entrada y la señal de retroalimentación (que puede ser la señal de salida misma o una función de la señal de salida y sus derivadas y/o integrales), a fin de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor conveniente. El término de control en lazo cerrado siempre implica el uso de una acción de control retroalimentado para reducir el error del sistema.

Por otro lado, se tienen los *sistemas de control en lazo abierto*, son aquellos en los cuales la salida no afecta la acción de control. En otras palabras en un sistema de control de lazo abierto, no se mide la salida ni se retroalimenta para compararla con la entrada, por lo tanto, a cada entrada de referencia le corresponde una condición operativa fija y como resultado, la precisión del sistema depende de la calibración. Ante la presencia de perturbaciones, un sistema de control de lazo abierto no realiza la función deseada. En la práctica, el control de lazo abierto sólo se usa si conoce la relación entre la entrada y la salida y si no hay perturbaciones internas ni externas.

Una ventaja del sistema de control de lazo cerrado es que el uso de la retroalimentación vuelve la respuesta del sistema relativamente insensible a las perturbaciones externas y a las variaciones internas en los parámetros del sistema. Por lo tanto, es posible usar componentes relativamente precisos y económicos para obtener el control adecuado de una planta determinada, en tanto que hacer eso es imposible en el caso de un sistema de lazo abierto.

Desde el punto de la estabilidad, el sistema de control de lazo abierto es más fácil de desarrollar, porque la estabilidad del sistema no es un problema importante. Por otra parte la estabilidad es una función principal del sistema de control de lazo cerrado, por lo cual puede conducir a corregir en exceso errores que producen oscilaciones de amplitud constante o cambiante.

Debe señalarse que, para los sistemas en los que se conocen con anticipación las entradas y en los cuales no hay perturbaciones, es aconsejable emplear un control en lazo abierto. Los sistemas de control en lazo cerrado sólo tienen ventajas cuando se presentan perturbaciones impredecibles y/o variaciones impredecibles en los componentes del sistema. La cantidad de componentes usados en un sistema de control de lazo cerrado es mayor que la que se emplea para un sistema de control equivalente de lazo abierto, por lo tanto, es preferible emplear un sistema de control

de lazo abierto cuando existen las condiciones dadas para aplicarse. Por lo general, una combinación adecuada de controles de lazo abierto y de lazo cerrado es menos costosa y ofrecerá un desempeño satisfactorio del sistema general (Ogata, 1998).

CAPÍTULO III

DESARROLLO DEL PROYECTO

3.1. Cálculo del Caudal, el Tiempo y la Frecuencia de Extracción de Lodos Mediante el Balance de Masa del Proceso de Coagulación-Floculación

Para realizar el balance de masa en el clarificador-espesador se hizo necesario tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- El lodo formado en el proceso está compuesto por sólidos suspendidos retirados del agua cruda y por aquellos aportados por los químicos empleados (sulfato de aluminio, polímero ayudante de coagulación y floculante).

- La temperatura de operación es constante con un valor de 30 °C.

- La densidad del agua se asume constante y con un valor de 996 Kg/m³.

- Flujo normal de agua a la salida del sistema D-200 es de 1.440 m³/h (400 L/s).

- El caudal máximo de efluente de lavado de los filtros es de 48 m³/h (13,3333 L/s).

- El tiempo de duración de un lavado de los filtros es de 35 minutos y se realizan no más de 6 lavados al día a caudal máximo.

- El caudal de recirculación de lodos debe estar entre 6-8% en concentración de lodos en el floculador con un valor mínimo de 3%, tomando en cuenta el valor de sólidos suspendidos aportado por el agua cruda que alimenta al proceso.

- La concentración de los sólidos suspendidos en los lodos extraídos del clarificador-espesador a flujo normal se considera que es de 800 veces la concentración de sólidos que entran al sistema.

- La concentración de sólidos suspendidos a la salida del módulo D-200 es de 5 ppm.

- La concentración de sólidos suspendidos en el agua filtrada es de 1 ppm.

- La concentración de sólidos aportada por el coagulante orgánico es de 2,67 ppm.

- La concentración de sólidos aportada por el floculante es de 0,8 ppm.

- La concentración de sólidos aportada por el sulfato de aluminio es de 10,92 ppm.

A. Obtención de los distintos caudales del sistema coagulación-floculación

Para las condiciones operacionales estudiadas en distintos días durante cuatro meses, se tomaron los datos de caudales de agua cruda y clarificada del registro de control de plantas (tabla A.1), mientras que para los distintos caudales de los químicos dosificados se usaron los valores de los formatos de monitoreo de químicos (tabla A.2) y se muestran en la tabla 3.1.

Cabe resaltar que el valor de los caudales de efluentes de lavado de los filtros se mantiene constante para los diferentes días, ya que de acuerdo con las consideraciones de diseño, se efectúa a caudal máximo.

Tabla 4. Caudales del proceso coagulación-floculación para el tiempo de estudio establecido.

Fecha	Q ₁ (L/s)	Q ₂ (L/s)	Q ₃ (L/s)	Q ₄ (L/s)	Q ₆ (L/s)
17/05/2010	320,0000	0,0113	0,0000	0,0317	13,3333
24/05/2010	336,0000	0,0045	0,0000	0,0292	13,3333
31/05/2010	268,0000	0,0087	0,0000	0,0283	13,3333
07/06/2010	320,0000	0,0108	0,0000	0,0333	13,3333
14/06/2010	306,0000	0,0137	0,0000	0,0367	13,3333
21/06/2010	315,0000	0,0085	0,0408	0,0375	13,3333
28/06/2010	300,0000	0,0104	0,0599	0,0314	13,3333
06/07/2010	340,0000	0,0150	0,0509	0,0381	13,3333
07/07/2010	380,0000	0,0179	0,0759	0,0425	13,3333
12/07/2010	340,0000	0,0130	0,0000	0,0383	13,3333
15/07/2010	300,0000	0,0113	0,0000	0,0336	13,3333
19/07/2010	310,0000	0,0146	0,0000	0,0347	13,3333
26/07/2010	323,0000	0,0127	0,0000	0,0362	13,3333
02/08/2010	360,0000	0,0142	0,0431	0,0448	13,3333
09/08/2010	280,0000	0,0132	0,0280	0,0348	13,3333
11/08/2010	274,0000	0,0108	0,0000	0,0341	13,3333
13/08/2010	320,0000	0,0227	0,0000	0,0398	13,3333
17/08/2010	350,0000	0,0220	0,0699	0,0435	13,3333
18/08/2010	346,0000	0,0163	0,0000	0,0430	13,3333
23/08/2010	330,0000	0,0182	0,0000	0,0411	13,3333

Donde:

Q₁= caudal de agua cruda

Q₂= caudal de sulfato de aluminio

Q₃= caudal de ayudante de coagulación

Q₄= caudal de floculante

Q₆= caudal de efluentes de lavado

B. Cálculo de las Concentraciones de Sólidos Suspendidos

Para saber los sólidos suspendidos contenidos en las corrientes de agua cruda, agua clarificada, efluentes de lavado y extracción de lodos se aplicó el ensayo de sólidos suspendidos en el laboratorio de calidad de acuerdo con método estándar (Standard Method) SM 2540 D, el cual consiste en filtrar una muestra de la corriente deseada, almacenar los sólidos en un papel de filtro y llevarlos a la estufa, luego desecarlos y pesarlos para obtener por diferencia de pesada la cantidad de sólidos suspendidos presentes.

Sin embargo, para lodos espesos se debía aplicar el ensayo de sólidos totales, según indica el método estándar (Standard Method) SM 2540 G, que consiste en calentar hasta evaporación una muestra de lodos en una cápsula de porcelana, desecarlos y finalmente pesarlos para obtener la concentración de sólidos por diferencia de pesada. Los datos obtenidos en el laboratorio de calidad se encuentran en las tablas 3.2 y 3.3.

Tabla 5. Masas y volumen de las muestras para el cálculo de sólidos suspendidos de EBP-1 (agua cruda).

Fecha	P ₀ (mg)	V _M (L)	P ₁ (mg)
17/05/2010	1.428,90	0,30	1.438,20
24/05/2010	1.432,30	0,25	1.434,00
31/05/2010	1.429,70	0,40	1.437,80
07/06/2010	1.439,20	0,40	1.452,40
14/06/2010	1.426,70	0,40	1.434,10
21/06/2010	1.459,00	0,30	1.472,10
28/06/2010	1.439,50	0,20	1.450,50
06/07/2010	1.443,80	0,10	1.459,80
07/07/2010	1.432,40	0,10	1.445,70
12/07/2010	1.437,60	0,20	1.448,90
15/07/2010	1.437,70	0,20	1.445,10
19/07/2010	1.446,80	0,20	1.457,00
26/07/2010	1.442,30	0,10	1.453,90

02/08/2010	1.435,00	0,06	1.449,20
09/08/2010	1.434,90	0,10	1.449,90
11/08/2010	1.451,20	0,30	1.468,90
13/08/2010	1.443,70	0,10	1.461,10
17/08/2010	1.489,90	0,10	1.455,60
18/08/2010	1.437,40	0,20	1.450,20
23/08/2010	1.435,00	0,10	1.442,70

Donde:

P_0 = masa de la cápsula vacía

P_1 = masa de la cápsula con la muestra después de una hora en la estufa

V_M = volumen de muestra

Tabla 6. Masas de las muestras para el cálculo de sólidos totales en la corriente de extracción de lodos.

Fecha	P_0 (g)	P_M (g)	P_1 (g)
17/05/2010	72.590	97.620	73.960
24/05/2010	72.610	97.630	74.450
31/05/2010	74.590	100.250	74.910
07/06/2010	72.600	97.630	72.820
14/06/2010	71.560	96.910	72.710
28/06/2010	75.690	102.980	76.380
12/07/2010	68.300	93.440	72.290
15/07/2010	68.310	93.360	71.550
19/07/2010	74.590	99.720	77.500
26/07/2010	68.310	93.480	71.580
02/08/2010	70.650	95.750	73.950
09/08/2010	73.010	101.480	77.690
11/08/2010	72.610	95.650	74.310
13/08/2010	74.580	99.840	77.070
17/08/2010	71.550	97.710	72.310
18/08/2010	74.990	99.970	76.280
23/08/2010	75.660	100.880	76.750

Donde:

P_0 = masa de la cápsula vacía

P_1 = masa de la cápsula con la muestra después de un hora en la estufa

P_M = masa de la muestra

Tomando como muestra los datos de la tabla 3.2 para el día 06/07/2010, se obtienen los sólidos suspendidos del agua cruda para ese día, por medio de la siguiente ecuación:

$$SS_1 = \frac{(P_2 - P_1)}{V_M} \quad (\text{Ec. 3.1})$$

$$SS_1 = \frac{(1.459,80 - 1.443,80) \text{ mg}}{0,1 \text{ L}}$$

$$SS_1 = 160 \text{ mg/L}$$

La misma ecuación se aplica para el resto de los días y muestras, utilizando la tabla 3.2 antes mencionada y las tablas A.3, A.4 y A.5.

C. Determinación de la Densidad del Lodo

En el caso de los sólidos totales en la corriente de extracción de lodos, se hizo necesario determinar la densidad del lodo, a través de un balón aforado de 50 mL, el cual se pesó en la balanza, se taró la misma y se vertió la muestra de lodos hasta el aforo, obteniéndose los valores de peso (P_L) mostrados en la tabla 3.4, se hicieron varias determinaciones en distintos días y se promediaron.

Tabla 7. Masa y volumen de lodo para la obtención de la densidad.

Fecha	P_L (g)	V_L (mL)
05/07/2010	52,42	50,00
06/07/2010	54,99	50,00
12/07/2010	55,31	50,00

15/07/2010	54,51	50,00
09/08/2010	54,31	50,00

Utilizando los datos reflejados en la tabla anterior, se obtuvo la densidad del lodo para el día 05/07/2010:

$$\rho = \frac{P_L}{V_L} \quad (\text{Ec. 3.2})$$

$$\rho_1 = \frac{52.42 \text{ g}}{50 \text{ mL}}$$

$$\rho_1 = 1,0484 \frac{\text{g}}{\text{mL}} \times \frac{1.000 \text{ mL}}{1 \text{ L}}$$

$$\rho_1 = 1.048,4 \text{ g/L}$$

Asimismo se obtuvieron las distintas densidades para los días correspondientes, mostrándose en la tabla 3.5 conjuntamente con el promedio:

Tabla 8. Densidades del lodo en distintos días y la densidad promedio.

Fecha	ρ_L (g/L)
05/07/2010	1.048,40
06/07/2010	1.099,80
12/07/2010	1.106,20
15/07/2010	1.090,20
09/08/2010	1.086,20
$\bar{\rho}_L$ (g/L)	1.086,16

Una vez obtenida la densidad del lodo, se procedió a trabajar con los valores de la tabla 3.3 para obtener los sólidos suspendidos de la extracción de lodos a

17/05/2010	31,00	21,84	0,00	0,40	16,00	214,00	59.738,80
24/05/2010	7,00	8,52	0,00	0,34	9,00	212,00	80.375,84
31/05/2010	20,00	20,58	0,00	0,42	16,00	226,00	13.033,92
07/06/2010	33,00	21,55	0,00	0,42	6,00	242,00	9.775,44
14/06/2010	19,00	29,98	0,00	0,48	12,00	256,00	48.877,20
21/06/2010	44,00	18,11	1,30	0,47	10,00	234,00	2.380,00
28/06/2010	55,00	22,00	2,00	0,42	7,00	220,00	27.154,00
06/07/2010	160,00	28,00	1,50	0,45	15,00	210,00	11.840,00
07/07/2010	133,00	30,00	2,00	0,45	18,00	280,00	13.300,00
12/07/2010	57,00	24,34	0,00	0,45	10,00	206,00	172.699,44
15/07/2010	37,00	24,00	0,00	0,45	5,00	208,00	140.114,64
19/07/2010	51,00	30,00	0,00	0,45	17,00	294,00	125.994,56
26/07/2010	116,00	25,00	0,00	0,45	10,00	218,00	141.200,80
02/08/2010	237,00	25,00	1,20	0,50	10,00	252,00	142.286,96
09/08/2010	150,00	30,00	1,00	0,50	8,00	242,00	178.130,24
11/08/2010	59,00	25,00	0,00	0,50	12,00	216,00	80.158,61
13/08/2010	174,00	45,00	0,00	0,50	7,00	274,00	107.095,38
17/08/2010	158,00	40,00	2,00	0,50	10,00	262,00	31.498,64
18/08/2010	64,00	30,00	0,00	0,50	11,00	224,00	56.480,32
23/08/2010	77,00	35,00	0,00	0,50	17,00	278,00	46.704,88

donde:

SS₁= sólidos suspendidos en agua cruda

SS₂= sólidos suspendidos en sulfato de aluminio

SS₃= sólidos suspendidos en ayudante de coagulación

SS₄= sólidos suspendidos en floculante

SS₅= sólidos suspendidos en agua clarificada

SS₆= sólidos suspendidos en efluentes de lavado

SS₇= sólidos suspendidos en la extracción de lodos

3.1.1. Balance de Masa en el Proceso de Coagulación-Floculación

El balance de masa para el proceso de coagulación-floculación que se lleva a cabo en el clarificador-espesador del módulo D-200, se consideró hacerlo para una hora de proceso donde todas las corrientes del mismo estuvieran activas. Es decir, teniendo prendidas las bombas de recirculación y extracción de lodos, así como las bombas de efluentes de lavado, quedando el proceso como se muestra en la figura 3.1.

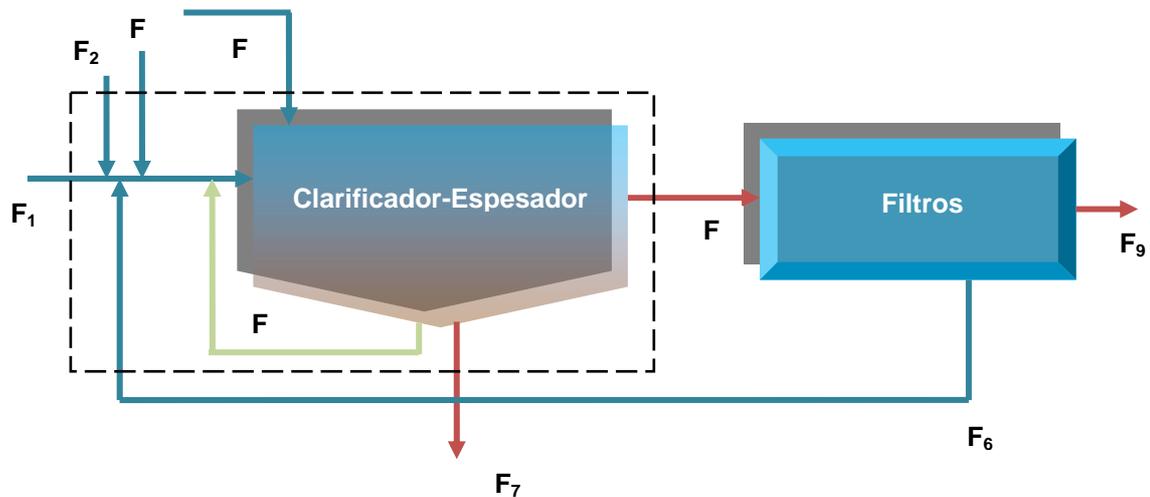


Figura 10. Diagrama de flujo para el balance de sólidos suspendidos en el módulo D-200.

