

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**DISEÑO A NIVEL BÁSICO DE UNA PLANTA DE ADSORCIÓN
DE METALES PESADOS SOBRE LIGNINA
A ESCALA PILOTO**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por las Brs. Fontaine D. Daniela S.,
Rojas L. Mayerlim C.
Para optar al Título de
Ingeniero Químico

Caracas, 2006

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DISEÑO A NIVEL BÁSICO DE UNA PLANTA DE ADSORCIÓN DE METALES PESADOS SOBRE LIGNINA A ESCALA PILOTO

TUTORES ACADÉMICOS: Prof. Alejandra Meza
Prof. Narciso Pérez

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por las Brs. Fontaine D. Daniela S.,
Rojas L. Mayerlim C.
Para optar al Título de
Ingeniero Químico.

Caracas, 2006

Caracas, Noviembre de 2006

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Química, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por las Bachilleres Daniela S., Fontaine D. y Mayerlim C., Rojas L., titulado:

**“Diseño a nivel básico de una planta de adsorción
de metales pesados sobre lignina
a escala piloto”**

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

Prof. Leonardo Oropeza
Jurado

Prof. Johnny Vásquez
Jurado

Prof. Alejandra Meza
Tutor

Prof. Narciso Pérez
Tutor

DEDICATORIA

Dedicado A:

Las cuatro personas más importantes de mi vida, Enrique, Aracelis, Quito y Maria; ustedes son la fuente de toda mi energía, lo mas valioso que tengo y lo que mas amo en este mundo son mi familia...

Daniela Fontaine

A todas las personas que aman lo que hacen y luchan cada día para superar con esfuerzo los obstáculos de la vida con tal de lograr sus sueños!!!

A mi madre, Magaly que me ha dado la vida y la fuerza necesarias para llegar hasta aquí. A mi hermano Leonardo por quererme y apoyarme tanto, ahora faltas tú por convertirte en profesional, te falta poco! A mis hermanos Pedro y Gabriela por ser muchas veces la inspiración y porque espero que es su momento disfruten de esta etapa de sus vidas tanto como yo. A mi sobrinita Camila por ser un ángel que ha llegado para hacernos más felices.

A mi tía Zoraida y mi tío Oswaldo, por ser como mis segundos padres. A mi abuela Margot por ser la fuente de concejos y bendiciones. A mi abuelo Pastor, que Dios lo tenga en su gloria. A todos mis tíos y primos, especialmente a Margaret y Jackeline por estar pendiente de mi y de mis cosas, vamos muchachas, que cada