Donde:

F_1 = flujo másico de agua cruda (Kg/h)

F_2 = flujo másico de sulfato de aluminio (Kg/h)

F_3 = flujo másico de ayudante de coagulación (Kg/h)

F_4 = flujo másico de floculante (Kg/h)

F_5 = flujo másico de agua clarificada (Kg/h)

F_6 = flujo másico de efluentes de lavado (Kg/h)

F_7 = flujo másico de extracción de lodos (Kg/h)

F_8 = flujo másico de recirculación de lodos (Kg/h)

F_9 = flujo másico del agua filtrada (Kg/h)

Partiendo de la ecuación 2.4 y haciendo referencia a las reglas mencionadas en el apartado 2.6.2, se tiene que el sistema estudiado no es ninguna especie reactiva, por lo tanto los términos de *generación* y *consumo* son iguales a cero y al estar en estado estacionario, el término *acumulación* queda igualmente reducido a cero y se tiene entonces la expresión de la ecuación 2.6, la cual fue la que se aplicó para este balance, de acuerdo con la figura 3.1 para las entradas y salidas de dicho sistema:

$$F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_6 = F_5 + F_7 \quad (\text{Ec. 3.4})$$

Para la obtención de los flujos máxicos de las corrientes, se trabajó con los caudales y los sólidos suspendidos respectivos, a través de la siguiente expresión:

$$F = Q \times SS \quad (\text{Ec. 3.5})$$

donde:

F= flujo máxico (Kg/h)

Q= caudal volumétrico (L/s)

SS= sólidos suspendidos (mg/L)

Así se tiene que, para el día 06/07/2010, por ejemplo, tomando el valor de caudal de la tabla 3.2 y el valor de sólidos suspendidos de la tabla 3.7, se obtuvo el flujo máxico de sólidos suspendidos para la corriente F₁ de agua cruda:

$$F_1 = (340 \text{ L/s}) (160 \text{ mg/L})$$

$$F_1 = 54.400 \frac{\text{mg}}{\text{s}} \times \frac{1 \text{ Kg}}{1.000 \text{ g}} \times \frac{1 \text{ g}}{1.000 \text{ mg}} \times \frac{3.600 \text{ s}}{1 \text{ h}}$$

$$F_1 = 195,84 \text{ Kg/h}$$

De igual forma, se obtuvieron los valores de las otras corrientes, mostrándose en la tabla A.6. Sin embargo, operacionalmente no se contaba con un caudalímetro, para conocer los valores de los distintos caudales de agua clarificada, generándose así en la ecuación 3.5 dos incógnitas: la corriente de agua clarificada (F₅) y la corriente de extracción de lodos (F₇) y fue necesario aplicar un sistema de ecuaciones en el balance para determinar esos valores. Para este

sistema de ecuaciones se trabajó con una ecuación de balance general en función a los caudales del proceso:

$$Q_1+Q_2+Q_3+Q_4+Q_6= Q_5+Q_7 \quad (\text{Ec. 3.6})$$

Y para que el sistema de ecuaciones sea viable, se planteó otra ecuación del balance, en este caso por componentes, siendo el componente los sólidos suspendidos:

$$Q_1 \times SS_1 + Q_2 \times SS_2 + Q_3 \times SS_3 + Q_4 \times SS_4 + Q_6 \times SS_6 = Q_5 \times SS_5 + Q_7 \times SS_7 \quad (\text{Ec. 3.7})$$

haciendo uso de las ecuaciones 3.6 y 3.7, tomando como ejemplo el mismo día 06/07/2010 y usando los valores de las tablas 3.1 y 3.6, se planteó el sistema de ecuaciones:

$$\begin{cases} Q_5 + Q_7 = 353,4372 \\ 15Q_5 + 11.840Q_7 = 57.199,8125 \end{cases}$$

Despejando Q_7 de ambas expresiones:

$$\begin{cases} Q_7 = 353,4372 - Q_5 \\ Q_7 = 4,8311 - 1,2669 \times 10^{-3} Q_5 \end{cases}$$

Igualando las dos ecuaciones resultantes del sistema, se obtuvo Q_5 :

$$353,4372 - Q_5 = 4,8311 - 1,2669 \times 10^{-3} Q_5$$

$$Q_5 = 349,0483 \frac{\text{L}}{\text{s}} \times \frac{1\text{m}^3}{1.000\text{L}} \times \frac{3600}{1\text{h}}$$

$$Q_5 = 1.256,5739 \text{ m}^3/\text{h}$$

Asimismo, se determinaron el resto de los caudales de agua clarificada (Q_5) y se muestran en la tabla A.5 y a través de la ecuación 3.5 se obtuvo el flujo másico del agua clarificada usando los valores de la tabla 3.7 para los sólidos suspendidos:

$$F_5 = (349,0483 \text{ L/s}) (15 \text{ mg/L})$$

$$F_5 = 5.235,7245 \frac{\text{mg}}{\text{s}} \times \frac{1 \text{ Kg}}{1.000 \text{ g}} \times \frac{1 \text{ g}}{1.000 \text{ mg}} \times \frac{3.600 \text{ s}}{1 \text{ h}}$$

$$F_5 = 18,8486 \text{ Kg/h}$$

Para la obtención de los flujos másicos de sólidos suspendidos en el agua clarificada, se procedió de la misma forma y los resultados se encuentran en la tabla A.4. Sin embargo, la corriente de interés es la de extracción de lodos (F_7) y haciendo referencia a la ecuación 3.4 se puede determinar F_7 usando los valores de la tabla A.4:

$$F_7 = (195,8400 + 15,0884 \cdot 10^{-3} + 0,2749 \cdot 10^{-3} + 0,0822 \cdot 10^{-3} + 10,0775 - 18,848608) \text{ Kg/h}$$

$$F_7 = 187,0707 \text{ Kg/h}$$

Se aplicó el mismo procedimiento al resto de los días y los resultados se reflejan en la tabla 4.7. Una vez conocidos los flujos másicos de la extracción de lodos, por medio de la ecuación 3.5, fue posible calcular los caudales de extracción de lodos, usando los valores de sólidos suspendidos que se encuentran en la tabla 3.7:

$$Q_T = \frac{187,0707 \text{ Kg/h}}{11.840 \text{ mg/L} \times \frac{1 \text{ g}}{1.000 \text{ mg}} \times \frac{1 \text{ Kg}}{1.000 \text{ g}} \times \frac{1.000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3}}$$

$$Q_T = 15,7999 \text{ m}^3/\text{h}$$

Para el cálculo del resto de los caudales de extracción de lodos, se aplicó exactamente el mismo procedimiento explicado anteriormente y los resultados se muestran en la tabla 4.1.

3.1.2. Cálculo del Tiempo de Extracción de Lodos

Una vez obtenidos los caudales de extracción de lodos para distintos días, se procedió a calcular el tiempo de extracción respectivo para cada uno, los cuales están en función del espesor de lodos y del volumen de la tolva contenedora de lodos que está ubicada en la parte baja de la planta Densadeg D-200, la cual jamás puede quedar totalmente vacía después de una extracción y, teniendo en cuenta que actualmente se extraen lodos cuando el toma muestra ubicado en la parte de arriba de la tolva muestra presencia de los mismos.. Este tiempo permitirá extraer el caudal necesario para que en el sistema permanezca en un porcentaje de recirculación de lodos adecuado para un buen funcionamiento de la planta, manteniendo un nivel de lodos constante. El volumen de la tolva contenedora de lodos fue obtenido de los parámetros de diseño de la planta (anexo C.1) Teniendo así que:

$$Q_E = \frac{V}{T_E} \quad (\text{Ec. 3.8})$$

Donde:

Q_E = caudal d extracción de lodos (m^3/h)

V = volumen de la tolva ($1,4 \text{ m}^3$)

T_E = tiempo de extracción (h)

Despejando de la ecuación 3.8 el tiempo de extracción, tomando como ejemplo el día 06/07/2010 y utilizando el caudal obtenido anteriormente:

$$T_E = \frac{1,4 \text{ m}^3}{15,7999 \text{ m}^3/\text{h}}$$

$$T_E = 0,0886 \text{ h}$$

De igual forma, se determinaron los tiempos de extracción para el resto de los caudales y se muestran en la tabla 4.2.

3.1.3. Cálculo de la Frecuencia de Extracción

La frecuencia de un hecho es el número de veces que se repite el mismo, sin embargo, para efectos prácticos, se definirá frecuencia de extracción al intervalo de tiempo que debería existir entre dos extracciones. Para su cálculo se tomaron los valores de flujo másico de sólidos suspendidos en la corriente de agua cruda y usando la densidad del lodo se obtuvieron los distintos caudales volumétricos que corresponden a esa corriente, indicando la cantidad de lodos que se acumula en la tolva cuando el sistema de extracción se encuentra apagado, se muestra como ejemplo los valores del día 06/07/2010:

$$Q_{SS1} = \frac{F_1}{\rho} \quad (\text{Ec. 3.9})$$

$$Q_{SS1} = \frac{195,84 \text{ Kg/h}}{1,086,16 \text{ Kg/m}^3}$$

$$Q_{SS1} = 0,1803 \text{ m}^3/\text{h}$$

Luego de haber obtenido el caudal de entrada de sólidos suspendidos, se procedió a calcular la frecuencia de extracción, aplicando la ecuación 3.8 de forma análoga al tiempo de extracción:

$$Q_{SS1} = \frac{V}{T_{FE}}$$

Donde:

Q_{SS1} = caudal de sólidos suspendidos en la corriente de agua cruda (m^3/h)

T_{FE} = frecuencia de extracción de lodos (h)

$$T_{FE} = \frac{1,4 \text{ m}^3}{0,1803 \text{ m}^3/\text{h}}$$

$$T_{FE} = 7,7646 \text{ h}$$

Para los días restantes se calculó la frecuencia de extracción de lodos de la misma manera y se muestran los valores obtenidos en la tabla 4.3.

3.2. Comparación de los Valores de la Carga Superficial, Porcentaje de Remoción de Sólidos, Velocidad de Sedimentación y Flujo Másico de Extracción de Lodos Operacionales con respecto a los Valores de Diseño

3.2.1. Carga Superficial

Para realizar este cálculo se utilizó la ecuación 2.3, tomando los distintos caudales de agua cruda que ingresaban al proceso de la tabla A.6 y teniendo en

cuenta que el área superficial del sedimentador utilizado es de 68 m^2 , para el día 06/07/2010 se tiene:

$$C_s = \frac{1.224,00 \text{ m}^3/\text{h}}{68 \text{ m}^2}$$

$$C_s = 18 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$$

En la tabla 4.4 se muestran los demás valores de la carga superficial para los días correspondientes al estudio, así como el valor de diseño, el cual fue obtenido de la misma manera, pero con el caudal de diseño que es de 400 L/s ($1.440 \text{ m}^3/\text{h}$).

3.2.2. Porcentaje de Remoción de Sólidos

Se utilizó el valor de sólidos suspendidos del agua cruda y el valor de sólidos suspendidos del agua clarificada, obteniendo así los sólidos que es capaz de retener el sedimentador para distintas condiciones operacionales. El porcentaje de remoción se obtuvo a través de la siguiente expresión:

$$\%R_s = \left(\frac{SS_1 - SS_2}{SS_1} \right) \cdot 100 \quad (\text{Ec. 3.10})$$

Siguiendo con el ejemplo del día 06/07/2010 y tomando los valores de sólidos suspendidos de la tabla 3.6, se determinó el porcentaje de remoción de sólidos para dicho día:

$$\%R_s = \left[\frac{(160 - 15) \text{ mg/L}}{160 \text{ mg/L}} \right] \cdot 100$$

$$\%R_s = 90,62\%$$

Repitiendo el mismo procedimiento para el resto de los días se calcularon los distintos porcentajes de remoción de sólidos, los cuales se muestran en la tabla 4.5. Sabiendo que los valores de sólidos suspendidos por diseño para el agua cruda son 12, 32 y 492 mg/L reportados como valores mínimo, promedio y máximo, respectivamente y que el valor de sólidos suspendidos en el agua clarificada es de 5 mg/L (tabla C.2), se calculó el porcentaje de diseño de remoción de sólidos, reflejados igualmente en la tabla 4.5.

3.2.3. Velocidad de Sedimentación

Para determinar la velocidad de sedimentación operacional, se hizo la prueba descrita en el capítulo 2 por un período de seis días diferentes a los días del estudio anterior, mediante el uso de un cono de imhof durante 10 minutos. La muestra del agua se tomó del tanque de floculación del módulo D-200, es decir, antes de comenzar el proceso de sedimentación en planta. En los 10 minutos de duración de la prueba se registraron las distintas alturas a las cuales iba descendiendo el sedimento y se muestran en la tabla 3.8.

Tabla 10. Alturas obtenidas por el cono de imhof para el cálculo de la velocidad de sedimentación en un tiempo determinado.

Fecha	t (min)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
23/08/2010	z (cm)	38	32,3	28,6	25,7	18,6	15,0	8,0	6,2	5,3	4,2	3,8
24/08/2010		38	30,2	25,6	20,3	14,9	11,7	8,4	7,5	6,9	6,6	6,3
25/08/2010		38	32,9	27,1	23,8	19,2	15,7	11,3	8,2	6,4	4,7	4,0
26/08/2010		38	34,6	29,1	25,3	20,8	16,2	11,8	8,6	5,2	4,9	4,5
27/08/2010		38	35,6	30,1	26,1	21,7	17,3	13,5	10,9	7,6	4,1	3,2
30/08/2010		38	34,2	27,6	22,8	17,3	14,6	11,9	8,3	6,1	5,0	3,5

Una vez registrados los datos, se procedió a graficarlos por día, obteniendo así un total de seis gráficas, como la que se muestra a continuación, tomando como ejemplo el día 23/08/2010:

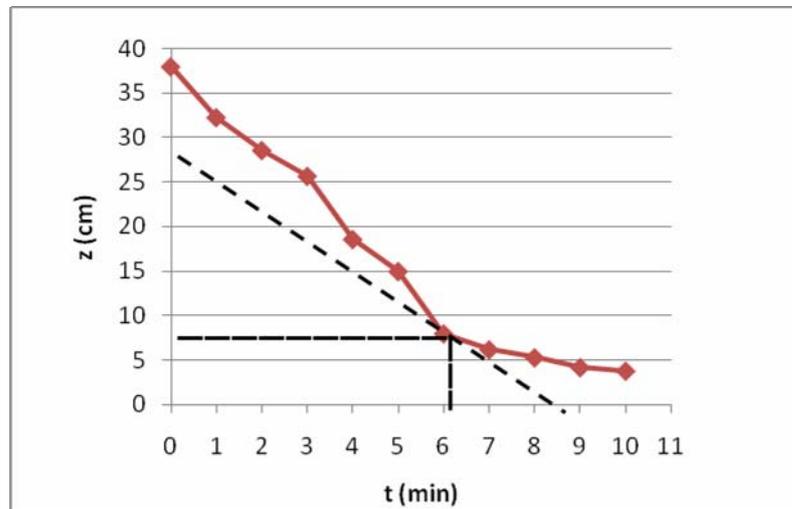


Figura 11. Altura del sedimento en función del tiempo de sedimentación para el día 23/08/2010.

El resto de las gráficas se encuentran en el anexo B. La tangente trazada a la curva da el punto z_i al cortar el eje de las abscisas, mientras que las lecturas en ambos ejes que da el punto que toca a la curva, son z_1 y t_1 . Al aplicar la ecuación 2.1, se obtiene inmediatamente la velocidad de sedimentación operacional:

$$V_s = \frac{(29-9)\text{cm}}{(6-0)\text{min}}$$

$$V_s = 3,33 \text{ cm/min}$$

De la misma manera, se graficaron los demás días y se obtuvieron el resto de las velocidades de sedimentación existentes en el proceso para el tiempo estudiado mostrándose en la tabla 4.6. Con respecto a la velocidad de sedimentación de diseño, se tomó el caudal nominal de la planta y el área transversal de la unidad de clarificación de las características de los equipos del proceso (tabla C.1), ya que no se muestra directamente en las mismas y usando la ecuación 2.3 de forma análoga, se tiene:

$$V_{SD} = \frac{(0,40 \text{ m}^3/\text{s})}{(10,70 \text{ m})(5,70 \text{ m})}$$

$$V_{SD} = 6,5585 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}} \times \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} \times \frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}}$$

$$V_{SD} = 39,35 \text{ cm}/\text{min}$$

3.2.4. Flujo másico de Extracción de Lodos

Los flujos másicos de la corriente de la extracción de lodos para condiciones de operación fueron determinados en la sección 3.1.1 como parte del cumplimiento del primer objetivo. Por otra parte, el flujo másico de diseño de esta corriente, el cual tiene un valor de $5 \text{ Kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ y sabiendo por las características de diseño de los equipos (tabla C.1) igualmente que el área de la tolva de lodo es de $114,5 \text{ m}^2$, entonces se tiene que:

$$F_{ED} = 5 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}} \times 114,5 \text{ m}^2$$

$$F_{ED} = 572,5 \text{ Kg}/\text{h}$$

Donde:

F_{ED} = flujo másico de extracción de lodos de diseño (Kg/h)

Tanto los valores operacionales del flujo másico de extracción de lodos, así como el de diseño se encuentran reflejados en la tabla 4.7.

3.3. Estudio de los Instrumentos para el Control del Nivel de Lodos así como el Desempeño de las Bombas del Sistema

3.3.1. Instrumentos para el Control del Nivel de Lodos

La estabilidad de la capa de lodos es un parámetro determinante en el buen funcionamiento del densadeg, por esto para el estudio de los instrumentos que la controlan se realizaron visitas de campo, inspecciones a la planta y entrevistas no estructuradas a operadores de proceso e instrumentistas y posteriormente se procedió a describir la automatización para la regulación de la misma, la cual es asegurada por una o dos sondas de detección de la interfase y un interruptor de alto torque, que controlan las extracciones. Estas extracciones también podrán ser verificadas mediante una serie de válvulas ubicadas en distintos niveles que permiten el aforo del nivel de lodos.

- **Sonda de alto nivel (LSH)**

Esta sonda monitorea las extracciones forzadas en caso de un incremento importante de la capa de lodos. Está ubicada a 3,41 metros por debajo del tope del sedimentador (figura 3.3). Al detectar un alto nivel de lodos en la unidad, manda una señal eléctrica al controlador lógico programable (PLC, por sus cifras en inglés), el cual interpreta dicha señal y luego emite la orden de arrancar la bomba de extracción de lodos para bajar el nivel de la capa formada en el sedimentador.

- **Sonda de bajo nivel (LSL)**

Esta sonda garantiza la estabilidad de la recirculación y mantiene los lodos en el equipo y a su vez, incrementa o reduce las extracciones, ubicada a 4,24 metros por debajo del tope del decantador como se muestra en la figura 3.3. Cuando existe un bajo nivel de la capa de lodos, la sonda de bajo nivel envía una señal al controlador lógico programable que la interpreta y ordena la parada de la

bomba de extracción, en caso de que la misma se encuentre prendida, para mantener un nivel adecuado de lodos en el sistema, ya que la tolva de lodos no puede quedar vacía debido a que se necesita la recirculación de lodos para el buen funcionamiento de la clarificación del agua cruda.

- **Interruptor de alto torque**

El interruptor de alto torque se encuentra conectado a la base del motor del rastrillo espesador de lodos. Para casos donde exista un alto torque ejercido por el espesador, el interruptor se activa, indicando esta condición al controlador lógico programable por medio de una señal eléctrica y éste último envía la orden de aumento del tiempo de extracción de lodos, al elemento final de control, el cual es la bomba de extracción de lodos. Sin embargo, cuando el torque ejercido por el espesador es muy alto (100%), la señal enviada por el controlador lógico programable hasta al elemento final de control, es la parada de la bomba de extracción en caso de que esté prendida.

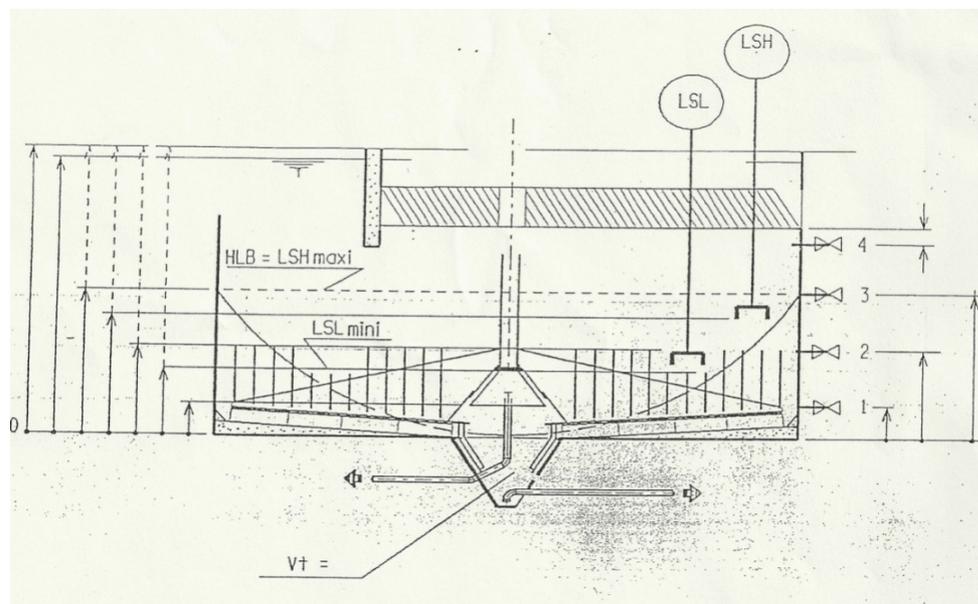


Figura 12. Control del nivel de lodos en el módulo D-200 (Pequiven y Veneagua, 1998).

Donde:

Aforo de lodos 1: + 830 mm de altura desde el suelo

Aforo de lodos 2: +1.660 mm de altura desde el suelo

Aforo de lodos 3: +2.500 mm de altura desde el suelo

Aforo de agua clara: + 3.990 mm de altura desde el suelo

3.3.2. Estudio Hidráulico para las Bombas del Sistema de Lodos

Para evaluar las bombas del sistema de recirculación y extracción de lodos de tipo cavidad progresiva de desplazamiento positivo, se procedió a aplicar el teorema de Bernoulli teniendo en cuenta las velocidades del fluido, las presiones de succión y descarga, así como las pérdidas de fricción que se producen en el fluido y pérdidas por tubería. Sin embargo, se despreciaron las pérdidas de carga por reología del lodo, debido a que las mismas se aplican para lodos de aguas residuales, mientras que el lodo del sistema estudiado es proveniente de un tratamiento de agua cruda presentando propiedades similares a la misma. Se determinaron las cargas del sistema para cada bomba, en un rango de caudales a condiciones máximas y mínimas de operación para luego compararlas con las de diseño.

3.3.2.1. Bomba de Extracción de Lodos BV-208B

En la figura 3.4 se muestra el diagrama hidráulico correspondiente al sistema de extracción de lodos

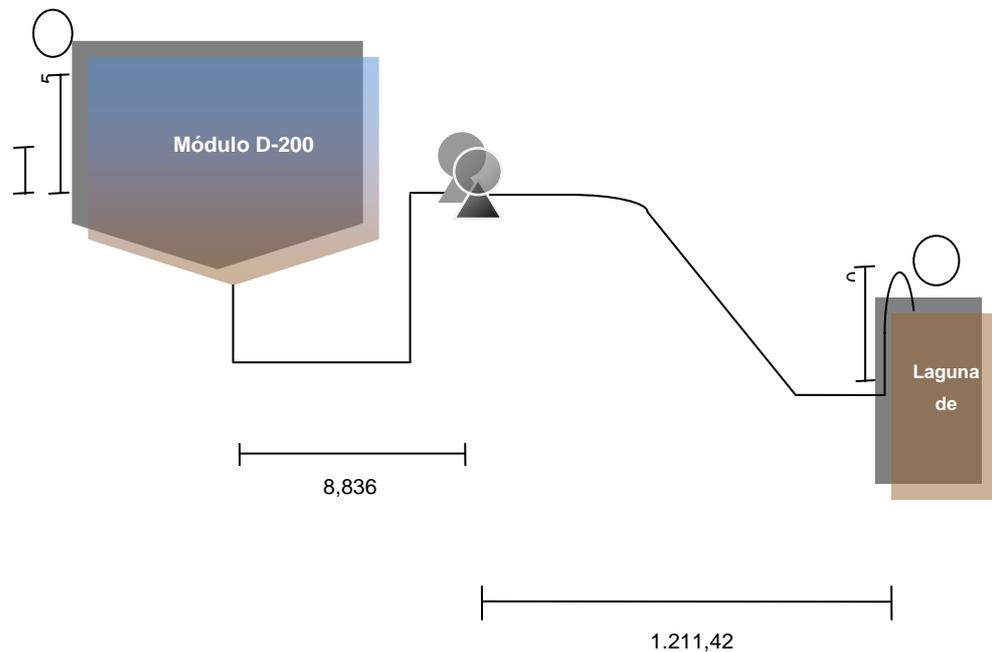


Figura 13. Diagrama hidráulico de la bomba de extracción de lodos BV-208B.

Primeramente, como se sabe para los respectivos cálculos de la evaluación hidráulica se necesita conocer propiedades del fluido tales como densidad y viscosidad. Como se trata de un fluido que varía con respecto a la cantidad de sólidos suspendidos que contenga, se determinaron estas propiedades experimentalmente y se obtuvo un promedio. La densidad que se utilizó fue la obtenida en la sección 3.1 y mostrada en la tabla 3.5, la cual equivale a $1.086,16 \text{ Kg/m}^3$. Sin embargo para la viscosidad, se utilizó un embudo y relacionando los tiempos de desalojo del agua y el lodo conjuntamente con la viscosidad del agua, ya conocida, se obtuvo la viscosidad promedio del lodo ($1,1397 \times 10^{-3} \text{ Kg/m.s}$).

Los puntos señalados en la figura 3.4 representan los dos tramos con los cuales se trabajó en la aplicación del teorema de Bernoulli, el tramo de succión con una tubería de 6" de diámetro desde el fondo de la tolva de lodos del Densadeg hasta la succión de la bomba y el tramo de descarga con una tubería de 4" desde la descarga de la bomba hasta la laguna de secado de lodos.

A. Velocidad de Conducción

Haciendo uso de la curva del fabricante de la bomba (figura B.8), se estableció un rango de caudales, de acuerdo a la frecuencia de operación de la misma (575 rpm), el cual va desde 300 a 400 gpm, utilizándolos en unidades de m^3/s , y conociendo el diámetro de la tubería se pudo obtener el área interna de la misma, leyéndola en tablas para tuberías de acero comercial y número de cédula 40 (tabla A.20), se calculó la velocidad de conducción del fluido por la tubería mediante la siguiente expresión:

$$Q = V \cdot A \quad (\text{Ec. 3.11})$$

Donde:

Q = caudal del fluido (m^3/s)

V = velocidad del fluido por la tubería (m/s)

A = área interna de la tubería (m^2)

Despejando la velocidad y utilizando un caudal de $0,0189 \text{ m}^3/\text{s}$ (300 gpm) para un área interna de $0,0186 \text{ m}^2$ de la tubería del tramo de succión ($\text{Ø}=6''$):

$$V = \frac{0,0189 \text{ m}^3/\text{s}}{0,0186 \text{ m}^2}$$

$$V = 1,0161 \text{ m}/\text{s}$$

Igualmente se calcularon las velocidades para el resto de los caudales fijados, tanto para el tramo de succión (tabla A.10) como para el tramo de descarga que cuenta con un área interna de $0,0082 \text{ m}^2$ ($\text{Ø}=4''$), reflejándose los resultados en la tabla A.11.

B. Número de Reynolds

Una vez obtenidas las velocidades, conociendo el diámetro de la tubería, densidad y viscosidad del lodo, se procedió a calcular el número de Reynolds:

$$N_{Re} = \frac{\rho \cdot V \cdot \phi}{\mu} \quad (\text{Ec. 3.12})$$

Donde:

N_{Re} = número de Reynolds

ρ = densidad del fluido (Kg/m^3)

V = velocidad de conducción (m/s)

ϕ = diámetro de la tubería (m)

μ = viscosidad del fluido (Kg/m.s)

Para el tramo de succión, con un caudal de $0,0189 \text{ m}^3/\text{s}$ (300 gpm) y un diámetro de tubería de $0,1541 \text{ m}$ ($\phi=6''$), se tiene:

$$N_{Re} = \frac{(1.086,16 \text{ Kg/m}^3)(1,0161 \text{ m/s})(0,1541 \text{ m})}{1,1397 \times 10^{-3} \text{ Kg/m.s}}$$

$$N_{Re} = 149.229.5246$$

Según el criterio teórico, el número de Reynolds obtenido indica que el flujo es turbulento. También se determinaron los distintos números de Reynolds para el rango de caudales fijados en ambos tramos del sistema: succión y descarga, reflejados en las tablas A.10 y A.11, respectivamente.

C. Factor de Fanning

El factor de fanning puede ser leído en el llamado diagrama de Moody (figura B.6) o también, puede ser determinado por medio de la expresión que se muestra a continuación:

$$f=4 \left[-3,6 \text{Log} \left[\left(\frac{6,9}{N_{Re}} \right) + \left(\frac{\xi/\phi}{3,7} \right)^{1,11} \right] \right]^{-2} \quad (\text{Ec. 3.13})$$

Donde:

f = factor de fanning

ξ = factor de rugosidad del material del cual está hecha la tubería (mm)

ϕ = diámetro de la tubería (mm)

Siguiendo con el ejemplo para el caudal de 0,0189 m³/s (300 gpm), con el número de Reynolds calculado anteriormente, un factor de rugosidad para la tubería de acero comercial de 0,002 mm tomado de la figura B.6 y utilizando el diámetro ya conocido de la tubería, el cual equivale a 154,1 mm:

$$f=4 \left[-3,6 \text{Log} \left[\left(\frac{6,9}{149.229,5246} \right) + \left(\frac{0,002 \text{ mm}/154,1 \text{ mm}}{3,7} \right)^{1,11} \right] \right]^{-2}$$

$$f=0,0165$$

El factor de fanning fue calculado de la misma manera para el resto de los caudales en el tramo de succión (tabla A.10) y en el tramo de descarga (tabla A.11).

D. Pérdidas de Presión debidas a Tuberías

Sabiendo, según la figura 3.4, que la longitud de la tubería de succión es de 8,836 m y de acuerdo con la ecuación 2.9, para el caudal que se ha venido desarrollando con una velocidad de 1,0161 m/s y el factor de fanning calculado anteriormente, se tienen las pérdidas por fricción en la tubería de succión:

$$h_L = \left(0,0165 \frac{8,836 \text{ m}}{0,1541 \text{ m}} \right) \frac{(1,0161 \text{ m/s})^2}{2 (9,8 \text{ m/s}^2)}$$

$$h_L = 0,0498 \text{ m}$$

Asimismo, se determinaron las pérdidas por fricción en ésta tubería de succión para los demás caudales fijados, mostrándose en la tabla A.10, mientras que en la tabla A.11 se encuentran las pérdidas por fricción de la tubería de descarga del sistema.

E. Pérdidas de Presión debidas a Válvulas y Accesorios

Las válvulas y accesorios con los que cuenta el sistema, divididos en el tramo de succión y en el tramo de descarga, se presentan en la tabla 3.9:

Tabla 11. Válvulas y accesorios presentes en el sistema de extracción de lodos.

Línea de servicio	Longitud (m)	Válvulas y accesorios	Cantidad	K
Succión (Ø=6")	8,8360	Codo 90°	3	30
		Válvula de	2	2,60
		diafragma	2	60
		T desviado	1	20
		T directo		
		Codo 90°	3	30

Descarga (Ø=4")	1.211,4200	Válvula	de	1	2,60
		diafragma		1	60
		T desviado		2	16
		Codo 45°			

Los valores del factor K se obtuvieron de la tabla A.21 y de acuerdo con la ecuación 2.10 se calculó el valor de las pérdidas de presión por válvulas y accesorios al trabajar con la sumatoria de los distintos valores de K, para el caudal de 300 gpm en el tramo de succión:

$$h_L = (90 + 5.2 + 120 + 20) (0,0165) \frac{(1,0161 \text{ m/s})^2}{2 (9,8 \text{ m/s}^2)}$$

$$h_L = 0,2043 \text{ m}$$

De la misma forma, se calcularon las pérdidas de presión por válvulas y accesorios para los demás caudales de la succión y luego de la descarga, mostrándose en las tablas A.10 y A.11, respectivamente.

F. Pérdidas de presión totales (tuberías, válvulas y accesorios)

Una vez calculadas las pérdidas de presión para tuberías y luego para válvulas y accesorios, se procedió a realizar la sumatoria de ambas, reflejándose al igual que los resultados anteriores en las tablas A.10 y A.11 para los tramos de succión y descarga:

$$\Sigma h_L = (0,0498 + 0,2043) \text{ m}$$

$$\Sigma h_L = 0,2541 \text{ m}$$

G. Balance de energía mecánica aplicado al sistema

Ordenando la ecuación 2.8, se puede despejar la carga del sistema para su posterior cálculo:

$$H = (Z_2 - Z_1) + \frac{(P_2 - P_1)}{\rho \cdot g} + \frac{(V_2^2 - V_1^2)}{2g} + h_{LT} \quad (\text{Ec. 3.14})$$

Donde:

h_{LT} = sumatoria de las pérdidas de presión por fricción en la succión y en la descarga (m)

Considerando que el punto 1 (figura 3.4) se encuentra en un recipiente de área muy grande con respecto al caudal manejado por la bomba, entonces se desprecia la velocidad en ese punto. Por otro lado, las presiones se cancelan, ya que ambos puntos se encuentran a presión atmosférica, tanto en el recipiente de succión como en la descarga a la laguna de secado de lodos, quedando la ecuación 3.14 de la siguiente forma:

$$H = (Z_2 - Z_1) + \frac{V_2^2}{2g} + h_{LT} \quad (\text{Ec. 3.15})$$

Se determinó la carga del sistema para cada caudal, ya que como se observa en la ecuación 3.15, depende de la velocidad manejada en la tubería de descarga. Se trabajó con una diferencia de altura máxima y una diferencia de altura mínima, las cuales se encuentran señaladas en la figura 3.4, como límites críticos del sistema. Sin embargo, se debe tener en cuenta, la elevación del terreno con respecto al nivel del mar:

- Punto 1: 19,8120 m (65 ft)
- Punto 2: 8,5344 m (28 ft)

Las diferencias de altura se toman sólo en el primer punto, ya que la bomba succiona de éste recipiente y por ende varía la altura del fluido. Por lo tanto para el punto 1, por ejemplo, la altura mínima, es:

$$Z_{1\text{mín}} = (1 + 19,8120) \text{ m}$$

$$Z_{1\text{mín}} = 20,8120 \text{ m}$$

De la misma forma, se calculó la altura máxima (25,212 m). Mientras que, para el punto 2, se calculó sólo una altura de 9,4744 m (sumatoria de la altura de la tubería con respecto al suelo '0,94 m' y la altura de la elevación del terreno con respecto al nivel del mar). Siguiendo con el ejemplo para el caudal de 300 gpm, se procedió a calcular la carga mínima del sistema, cabe resaltar que la sumatoria de las pérdidas por fricción totales para la descarga, se encuentran en la tabla A.11:

$$H_{\text{mín}} = (9,4744 - 20,8120) \text{ m} + \frac{(1,0161 \text{ m/s})^2}{2(9,8 \text{ m/s}^2)} + (0,2541 + 49,8251) \text{ m}$$

Como la diferencia de altura es, precisamente un diferencial, se toma el valor absoluto de esa resta, quedando la carga mínima del sistema como se muestra a continuación:

$$H_{\text{mín}} = 61,6878 \text{ m}$$

Así también, se calcularon tanto las cargas mínimas del sistema, como las cargas máximas para cada caudal del rango establecido en el estudio, mostrándose los resultados en la tabla 4.8.

H. Carga de diseño del sistema

Para determinar la carga de diseño del sistema se empleó la curva del fabricante de la bomba (figura B.8), donde se pudieron leer las caídas de presión del sistema para los caudales establecidos al interceptarlos con la curva de velocidad correspondiente (tabla A.12). Una vez leídas las caídas de presión, se procedió a utilizar la siguiente expresión para obtener el cabezal o la carga:

$$H = \frac{\Delta P \times F_4 \times g_c}{\rho \times g} \quad (\text{Ec. 3.16})$$

Donde:

ΔP = diferencial de presión (kPa)

Mostrándose como ejemplo el punto para el caudal de 300 gpm, con una caída de presión de 350 psi, equivalente a 2.413,1730 KPa, se obtuvo la carga de diseño:

$$H = \frac{(2.413,1730 \text{ kPa})(1) \left(1.000 \frac{\text{Kg}}{\text{kPa} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2} \right)}{\left(1.086,16 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right) (9,8 \text{ m/s}^2)}$$

$$H = 226,7089 \text{ m}$$

Igualmente, se hizo el mismo procedimiento para caudales de 320, 340 y 360 gpm (tabla 4.9), sin tomar en cuenta los caudales de 380 y 400 gpm, ya que no existía la posibilidad de interceptarlos con la curva de velocidad para leer la caída de presión. Posteriormente, se graficaron estos valores obtenidos y se

interceptaron con las curvas de las cargas del sistemas mínima y máxima, calculados anteriormente (figura 4.9).

I. Cálculo de $NPSH_D$

De acuerdo con la ecuación 2.12 y tomando en cuenta que la presión del recipiente de succión es atmosférica, la presión de vapor del líquido es de 4,2470 kPa, la cual pertenece al agua, ya que en la mezcla que conforma el lodo está hecha por agua y sólidos, la altura mínima de succión de la tubería es de 1 m, mientras que la altura de la succión de la bomba es de 0,6096 y las pérdidas por fricción en el tramo de succión se encuentran en la tabla A.10, entonces se pudo calcular el NPSH para el primer caudal del rango de estudio de la siguiente forma:

$$NPSH_D = \frac{(1) \left(\frac{1.000 \text{ Kg}}{\text{kPa} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2} \right)}{\left(\frac{1.086,16 \text{ Kg}}{\text{m}^3} \right) \left(\frac{9,8 \text{ m}}{\text{s}^2} \right)} \times (101,325 - 4,2470) \text{ kPa} + (1 - 0,6096) \text{ m} - (0,2541) \text{ m}$$

$$NPSH_D = 9,2565 \text{ m}$$

Los $NPSH_D$ correspondientes al resto de los caudales se obtuvieron siguiendo el mismo procedimiento del cálculo anterior y se muestran en la tabla 4.10 junto con el NPSH de diseño de la bomba (tabla A.22), los cuales se graficaron en función de los distintos caudales (figura 4.10).

Cabe resaltar que este estudio hidráulico para la bomba de extracción de lodos BV-208B se hizo para condiciones críticas de operación, ya que eran muy variables los rangos y condiciones operacionales, trabajando así en muchas ocasiones forzadamente.

3.3.2.2. Bomba de Recirculación de Lodos BV-204A

En la figura 3.5 se aprecia el diagrama hidráulico del sistema de recirculación de lodos

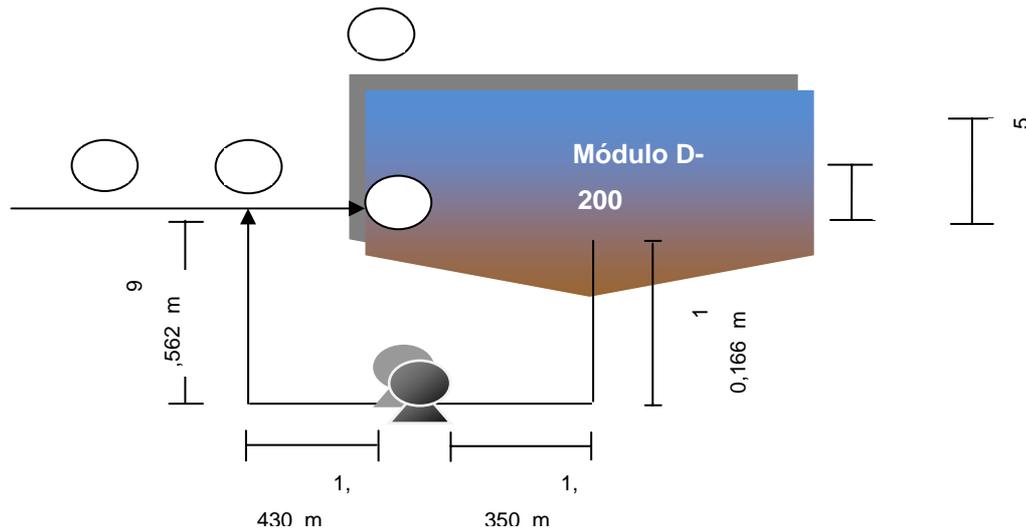


Tabla 12. Diagrama hidráulico de la bomba de recirculación de lodos BV-204A.

Donde:

Punto 1: superficie del sedimentador (recipiente)

Punto 2: entrada de la alimentación al módulo

Punto 3: encuentro entre la recirculación de lodos y la corriente de alimentación

Punto 4: corriente de alimentación proveniente de EBP-1

Para el estudio hidráulico de este sistema de recirculación de lodos fue necesario aplicar dos veces el teorema de Bernoulli, ya que sólo se conocía la presión operacional promedio del punto 4 (6 psi) y para evaluar dicho sistema, se necesitaba hacerlo desde el punto 1 hasta el punto 3. Por lo tanto, se desarrolló un balance de energía mecánica entre la superficie del recipiente (punto 1) y la entrada de alimentación al módulo (punto 2):

$$(Z_2 - Z_1) + \frac{g_c \times F_4}{g \times \rho} (P_2 - P_1) + \frac{(V_2^2 - V_1^2)}{2g} + h_f = 0 \quad (\text{Ec. 3.17})$$

Teniendo en cuenta de que en ese tramo no existen pérdidas de fricción por tuberías ni por válvulas y accesorios, y que la velocidad en el recipiente es tan pequeña debida a la magnitud del área del mismo, por ende se desprecia, entonces despejando la presión en el punto 2 y arreglando la ecuación anterior, se tiene:

$$P_2 = \left[(Z_1 - Z_2) + \frac{(V_2^2)}{2g} \right] \frac{g \times \rho}{g_c \times F_4} + P_1 \quad (\text{Ec. 3.18})$$

De acuerdo con lo reflejado en la figura 3.5 se tiene que para el punto 1 existe una altura de 5,40 m y para el punto 2 una altura de 1 m. Mientras que para la presión en el punto 1, se toma la atmosférica por ser un recipiente abierto. Por otra parte, se trabajó con un rango de distintos caudales operacionales para la corriente de recirculación de lodos (100 – 220 gpm) y con un promedio del caudal operacional de alimentación de agua cruda a la planta que es de 5.072,1063 gpm, el cual se le sumó a cada uno de los caudales correspondientes al rango ya establecido para la corriente de recirculación, como ejemplo se tiene:

$$Q = (100 + 5.072,1063) \text{ gpm}$$

$$Q = 5.172,1063 \text{ gpm} \times \frac{1 \text{ m}^3/\text{s}}{15.850,3321 \text{ gpm}}$$

$$Q = 0,3263 \text{ m}^3/\text{s}$$

El cálculo para la velocidad de conducción en el punto 2, se hizo de la misma manera que se explicó en la sección A correspondiente al apartado 3.3.2.1, sabiendo que el diámetro de la tubería de alimentación del agua cruda es de

0,5080 m ($\varnothing = 20''$) y el área de la misma es 0,1794 m² (tabla A.20). Los resultados obtenidos se muestran en la tabla A.13. Una vez obtenidas las velocidades correspondientes para cada caudal del rango, se procedió a utilizar la ecuación 3.18. Tomando como ejemplo la velocidad correspondiente al caudal calculado anteriormente:

$$P_2 = \left[(5,40-1) \text{ m} - \frac{(1,8188 \text{ m/s})^2}{2 (9,8 \text{ m/s}^2)} \right] \frac{(9,8 \text{ m/s}^2) (1,086,16 \text{ Kg/m}^3)}{(1) (1,000 \text{ Kg/kPa}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^2)} + 101,325 \text{ kPa}$$

$$P_2 = 146,3636 \text{ kPa}$$

Después de obtener la presión en el punto 2, se procedió a calcular la presión en el punto 3, sabiendo que según la figura 3.5:

$$P_2 = P_3 + P_4 \quad (\text{Ec. 3.19})$$

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente: la presión en el punto 4 es de 6 psi, equivalente a 41,3687 kPa:

$$P_3 = (146,3636 - 41,3687) \text{ kPa}$$

$$P_3 = 104,994 \text{ kPa}$$

El mismo procedimiento se aplicó para el resto de los caudales establecidos y los resultados de las presiones en el punto 2 y en el punto 3 se encuentran reflejados en la tabla A.13. Los cálculos del número Reynolds, factor de Fanning, pérdidas de fricción debidas a tuberías, pérdidas de presión debidas a válvulas y

accesorios y pérdidas de presión totales (tuberías, válvulas y accesorios), se desarrollaron exactamente igual a los procedimientos y cálculos explicados en la sección 3.3.2.1, pero tomando en cuenta los datos hidráulicos para éste sistema de recirculación de lodos, tales como los mostrados en la tabla 3.10.

Tabla 13. Válvulas y accesorios presentes en el sistema de recirculación de lodos.

Línea de servicio	Longitud (m)	Válvulas y accesorios	Cantidad	K
Succión (Ø=6")	11,5160	Codo 90°	3	30
		Válvula de diafragma	1	2,60
		T desviado	2	60
		Codo 45°	1	16
Descarga (Ø=4")	10,9920	Codo 90°	3	30
		Válvula de diafragma	1	2,60
		T desviado	1	60
		Codo 180°	1	5

Los resultados obtenidos de estos cálculos, se encuentran reflejados en las tablas A.14 y A.15, para los tramos de succión y descarga, respectivamente.

Con respecto al balance de energía mecánica aplicado al sistema, se usó la ecuación 2.7, teniendo presente las consideraciones antes descritas para el punto 1 en este sistema y tomando en cuenta las distintas presiones obtenidas para el punto 3 (tabla A.13), así como las pérdidas de presión totales. Por otra parte, cabe resaltar que ambos puntos de interés en el sistema, se encuentran tan cercanos, que el terreno tiene la misma elevación de altura con respecto al nivel del mar (19,8120 m) y las alturas máximas y mínimas establecidas fueron las mismas que las del sistema de extracción de lodos y se muestran igualmente en la figura 3.5, mientras que para el punto 2 se tiene una altura de 0,79 m y se calculan como se describió en el apartado G de la sección 3.3.2.1, quedando:

$$Z_{1\min} = 20,8120 \text{ m}$$

$$Z_{1\text{m}\acute{\text{a}}\text{x}} = 25,2120 \text{ m}$$

$$Z_2 = 20,6020 \text{ m}$$

Una vez definidos los datos, se procedió a calcular las distintas cargas mínimas y máximas del sistema (ver apartado G de la sección 3.3.2.1), mostrándose los resultados en la tabla 4.11, donde seguidamente se construyó una gráfica de dichas cargas con respecto a los caudales estudiados. Para el cálculo de la carga de diseño del sistema, se procedió a realizar el procedimiento descrito para la bomba de extracción de lodos (ver apartado H de la sección 3.3.2.1), los resultados se muestran en la tabla 4.12, y la gráfica generada se muestra en la figura 4.11, así como las gráficas de cargas mínimas y máximas.

Por último, para el cálculo de $NPSH_D$ se aplicó el mismo procedimiento descrito en la bomba de extracción de lodos BV-208B, recalando que la diferencia de altura mínima entre la succión de la tubería y la succión de la bomba es la misma, ya que la tolva de lodos nunca puede quedar vacía y los demás datos permanecen iguales por tratarse del mismo fluido, a excepción de las pérdidas en el tramo de succión (tabla A.14). Los resultados del $NPSH_D$ para cada caudal se muestran en la tabla 4.13 y la curva obtenida se muestra junto con la de diseño en la figura 4.12.

A diferencia del estudio hidráulico de la bomba de extracción BV-208B, el estudio para la bomba de recirculación BV-204A se hizo para condiciones normales de operación, ya que las mismas tendían a variar muy poco, debido a que la recirculación de lodos al sistema debe tratar de mantenerse constante en un 3% y por ende era difícil que la trabajaran al máximo en condiciones críticas.

3.4. Propuestas de Mejoras al Sistema de Recirculación y Extracción de Lodos en el Módulo Densadeg D-200

De acuerdo con los estudios y cálculos realizados y descritos anteriormente, así como las necesidades presentadas por el sistema de recirculación y extracción de lodos del módulo D-200, se realizaron propuestas de mejoras, las cuales se consideraron prioritarias y se muestran en la sección 4.4.

CAPÍTULO IV

DISCUSIÓN DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Discusión de Resultados

4.1.1. Cálculo del Caudal, el Tiempo y la Frecuencia de Extracción de Lodos mediante el Balance de Masa del Proceso de Coagulación-Floculación

4.1.1.1. Caudal de Extracción

Los caudales de extracción de lodos obtenidos, se muestra en la tabla 4.1, observándose significativas diferencias entre unos y otros, teniendo desde valores muy bajos cercanos a cero hasta valores altos, lo cual indicó la diversidad de las condiciones de operación para los días estudiados.

Tabla 14. Caudales de extracción de lodos en el tiempo de estudio establecido.

Fecha	Q_7 (m ³ /h)
17/05/2010	0,4484
24/05/2010	0,0911
31/05/2010	1,0705
07/06/2010	4,3430
14/06/2010	0,3974
21/06/2010	20,8029
28/06/2010	2,2861
06/07/2010	15,7999
07/07/2010	12,7907
12/07/2010	0,3876
15/07/2010	0,3162
19/07/2010	0,4067
26/07/2010	0,9437
02/08/2010	2,1585
09/08/2010	0,8666

11/08/2010	0,7006
13/08/2010	1,9162
17/08/2010	6,3061
18/08/2010	1,3501
23/08/2010	1,7950

En la figura 4.1 se puede observar el comportamiento de los caudales de extracción para cada día correspondiente, donde se aprecia que la tendencia no fue lineal ni uniforme, sino que presenta picos altos, registrándose los mayores para los días 21/06/2010, 06/07/2010, 07/07/2010 y 17/08/2010 con caudales de 20,8029; 15,7999; 12,7909 y 6,3091 m³/h, respectivamente, indicando un mayor flujo de extracción, a diferencia del resto de los días, donde se mantiene un promedio bajo de caudales entre 0 y 4 m³/h. Esto se debe al hecho de que al momento de extraer los lodos, los mismos se encontraban espesados. Mientras que el registro de los altos picos, se debe posiblemente, a que en el momento de tomar la muestra de lodos para determinar los sólidos suspendidos, los mismos se encontraban dispersos y probablemente tenían muy poco tiempo de haberse formado.

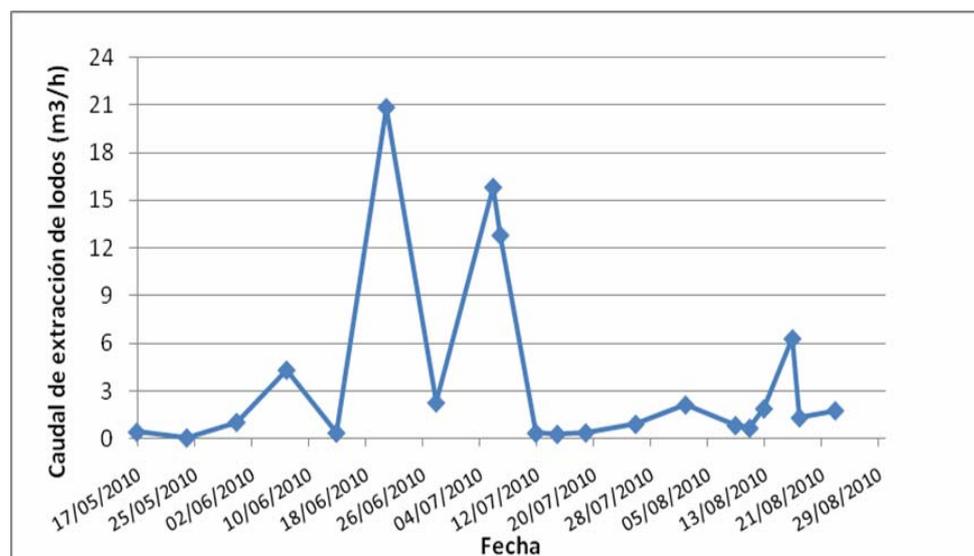


Figura 14. Caudales de extracción de lodos obtenidos en el tiempo de estudio.

En la figura 4.2 se muestran los caudales de extracción con respecto a la cantidad de sólidos suspendidos.

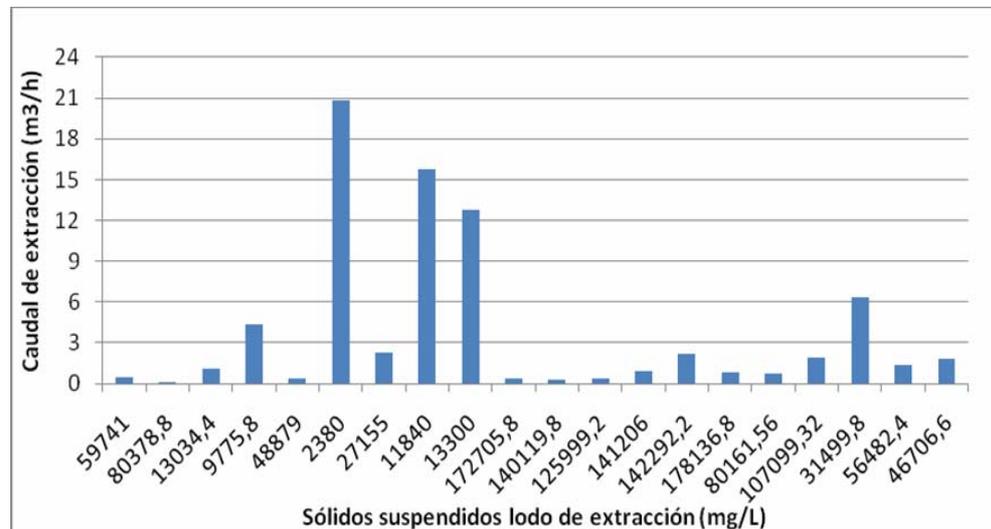


Figura 15. Caudales de extracción con respecto a los sólidos suspendidos en la corriente de extracción de lodos.

Se observa que el comportamiento general de los caudales es bajo con respecto a cantidades significativamente altas de sólidos suspendidos, ya que se trata de un fluido o pasta muy espesa y por ende el caudal de trabajo de la bomba de extracción es menor. Lo contrario sucede para los días donde se registraron cantidades bajas de sólidos suspendidos tales como 2.380, 11.840, 13.300 y 31.499,8 mg/L para las cuales corresponden los caudales más altos, lo cual indica una mayor fluidez del fluido, corroborando de esta manera lo explicado anteriormente.

4.1.1.2. Tiempo de Extracción

En la tabla 4.2 se pueden observar los tiempos de extracción correspondientes para cada uno de los días del estudio con sus respectivas concentraciones de lodos.

Tabla 15. Tiempo de extracción de lodos de acuerdo al caudal de extracción obtenido.

Fecha	T _E (h)	Concentración de lodos (mg/L)
17/05/2010	3,1222	59.738,80
24/05/2010	15,3679	80.375,84
31/05/2010	1,3079	13.033,92
07/06/2010	0,3224	9.775,44
14/06/2010	3,5228	48.877,20
21/06/2010	0,0673	2.380,00
28/06/2010	0,6124	27.154,00
06/07/2010	0,0886	11.840,00
07/07/2010	0,1095	13.300,00
12/07/2010	3,6121	172.699,44
15/07/2010	4,4277	140.114,64
19/07/2010	3,4423	125.994,56
26/07/2010	1,4836	141.200,80
02/08/2010	0,6486	142.286,96
09/08/2010	1,6155	178.130,24
11/08/2010	1,9983	80.158,61
13/08/2010	0,7306	107.095,38
17/08/2010	0,2220	31.498,64
18/08/2010	1,0370	56.480,32
23/08/2010	0,7800	46.704,88

En la figura 4.3 se muestra la tendencia de los tiempos de extracción correspondientes para cada caudal, donde se puede apreciar que el mayor tiempo registrado con un valor de 15,3679 h corresponde al menor caudal obtenido anteriormente con un valor de 0,0911 m³/h. Mientras que el menor tiempo registrado, el cual ni se alcanzó a divisar en la gráfica es de 0,0673 h y corresponde al mayor caudal registrado de 20,8029 m³/h. Esto se debe al hecho de que la bomba tarda más extrayendo un lodo tan espeso y viscoso con grandes cantidades de sólidos suspendidos, debido a que tiene que hacer un mayor esfuerzo de trabajo.

Sin embargo, para lodos con presencias menores de sólidos suspendidos la bomba trabaja con menor esfuerzo y más rápidamente. Por lo tanto, se observa que a menores caudales, el tiempo de extracción es mayor, mientras que para caudales mayores se tiene un menor tiempo de extracción. Recordando que los caudales fueron obtenidos en función de la cantidad de sólidos presentes en ellos.

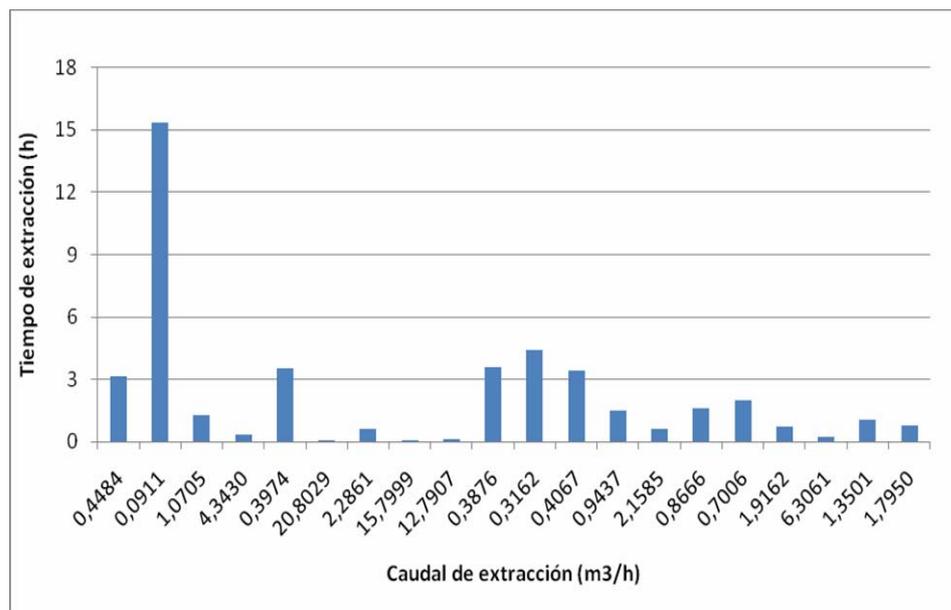


Figura 16. Tiempo de extracción en función de los caudales de extracción de lodos.

4.1.1.3. Frecuencia de extracción

La frecuencia de extracción indica cada cuánto tiempo se deben extraer lodos de la unidad de clarificación del proceso. Esta frecuencia depende de la cantidad de sólidos suspendidos que entra al proceso en la corriente de agua cruda, debido a que estos sólidos son los responsables de la formación de lodos. En la tabla 4.3, se encuentran las frecuencias de extracción para los días de trabajo en función de las concentraciones de lodos correspondientes.

Según los resultados mostrados la mayor frecuencia de extracción está registrada para el día 24/05/2010 con un valor de 179,5899 h, lo cual se evidencia mejor en la figura 4.4. Para este día corresponde el menor caudal de extracción ($0,0911 \text{ m}^3/\text{h}$) y un alto contenido de sólidos suspendidos en el lodo de esta corriente con un valor de $80.378,8 \text{ mg/L}$, es decir, que el sistema tarda todo ese tiempo en volver a acumular el lodo necesario para que ocurra una nueva extracción, si se mantienen esas condiciones de operación.

Tabla 16. Frecuencia de extracción de lodos para el tiempo de estudio establecido.

Fecha	T _{FE} (h)	Concentración de lodos (mg/L)
17/05/2010	42,5802	59.738,80
24/05/2010	179,5899	80.375,84
31/05/2010	78,8051	13.033,92
07/06/2010	39,9996	9.775,44
14/06/2010	72,6515	48.877,20
21/06/2010	30,4759	2.380,00
28/06/2010	25,5997	27.154,00
06/07/2010	7,7646	11.840,00
07/07/2010	8,3576	13.300,00
12/07/2010	21,7954	172.699,44
15/07/2010	38,0537	140.114,64
19/07/2010	26,7170	125.994,56
26/07/2010	11,2735	141.200,80
02/08/2010	4,9507	142.286,96
09/08/2010	10,0570	178.130,24
11/08/2010	26,1286	80.158,61
13/08/2010	7,5861	107.095,38
17/08/2010	7,6383	31.498,64
18/08/2010	19,0749	56.480,32
23/08/2010	16,6232	46.704,88

Se debe tener en cuenta que en el período de sequía o verano, la formación de lodos en el sistema es muy lenta o escasa, ya que el agua cruda que entra, por lo general, tiene una turbidez muy baja debido a la poca cantidad de sólidos

suspendidos en ella y el hecho de que la cantidad de sólidos suspendidos para el día antes citado sea alta se debe a que mientras más tiempo pase el lodo acumulado en la tolva, más espeso se vuelve.

Caso opuesto se tiene para los días que presentan una menor frecuencia de extracción, teniendo caudales de extracción mayores, es decir, que la formación de un lodo más líquido y con menos presencia de sólidos necesita de menor tiempo y como consecuencia se llena la tolva rápidamente, requiriendo así una menor frecuencia entre las extracciones. Esto es debido al hecho de que había comenzado el período de lluvias o invierno y los sólidos suspendidos en la entrada tendían a aumentar, produciendo así una generación de lodos en tiempos menores, presentándose ocasiones donde no se llegaban a espesar significativamente por pasar poco tiempo en la tolva.

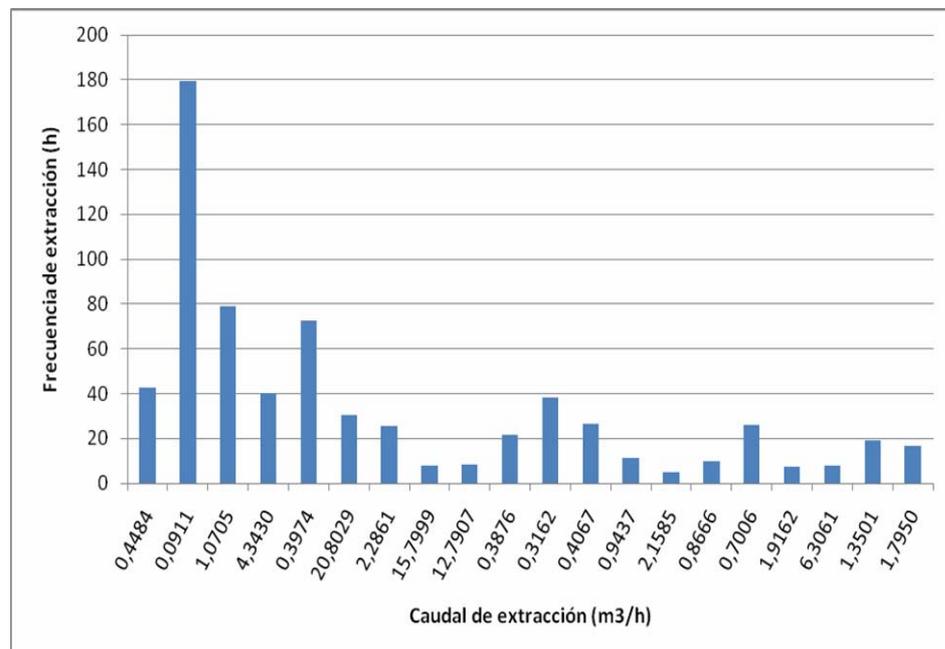


Figura 17. Frecuencia de extracción en función del caudal de extracción de lodos.

Los resultados de los caudales, tiempos y frecuencias de extracción fueron los que debieron haberse aplicado en el proceso para las condiciones de

operaciones estudiadas en los días establecidos. Sin embargo, no fue así ya que los operadores no llevan un control de estos parámetros y lo realizan manualmente bajo criterios propios o guiándose por los toma muestras de los aforos del nivel de lodo.

4.1.2. Comparación de los Valores de la Carga Superficial, Porcentaje de Remoción de Sólidos, Velocidad de Sedimentación y Flujo Másico de Extracción de Lodos Operacionales con Respecto a los Valores de Diseño

4.1.2.1. Carga Superficial

La carga superficial se refiere al índice de desbordamiento que puede tener la unidad del sedimentador. En la tabla 4.4, se muestran tanto los valores de las distintas cargas superficiales obtenidas para el tiempo de estudio (C_s), así como el valor de la carga superficial de diseño (C_{SD}) para el caudal nominal del proceso.

Cuando se expresan los resultados en forma gráfica (figura 4.5), se puede observar que en ningún momento las cargas superficiales de operación sobrepasan a la carga superficial de diseño. Es decir, que la planta no presentó problemas de desbordamiento durante el tiempo de estudio, ya que los caudales manejados siempre estuvieron por debajo del caudal nominal (400 L/s), manteniéndose de esta manera, dentro de los límites de diseño y asegurando un buen funcionamiento operacional del módulo D-200.

Tabla 17. Carga superficial obtenida en la unidad de sedimentación.

Fecha	C_s ($m^3/m^2.h$)
17/05/2010	16,9412
24/05/2010	17,7882
31/05/2010	14,1882
07/06/2010	16,9412
14/06/2010	16,2000

21/06/2010	16,6765
28/06/2010	15,8824
06/07/2010	18,0000
07/07/2010	20,1176
12/07/2010	18,0000
15/07/2010	15,8824
19/07/2010	16,4118
26/07/2010	17,1000
02/08/2010	19,0588
09/08/2010	14,8235
11/08/2010	14,5059
13/08/2010	16,9412
17/08/2010	18,5294
17/08/2010	18,5294
18/08/2010	18,3176
23/08/2010	17,4706
C_{SD} (m³/m².h)	21,1765

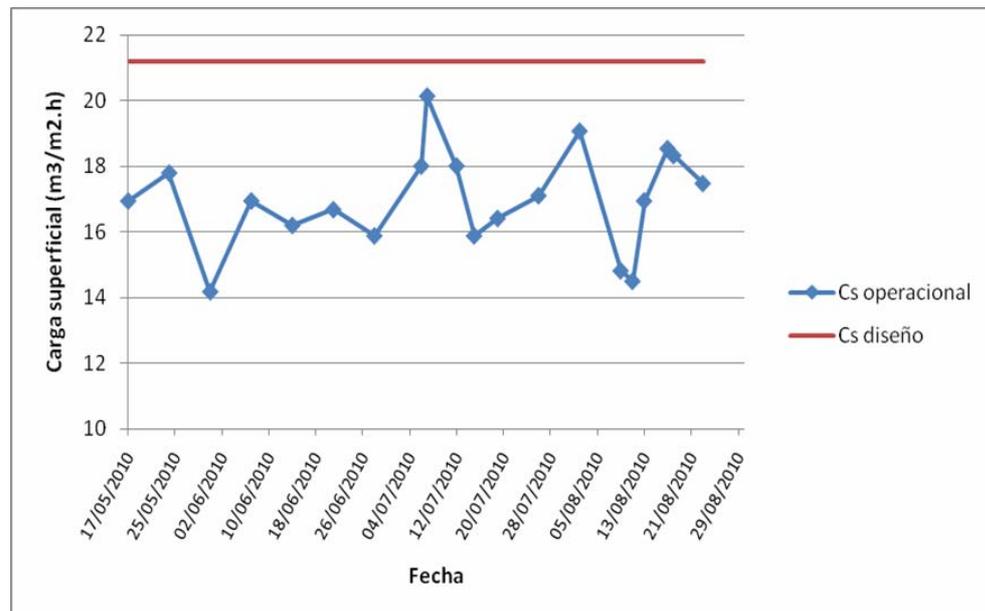


Figura 18. Cargas superficiales operacionales y de diseño del sistema.

4.1.2.2. Porcentaje de Remoción de Sólidos

El porcentaje de remoción de sólidos se refiere a la eficiencia que tiene el sedimentador para retener los sólidos suspendidos que entran con el agua cruda. En la tabla 4.5 se muestran los porcentajes de remoción de sólidos ($\%R_S$) para distintos días junto con los porcentajes de remoción por diseño mínimo ($\%R_{SD\text{mín}}$), promedio ($\%R_{SD\text{prom}}$) y máximo ($\%R_{SD\text{máx}}$) que deben existir para que la planta funcione adecuadamente.

Tabla 18. Porcentaje de remoción de sólidos obtenidos en la unidad de sedimentación.

Fecha	$\%R_S$	$\%R_{SD\text{mín}}$	$\%R_{SD\text{prom}}$	$\%R_{SD\text{máx}}$
17/05/2010	48,38	58,33	84,37	98,98
24/05/2010	-28,57			
31/05/2010	20,00			
07/06/2010	81,81			
14/06/2010	36,84			
21/06/2010	77,27			
28/06/2010	87,27			
06/07/2010	90,62			
07/07/2010	86,46			
12/07/2010	82,45			
15/07/2010	86,48			
19/07/2010	66,66			
26/07/2010	91,37			
02/08/2010	95,78			
09/08/2010	94,66			
11/08/2010	79,66			
13/08/2010	95,97			
17/08/2010	93,67			
18/08/2010	82,81			
23/08/2010	77,92			

Se observa en los resultados expuestos que para el día 24/05/2010 el porcentaje de remoción de sólidos arrojó un valor de negativo de -28,57%, esto quiere decir que para ese día la cantidad de sólidos suspendidos en la salida de la unidad de clarificación fue mayor que la cantidad de sólidos suspendidos en el

agua cruda de la corriente de entrada de dicha unidad, lo cual se aprecia mejor en la figura 4.6. Esto fue debido a que para ese día los sólidos suspendidos del agua cruda eran tan pocos que el efecto de la dosis de coagulante se invertía y en vez de neutralizar las partículas o coloides negativos de estos sólidos desestabilizándolos, se producía un exceso de carga positiva volviendo de esta manera a estabilizarlos y dificultando su retención en el sedimentador, ya que el floculante no podía unirlos por presentar igualmente carga positiva.

También se observan tres puntos más en la gráfica que se encuentran por debajo del nivel mínimo de remoción de sólidos (48,38%; 20,00%; y 36,84%), indicando que no se logró una buena retención de los mismos en el sedimentador debido a las bajas dosis de coagulante y floculante aplicadas, y por lo tanto, el agua clarificada a la salida de esta unidad resultó fuera de especificación presentando una turbidez mayor que la deseada, si se recuerda que los sólidos suspendidos son los responsables de la misma.

Sin embargo, el resto de los días se mantuvo una remoción de sólidos dentro de los límites de diseño, teniendo así un agua clarificada dentro de especificación en la salida de la unidad de clarificación evidenciado por la eficiencia de la misma y asegurando un buen funcionamiento del módulo D-200 en ésta área.

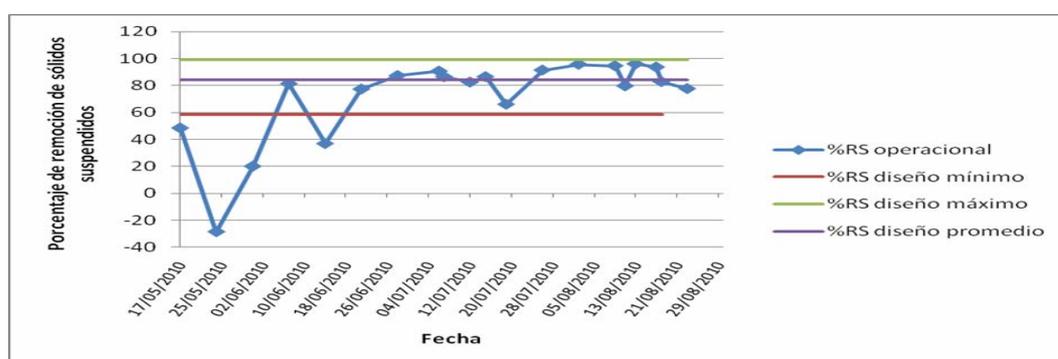


Figura 19. Porcentajes de remoción de sólidos suspendidos para los días estudiados.

4.1.2.3. Velocidad de Sedimentación

Las velocidades de sedimentación operacionales (V_s) se muestran en la tabla 4.6 junto a la velocidad de sedimentación de diseño (V_{SD}), la cual se obtuvo de las características de diseño del módulo D-200 (tabla C.1).

Tabla 19. Velocidades de sedimentación manejadas en el proceso de la planta D-200.

Fecha	V_s (cm/min)
23/08/2010	3,33
24/08/2010	3,80
25/08/2010	3,23
26/08/2010	3,35
27/08/2010	2,59
30/08/2010	2,53
V_{SD} (cm/min)	39,35

Cuando se graficaron los valores presentados en la tabla anterior, como se muestra en la figura 4.7, puede apreciarse que las velocidades de sedimentación operacionales son todas muy parecidas presentando una tendencia lineal, pero muy por debajo de la velocidad de sedimentación de diseño, lo que quiere decir que para los días estudiados la sedimentación no era significativamente efectiva, ya que para el tiempo de residencia la cantidad de flóculos sedimentados era muy baja con respecto a la esperada, como se observó al momento de hacer el ensayo, pudiendo ocasionar arrastre de flóculos hacia el agua clarificada, ya que los mismos no sedimentaban en su mayoría. Es decir, que con las velocidades determinadas, se necesita de un mayor tiempo de sedimentación para obtener los resultados deseados, y como estos tiempos de retención no se pueden cambiar, se tendría que mejorar la obtención del tamaño del flóculo que sedimentará para cumplir la velocidad requerida según el diseño.

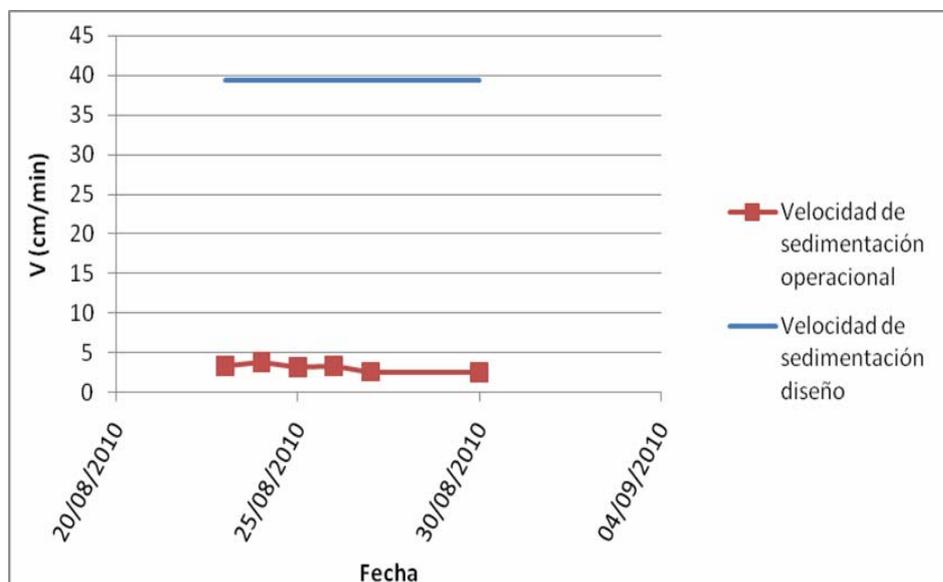


Figura 20. Velocidades de sedimentación operacionales y de diseño en el sedimentador del sistema.

Cabe resaltar que el tiempo de estudio para la velocidad de sedimentación fue distinto al tiempo de estudio del resto de los parámetros correspondientes a este objetivo. Asimismo, se debe tener en cuenta que el método utilizado es gráfico y los resultados pueden variar dependiendo de la apreciación al momento de construir la gráfica. El programa excel traza la gráfica tocando todos los puntos, mientras que manualmente se busca trazar la mejor curva sin necesidad de tocar cada punto y esto influye en la tendencia de la tangente trazada, variando los resultados.

4.1.2.4. Flujo Másico de Extracción de Lodos

Por medio del balance de masa desarrollado en la sección 3.3.1, fue posible conocer los valores de flujo másico para la corriente de extracción de lodos (F_7), mostrándose en la tabla 4.7, conjuntamente con el flujo másico de diseño (F_{ED}) para el lodo:

Tabla 20. Flujos máxicos de extracción de lodos obtenidos en el módulo D-200, así como de diseño.

Fecha	F₇ (Kg/h)
17/05/2010	26,7871
24/05/2010	7,3222
31/05/2010	13,9522
07/06/2010	42,4551
14/06/2010	19,4243
21/06/2010	49,5109
28/06/2010	62,0761
06/07/2010	187,0707
07/07/2010	170,1166
12/07/2010	66,9368
15/07/2010	44,3033
19/07/2010	51,2420
26/07/2010	133,2471
02/08/2010	307,1204
09/08/2010	154,3714
11/08/2010	56,1577
13/08/2010	205,2123
17/08/2010	198,6348
18/08/2010	76,2525
23/08/2010	83,8339
F_{ED} (Kg/h)	572,5000

Se puede apreciar en los resultados anteriores que ninguna de las condiciones operacionales, incluyendo el valor más alto obtenido de 307,1204 Kg/h, sobrepasó el límite de flujo máxico de diseño indicado y al graficarlos para los distintos días, se comprobó lo dicho (figura 4.8). Es decir, que trabajar bajo las condiciones estudiadas no presentó algún riesgo para el sistema de recirculación y extracción de lodos, ya que la tolva contenedora del mismo tiene capacidad suficiente para manejar estas cantidades de flujos máxicos calculadas, asegurando que el lodo en ningún momento desbordará la tolva y contaminará al agua clarificada.

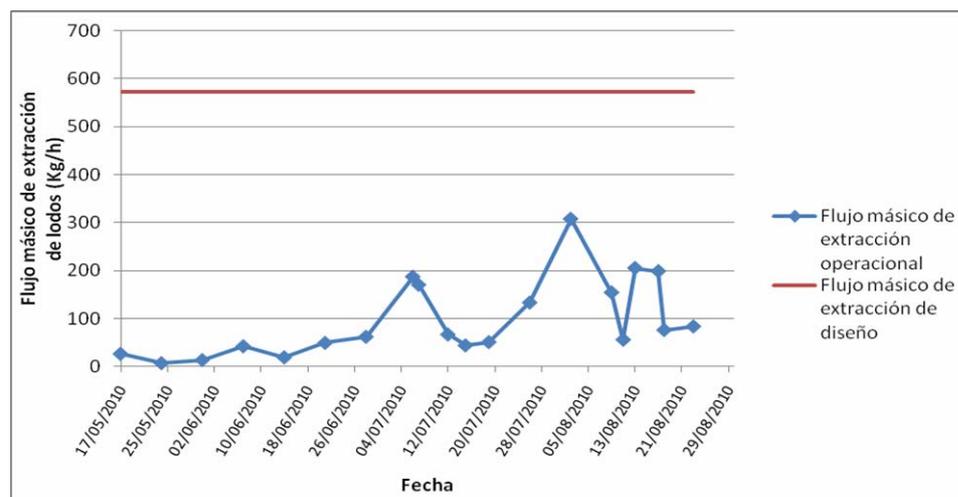


Figura 21. Flujos másicos operacionales y de diseño de la corriente de extracción de lodos.

4.1.3. Estudio de los Instrumentos para el Control del Nivel de Lodos así como el Desempeño de las Bombas del Sistema

4.1.3.1. Instrumentos para el Control del Nivel de Lodos

Por medio de entrevistas no estructuradas al personal capacitado de la planta, como operadores e instrumentistas se conocieron las razones que explican la ausencia de los instrumentos de control de la capa de lodos y a través de visitas e inspecciones al módulo Densadeg D-200, se comprobó lo dicho en las entrevistas. Es decir, ni las sondas de nivel ni el interruptor de torque se encontraban en el sitio donde debían estar.

En el caso de las sondas de nivel, se pudo apreciar el panel de control en un estado de deterioro, mientras que los electrodos encargados directamente de la detección del nivel debieron de ser retirados por presentar fallas y averías, debido a las incrustaciones de lodo formadas en su superficie. Por otra parte, el interruptor de torque, igualmente debió ser retirado por presentar fallas mecánicas, ya que se activaba constantemente provocando una desalineación entre el motor del raspador de lodos y el reductor de esfuerzo, por el hecho de haber acoplado

directamente éstas dos últimas partes para evitar el desgaste excesivo de la correa de la polea del sistema.

4.1.3.2. Bomba de Extracción de Lodos BV-208B

Con la velocidad de operación en rpm y la curva del fabricante (figura B.8) de la bomba se obtuvieron las cargas del sistema para condiciones mínimas (H_{\min}) y máximas (H_{\max}) a las cuales el mismo podía operar bajo un rango de caudales. Las cargas del sistema obtenidas se muestran en la tabla 4.8.

Tabla 21. Cargas mínimas y máximas del sistema hidráulico de la bomba de extracción de lodos BV-208B del módulo D-200 en un rango de caudales establecido a velocidad de 575 rpm.

Caudal		H_{\min} (m)	H_{\max} (m)
(gpm)	(m^3/s)		
300	0,0189	61,6878	66,0878
320	0,0202	68,1559	72,5559
340	0,0215	74,9799	79,3799
360	0,0227	81,5920	85,9920
380	0,0240	89,0918	93,4918
400	0,0252	96,3232	100,7232

Sin embargo, el límite de operación de la bomba lo proporciona la carga de diseño (H_{Dis}) del sistema, la cual se pudo conocer por la curva y datos otorgados por el fabricante para el mismo rango de caudales estudiados y se refleja en la tabla 4.9.

Tabla 22. Carga de diseño del sistema hidráulico para la bomba de extracción de lodos BV-208B con respecto los caudales respectivos para una velocidad de 575 rpm.

Caudal		H _{Dis} (m)
(gpm)	(m ³ /s)	
300	0,0189	226,7089
320	0,0202	187,8445
340	0,0215	142,5027
360	0,0227	58,2965

La curva de la carga de diseño del sistema se interceptó con las cargas del sistema mínimas y máximas anteriormente obtenidas y graficadas, y esto permitió delimitar los valores máximo y mínimo de caudal que puede entregar la bomba para dicho sistema. Es decir, que para una velocidad de 575 rpm la bomba puede trabajar hasta un caudal de 355,8 gpm, aproximadamente, para condiciones mínimas de carga y un caudal de 354 gpm para condiciones máximas de carga.

Sin embargo, para las condiciones de operación bajo las cuales trabaja esta bomba de extracción de lodos (BV-208B) con una velocidad de 575 rpm, se observó que estaba siendo forzada, de acuerdo con las especificaciones de la hoja del fabricante (tabla A.22) y basándose en la teoría expuesta, ya que para fluidos muy abrasivos y viscosos como lo es el lodo, se debe trabajar a velocidades bajas como las indicadas por el fabricante, debido a que la abrasividad del fluido a altas velocidades tiende a erosionar el tornillo y otras partes de la bomba ocasionando su más pronto deterioro y disminuyendo así la vida útil del equipo.

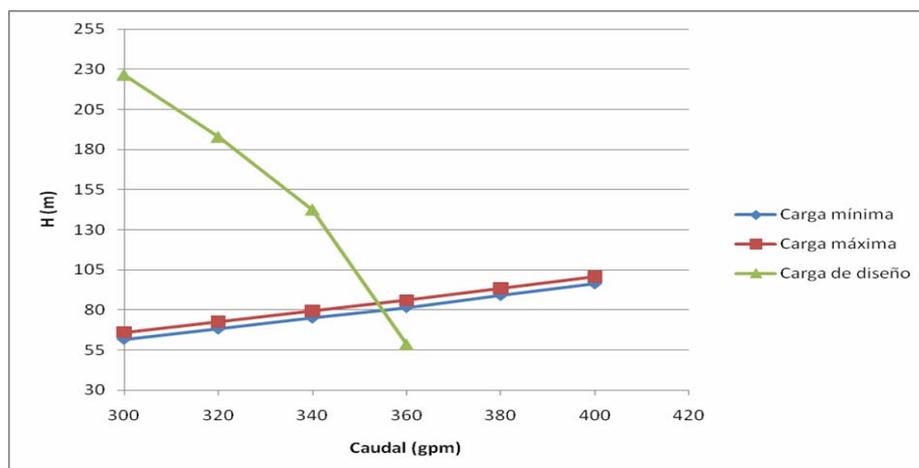


Figura 22. Cargas mínima, máxima y de diseño del sistema hidráulico de extracción de lodos para una velocidad de 575 rpm.

Por otra parte, siguiendo la evaluación hidráulica para la bomba de extracción, se hizo la comparación de la carga neta de succión disponible ($NPSH_D$) para el sistema en los distintos caudales de operación con respecto a la carga neta de succión requerida ($NPSH_R$) dada por el fabricante de la bomba, mostrándose en la tabla 4.10.

Tabla 23. NPSH disponible y requerido para la bomba de extracción de lodos BV-208B a una velocidad de 575 rpm.

Caudal		$NPSH_D$ (m)	$NPSH_R$ (m)
(gpm)	(m^3/s)		
300	0,0189	9,2565	3,7186
320	0,0202	9,2241	
340	0,0215	9,1899	
360	0,0227	9,1569	
380	0,0240	9,1194	
400	0,0252	9,0833	

Una vez graficados los valores de la tabla anterior para las cargas netas de succión con respecto a los caudales, se apreció que el $NPSH_R$ es mucho menor que el $NPSH_D$ y las curvas obtenidas no se llegaron a interceptar en el rango de caudales estudiado, lo que significó que la bomba de extracción BV-208B no cavitó en ningún momento, pudiendo trabajar sin problemas de este tipo.

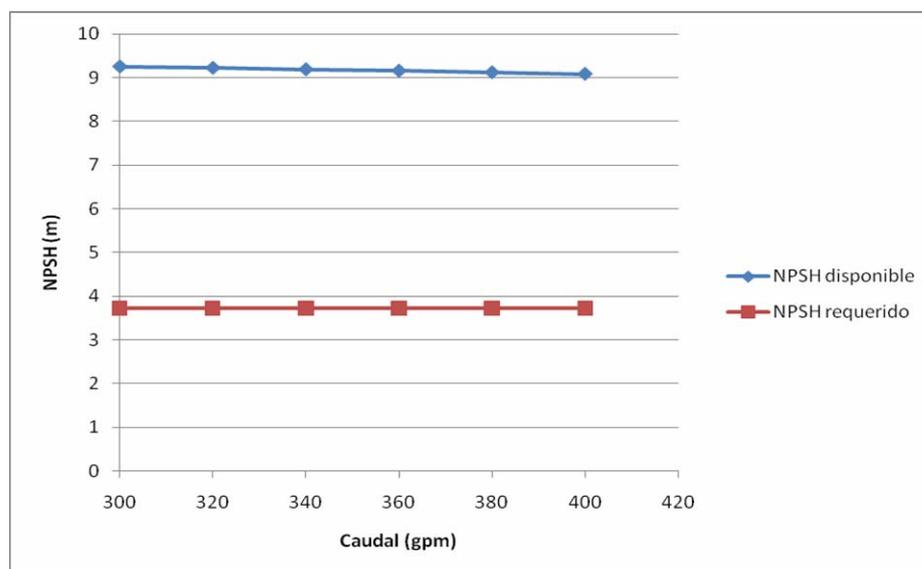


Figura 23. NPSH disponible y requerido para la bomba de extracción de lodos BV-208B a velocidad de 575 rpm.

4.1.3.3. Bomba de Recirculación de Lodos BV-204A

Para el estudio hidráulico de la bomba de recirculación de lodos se obtuvieron las cargas mínimas y máximas a las cuales puede trabajar el sistema para una velocidad de 200 rpm ejercida por la bomba, estas cargas se muestran en la tabla 4.11.

Tabla 24. Cargas mínimas y máximas del sistema hidráulico de la bomba de recirculación de lodos BV-204A del módulo D-200 en un rango de caudales establecido para una velocidad de 200 rpm.

Caudal		$H_{\text{mín}}$ (m)	$H_{\text{máx}}$ (m)
(gpm)	(m^3/s)		
100	0,0063	4,0907	8,4907
125	0,0079	4,1809	8,5809
150	0,0095	4,2911	8,6911
175	0,011	4,4121	8,8121
200	0,0126	4,5598	8,9598
220	0,0139	4,6938	9,0938

Igualmente, en la tabla 4.12, se muestran las diferentes cargas por diseño obtenidas usando la curva del fabricante (figura B.10) para los caudales correspondientes, observándose que presentó valores mucho mayores que las cargas mínimas y máximas del sistema.

Tabla 25. Carga de diseño del sistema hidráulico para la bomba de recirculación de lodos BV-204A con respecto a los caudales respectivos para una velocidad de 200 rpm.

Caudal		H_{Dis} (m)
(gpm)	(m^3/s)	
100	0,0063	64,7740
125	0,0079	61,5353
150	0,0095	55,0579
175	0,011	42,1031
200	0,0126	25,9096
220	0,0139	3,2387

Sin embargo, en las gráficas de las curvas de cargas mínimas y máximas, así como la de diseño, se tuvo que ésta última interceptó a las dos primeras, ya que los valores de carga de diseño iban disminuyendo hasta alcanzar un punto significativo que indicó el corte (figura 4.11). Este punto delimitó el caudal máximo y mínimo, 214 gpm y 218 gpm, respectivamente, que puede entregar la bomba al sistema cuando se trabajaba a una velocidad de 200 rpm.

De acuerdo con las especificaciones dadas por el fabricante del equipo (tabla A.23), se pudo comprobar que este sistema se encontraba trabajando en condiciones adecuadas, es decir, a una baja velocidad teniendo en cuenta las propiedades de abrasividad y viscosidad del lodo, lo cual arrojó como resultado un funcionamiento adecuado para la recirculación del mismo a la planta.

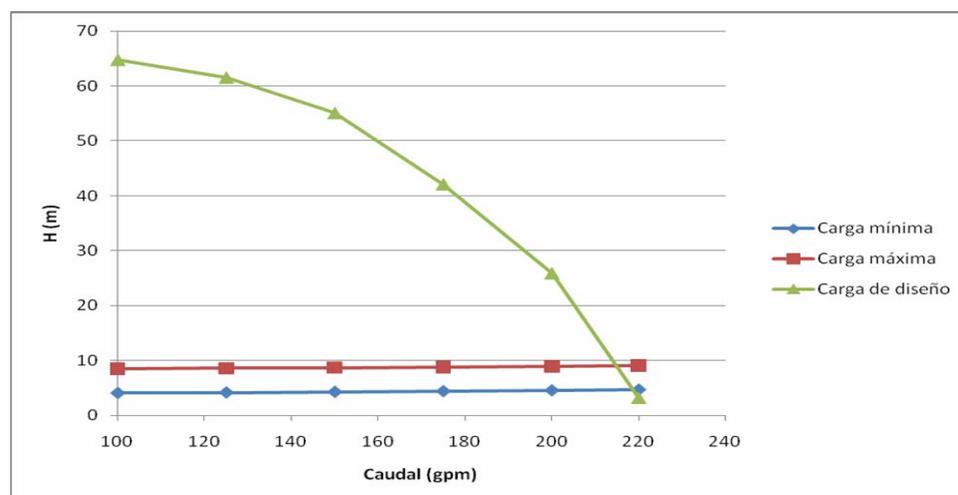


Figura 24. Cargas mínima, máxima y de diseño del sistema hidráulico de recirculación de lodos a una velocidad de 200 rpm.

Al igual que la bomba de extracción de lodos BV-208B, se compararon los valores de $NPSH_D$ obtenidos con el valor de $NPSH_R$, observándose en la tabla 4.13 una gran diferencia entre los mismos.

Tabla 26. NPSH disponible y NPSH requerido para la bomba de recirculación de lodos BV-204A a velocidad de 200 rpm.

Caudal		NPSH _D (m)	NPSH _R (m)
(gpm)	(m ³ /s)		
100	0,0063	9,4737	0,9449
125	0,0079	9,4554	
150	0,0095	9,4339	
175	0,0110	9,4109	
200	0,0126	9,3835	
220	0,0139	9,3590	

Los valores tabulados de NPSH_D presentados en la gráfica 4.12 no llegaron a descender significativamente, y por lo tanto no cortó nunca la línea del NPSH_R para los caudales de trabajo, comprobando así que la bomba nunca cavitó ni pudo haber cavitado bajo estas condiciones de operación.

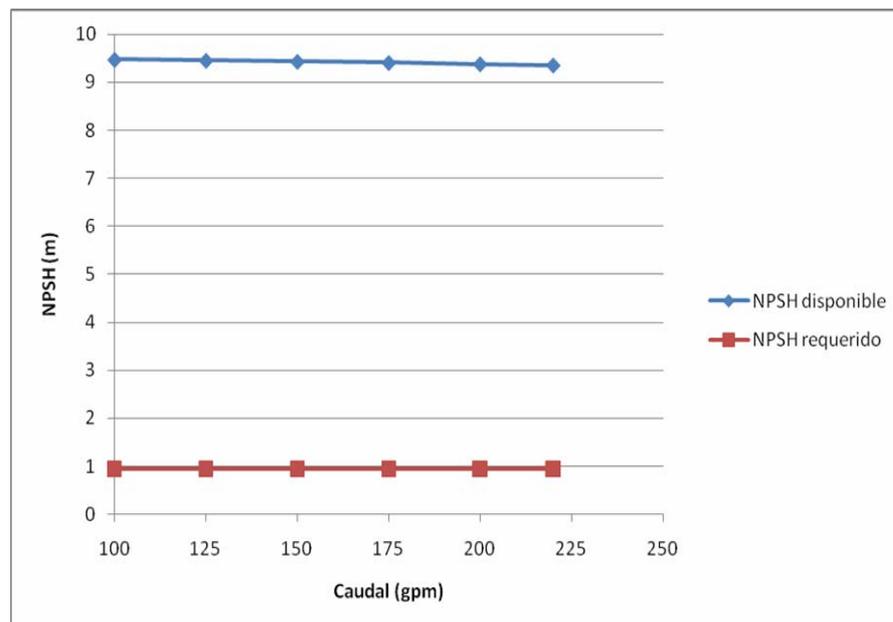


Figura 25. NPSH disponible y requerido para la bomba de recirculación de lodos BV-204A a velocidad de 200 rpm.

4.1.4. Propuestas de Mejoras al Sistema de Recirculación y Extracción de Lodos en el Módulo Densadeg d-200

4.1.4.1. Operación de la Bomba de Extracción de Lodos BV-208B a Velocidad de 150 rpm

Se propone trabajar la bomba de extracción de lodos BV-208B a una velocidad de 150 rpm, según las indicaciones del fabricante (tabla A.22), ya que el lodo que se extrae del sistema es un fluido muy espeso y abrasivo, de esta manera se resguarda físicamente el equipo disminuyendo la erosión que pueda causar el lodo en el tornillo de éste. El estudio hidráulico para respaldar esta propuesta, se realizó siguiendo el mismo procedimiento aplicado para una velocidad de 575 rpm y las cargas máximas y mínimas, así como la de diseño se muestran en las tablas 4.14 y 4.15, respectivamente.

Tabla 27. Cargas mínimas y máximas del sistema hidráulico de la bomba de extracción de lodos BV-208B del módulo D-200 a velocidad de 150 rpm.

Caudal		H_{\min} (m)	H_{\max} (m)
(gpm)	(m^3/s)		
20	0,0013	11,7440	16,1440
40	0,0025	12,7069	17,1069
60	0,0038	14,1419	18,5419
80	0,0050	16,0162	20,4162
100	0,0063	18,3069	22,7069

Tabla 28. Carga de diseño del sistema hidráulico de la bomba de extracción de lodos BV-208B con respecto a los caudales respectivos para una velocidad de 150 rpm.

Caudal		H_{Dis} (m)
(gpm)	(m^3/s)	
20	0,0013	226,7089
40	0,0025	200,7993
60	0,0038	148,9801
80	0,0050	77,7288
100	0,0063	6,4774

Cuando se graficaron y se interceptaron las curvas del sistema de cargas mínimas y máximas contra la de diseño (figura 4.13), se pudo leer el caudal mínimo y máximo que podrá entregar la bomba para esta velocidad de 150 rpm, los cuales son de 96,3 y 95,8 gpm respectivamente. Observándose que, igualmente, podrá cubrir el rango de caudales de extracción de lodos calculados.

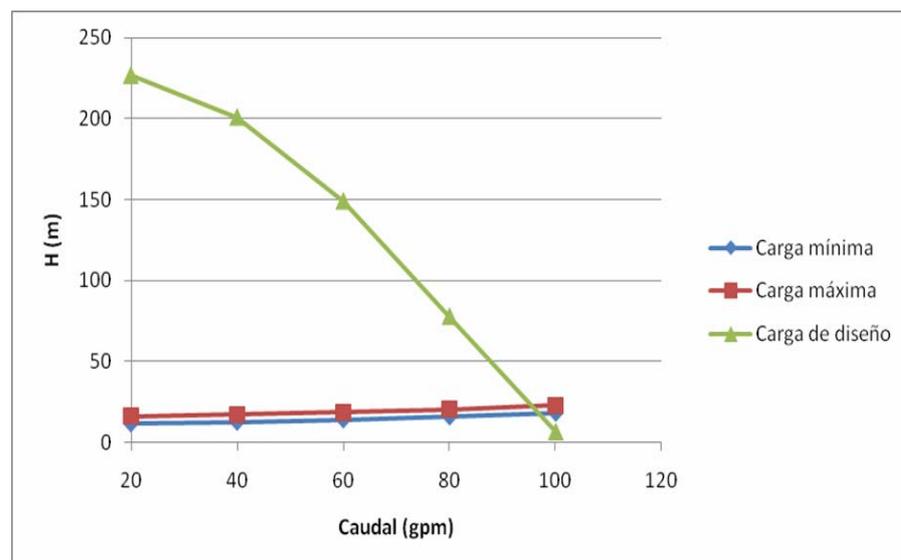


Figura 26. Cargas mínima, máxima y de diseño del sistema hidráulico de extracción de lodos a una velocidad de 150 rpm.

Los $NPSH_D$ se reflejaron en la tabla 4.13 y se compararon con el $NPSH_R$, observándose que sigue existiendo una gran diferencia entre ellos, lo cual significa que la bomba no cavitará bajo la condición de velocidad de 150 rpm, y se comprobó cuando se graficaron los valores (figura 4.14) y las curvas no llegaron a cruzarse.

Tabla 29. NPSH disponible y requerido para la bomba de extracción de lodos BV-208B a una velocidad de 150 rpm

Caudal		NPSH _D (m)	NPSH _R (m)
(gpm)	(m ³ /s)		
20	0,0013	9,5084	3,7186
40	0,0025	9,5034	
60	0,0038	9,4961	
80	0,0050	9,4865	
100	0,0063	9,4749	

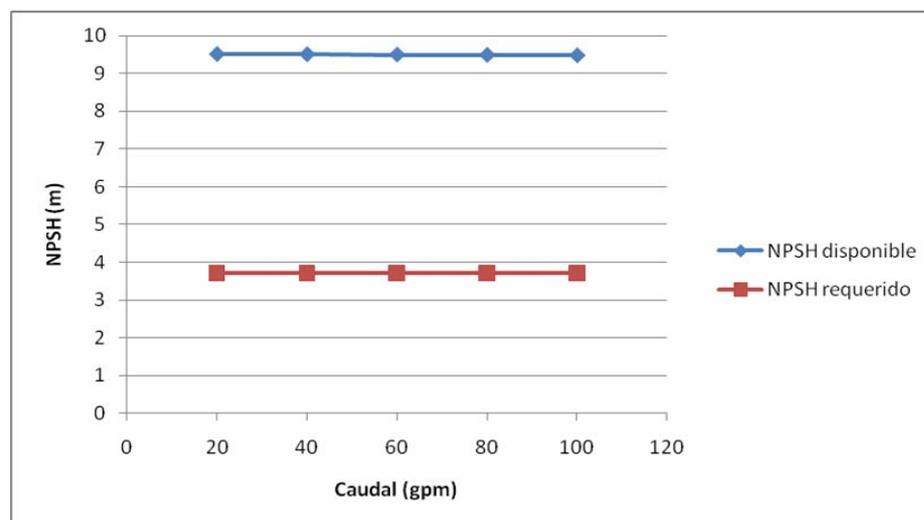


Figura 27. NPSH disponible y requerido para la bomba de extracción de lodos BV-208B a velocidad de 150 rpm.

4.1.4.2. Nuevos Medidores para la Detección del Nivel de Lodos en el Sedimentador

Esta propuesta contempla la adquisición de dos nuevos medidores de nivel para la detección de niveles bajos y altos de la capa de lodo en la unidad de clarificación del módulo D-200, los cuales se colocarán respetando las alturas que les corresponda por diseño de la planta (figura 3.3). Se proponen dos tipos de medidores que resultan adecuados para el sistema, resaltando sus ventajas y desventajas.

A. Medidor de Nivel Tipo Capacitivo

Un sensor de nivel tipo capacitivo servirá para medir el nivel de lodo en la interfase agua-lodo. El sensor está constituido por un electrodo o probeta de capacitancia que se introducirá en el tanque (figura 4.15). El cambio de capacitancia, producido por un aumento o disminución de nivel en el recipiente se medirá utilizando la probeta, la cual estará conectada a un circuito electrónico (Inele y Sapiens, 2010).

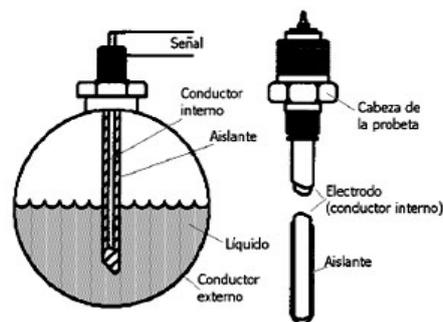


Figura 28. Componentes de un medidor capacitivo (Sapiens, 2010)

Ventajas:

- Requieren mínimo mantenimiento.

- Pueden ser utilizados para medición continua o puntual.
- Valor deseado o punto de ajuste (set point) ajustable
- Compatibles con gran cantidad de líquidos, lodos, materiales conductivos y no conductivos.
- Resistentes a la corrosión utilizando la probeta adecuada.
- Se ajustan a cualquier tipo de recipiente.
- No presenta partes móviles.

Desventajas:

- Cambios en la constante dieléctrica del material, causan errores en la señal.
- Normalmente requieren calibración en campo.
- Depósitos de materiales altamente conductores en la probeta, pueden afectar la exactitud y la repetibilidad.

B. Medidor de nivel por radiación

La medición de nivel con este tipo de medidor será hecha por una fuente de rayos gamma que emite un haz de rayos que atravesará el líquido con un ángulo de salida de aproximadamente 20° ó 40° . En el extremo opuesto de la fuente se dispondrá de un detector de rayos gamma conectado eléctricamente con un transmisor de nivel que proporcionará una señal de salida (figura 4.16). Un tipo de medidor de nivel por radiación es el transmisor de radar por onda guiada, el cual

en vez de emitir el haz con un ángulo, lo hace de forma recta guiado por una sonda y se coloca verticalmente en el tanque (Inele y Sapiens, 2010).

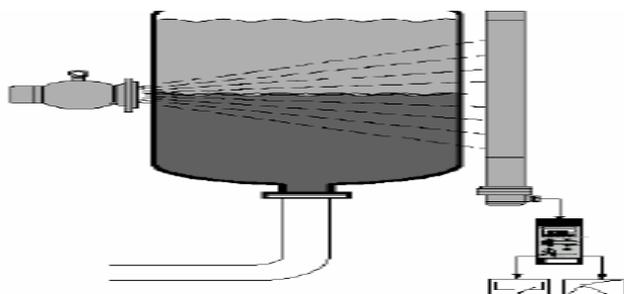


Figura 29. Aplicación del medidor de nivel por radiación en el sistema de interfase agua-lodo (Inele, 2010)

Ventajas:

- Todos los elementos del sensor son externos al recipiente evitando el contacto con el producto, de modo que la presión, el vacío, la temperatura o materiales altamente viscosos, corrosivos, abrasivos o muy pesados no afectan al sistema de medición.

- La tecnología sin contacto directo con el producto requiere poco mantenimiento.

- Adecuado para todos los productos y su montaje no causa ningún tipo de obstrucción.

- Los sistemas de medición de rayos gamma ni siquiera requieren modificaciones en el tanque.

Desventajas:

- Se requieren medidas especiales de seguridad.

4.2. Conclusiones

1. Los caudales de extracción de lodos disminuyen a medida que aumentan los sólidos suspendidos en una corriente, tornándose así el fluido más espeso y abrasivo dificultando de esta manera su fluidez.

2. A menor caudal de extracción, mayores son los tiempos y las frecuencias de extracción.

3. Al comparar los parámetros de carga superficial y porcentaje de remoción de sólidos operacionales con respecto a los de diseño se observó el buen funcionamiento y eficiencia de la planta.

4. La velocidad de sedimentación para el período de estudio no fue efectiva, lo cual indica la falta de peso de los flóculos.

5. Se comprobó que el sistema mantuvo un flujo másico adecuado de lodos, ya que ninguno de los resultados calculados estuvo por encima del límite de diseño que existe para la tolva de lodos.

6. La automatización del sistema depende de los instrumentos de control del nivel de la capa de lodos, los cuales no existen físicamente y por ende la recirculación y extracción de lodos se hace manualmente.

7. En algunas ocasiones, la bomba de extracción de lodos BV-208B es trabajada bajo condiciones operacionales extremas, forzando su funcionamiento por encima de la velocidad sugerida por el fabricante.

8. La bomba de recirculación de lodos BV-204A trabaja en condiciones adecuadas de acuerdo con las indicaciones del fabricante.

9. Ninguna de las bombas componentes del sistema de recirculación y extracción de lodos presentó problemas de cavitación.

10. Para asegurar la integridad y un mejor funcionamiento de la bomba BV-208B se debe trabajar a una velocidad de 150 rpm.

11. La implementación de nuevos medidores de nivel, permitirá poner en práctica de nuevo la automatización del sistema estudiado para un mejor desarrollo del proceso.

4.3. Recomendaciones

1. Colocar un medidor de caudal a la salida de la unidad de clarificación, para medir el agua clarificada y facilitar el balance de masa en el proceso de coagulación-floculación.

2. Realizar con más frecuencia ensayos de sólidos suspendidos y totales a las distintas corrientes del proceso, con la finalidad de conocer las condiciones operacionales que se manejan y así respaldar las decisiones que se deban tomar en caso de presentarse un pico de turbidez en el agua cruda.

3. Construir un histórico de condiciones operacionales para obtener valores de referencia correspondientes a los distintos parámetros que se manejan en la planta, en caso de que el proceso requiera de una operación manual.

4. Elaborar una data histórica mediante pruebas experimentales, en el compartimiento de mezcla lenta para saber la cantidad de lodos que se debe recircular al sistema según la turbidez y sólidos suspendidos del agua cruda que entra al proceso y así mantener el 3% de lodos requerido en esta unidad.

5. Hacer un estudio técnico-económico de los dos tipos de medidores de nivel para decidir cuál implementar según la propuesta hecha.

6. Automatizar nuevamente el sistema al adquirir los medidores de nivel para la capa de lodos, así como aplicarle el debido mantenimiento preventivo para evitar que se vuelvan a dañar.

7. Instalar un caudalímetro en la tubería de extracción de lodos y hacerle mantenimiento más seguido a los manómetros de las bombas de recirculación y extracción del sistema, para comprobar las condiciones hidráulicas de operación que se estén trabajando.

BIBLIOGRAFÍA

Arboleda, J. (2000). Teoría y práctica de la coagulación del agua. Colombia: McGraw Hill.

Barrenechea, A.; De Vargas, L. y Maldonado, V. Manual I: Teoría. CEPIS.

Bird, R.; Lightfoot, E. y Stewart, W. (2005). Fenómenos de transporte. (2a ed.). México: Editorial Reverté, S.A.

Cholet, H. (1998). Las bombas a cavidades progresivas [Libro en línea]. Consultado el 05 de julio de 2010 en: http://books.google.co.ve/books?id=vHOJt42h7y8C&printsec=frontcover&dq=bombas+cavidad+progresiva&hl=es&ei=FywyTJidKcTbnAeiqMzYAw&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=1&ved=0CCkQ6AEwAA#v=onepage&q&f=false

Corripio, A. y Smith, C. (2007). Control automático de procesos: teoría y práctica. México: Editorial Limusa.

Crane. (1993). Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías. México: McGraw Hill.

Eddy y Metcalf. (1996). Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización: tomo II. (3a ed.). México: McGraw Hill.

Felder, R. y Rousseau, R. (2007). Principios elementales de los procesos químicos. (3a ed.). México: Editorial Limusa.

Geankoplis, C.J. (1998). Procesos de transporte y operaciones unitarias. (3ª ed.). México: Compañía Editorial Continental, S.A.

Guarimata, N. (2002). Evaluación técnica y económica del uso de coagulantes y floculantes en una planta de tratamiento de aguas servidas. Trabajo de grado no publicado. Universidad De Oriente, Venezuela.

Inele. [Página web en línea]. Consultado el 8 de agosto de 2010 en: www.inele.ufro.cl/apuntes/Instrumentacion_y_Control/Ivan_Velazquez/Catedra/Capitulo%202.3%20Nivel.pdf

Kenneth, J. (1993). Bombas: selección, uso y mantenimiento. México: McGraw Hill.

La Rosa, M. (2009). Evaluación del sistema de bombeo de agua de lavado de la unidad de craqueo catalítico fluidizado de la refinería de Puerto La Cruz. Trabajo de grado no publicado. Universidad De Oriente, Venezuela.

Lipesa. (1998). Tratamiento químico del agua. Venezuela: Impregraf.

Ogata, K. (1998). Ingeniería de control moderna. (3ª ed.). México: Prentice-Hall.

PDVSA. (1997). Manual de diseño de proceso: cálculos en servicios de bombeo. Puerto La Cruz, Venezuela: Autor.

Pequiven. [Página web en línea]. Consultado el 5 de abril de 2010 en: <http://www.pequiven.com>

Pequiven y Veneagua. (1998). Manual de operaciones de procesos. Barcelona, Venezuela: Autor.

Perry, R. (2008). Fluid and particles dynamics. Perry's chemical engineers handbook. (8a ed.). McGraw Hill.

Pino, M. (2003). Evaluación de la dosificación de coagulantes y su influencia en las operaciones de coagulación y filtración en la planta de potabilización. Trabajo de grado no publicado. Universidad De Oriente, Venezuela.

Ramírez Q., F. (2008). Lodos producidos en el tratamiento de agua potable. Técnica Industrial [Revista en línea], (275). Consultado el 05 de julio de 2010 en: <http://www.tecnicaindustrial.es/TIAdmin/Numeros/35/43/a43.pdf>

Reklaitis, G. y Schneider, D. (1989). Balances de Materia y Energía. México: McGraw Hill.

Ríos, Y. (2005). Evaluación de la interconexión de la corriente de agua proveniente de la planta SAEN a las bombas Booster P-1212 y P-1214 de la PIA RESOR. Trabajo de grado no publicado. Universidad De Oriente, Venezuela.

Sapiens. [Página web en línea]. Consultado el 8 de agosto de 2010 en: www.sapiens.itgo.com/documents/doc60.htm

Universidad Central de Venezuela. Tratamiento para potabilización de aguas: principios fundamentales y aspectos operacionales. Caracas: Autor

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y
ASCENSO

TÍTULO	“Evaluación del sistema de recirculación y extracción de lodos en un módulo de tecnología densadeg de una planta de tratamiento de agua”
SUBTÍTULO	

AUTOR (ES):

APELLIDOS Y NOMBRES	CÓDIGO CULAC / E MAIL
Fernández L., Fergie L.	CVLAC: V-18.280.055 E MAIL: fergiefernandez.12@gmail.com
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:

PALABRAS O FRASES CLAVES:

Tratamiento de agua

Lodos de agua cruda

Balance de lodos

Extracción de lodos

Sedimentación

Coagulación

Bombeo de lodos

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y
ASCENSO:**

ÁREA	SUBÁREA
Ingeniería y ciencias aplicadas	Ingeniería Química

RESUMEN (ABSTRACT):

Para la evaluación del sistema de recirculación y extracción de lodos en el módulo D-200 de la planta de tratamiento de aguas en Pequiven-Jose, se realizó un balance de masa para calcular la cantidad de lodos extraíbles del sistema, utilizando las concentraciones de sólidos suspendidos y totales de las corrientes de flujo. Posteriormente, se calculó el tiempo y la frecuencia de extracción, observándose picos altos de caudales con respecto al resto, debido a las diferentes condiciones de formación de los lodos. El funcionamiento de la planta, se verificó mediante el cálculo de parámetros operacionales como la carga superficial, porcentaje de remoción de sólidos, velocidad de sedimentación y flujo másico de extracción de lodos, para luego compararlos con los establecidos por diseño, encontrándose que la planta estaba funcionando bien, salvo la velocidad de sedimentación, la cual fue muy baja. Asimismo, se estudiaron los instrumentos de control para el nivel de la capa de lodos, apreciándose que actualmente no se encuentran en la planta. El estudio hidráulico permitió conocer la capacidad de las bombas de lodos BV-204A y BV-208B, obteniéndose que la bomba BV-204A trabaja en condiciones adecuadas (200 rpm), mientras que la bomba BV-208B en ocasiones trabaja fuera del rango preestablecido (575 rpm). En base a los resultados obtenidos, se propuso trabajar la bomba BV-208B a una menor velocidad (150 rpm) y la adquisición de nuevos medidores de nivel para el control de la capa de lodos en el sedimentador.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y**ASCENSO:****CONTRIBUIDORES:**

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL				
Moreno, Yuvi	ROL	CA	AS X	TU	JU
	CVLAC:	V-12.980.821			
	E_MAIL	yuvimoreno@yahoo.com			
	E_MAIL				
Salazar, Jonathan	ROL	CA	AS	TU X	JU
	CVLAC:	V-12.913.427			
	E_MAIL	salazarej@gmail.com			
	E_MAIL				
Amundarain, Milena	ROL	CA	AS	TU	JU X
	CVLAC:	V-3.945.689			
	E_MAIL	milenaamundarain@gmail.com			
	E_MAIL				
Cova, Alexis	ROL	CA	AS	TU	JU X
	CVLAC:	V-11.905.328			
	E_MAIL	alexiscovab@gmail.com			
	E_MAIL				

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

2010	12	07
AÑO	MES	DÍA

LENGUAJE. SPA

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y
ASCENSO:**

ARCHIVO (S):

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
TESIS.Evaluación_sistemadeextracciónyrecirculacióndelodos_p lantatratamientodeagua.doc	Application/ msword

CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS: A B C D E F G H I J
K L M N O P Q R S T U V W X Y Z. a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u
v w x y z. 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9.

ALCANCE

ESPACIAL: Planta de tratamiento de aguas Pequiven -Jose (OPCIONAL)

TEMPORAL: _____ seis meses _____ (OPCIONAL)

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Ingeniero químico_____

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Pregrado_____

ÁREA DE ESTUDIO:

Ingeniería de procesos_____

INSTITUCIÓN:

Universidad de Oriente. Núcleo de Anzoátegui_____

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y
ASCENSO:**

DERECHOS

De acuerdo con el artículo 41 del reglamento de Trabajo de Grado de la Universidad de Oriente: "los Trabajos de Grado son de exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente y sólo podrán ser utilizados por otros fines con el consentimiento del consejo de núcleo respectivo, quien lo participará al consejo universitario".

Fernández F, Fergie L

AUTOR

Yuvi Moreno

TUTOR

Milena Amundaraín

JURADO

Alexis Cova

JURADO

Yraima Salas

POR LA SUBCOMISIÓN DE TESIS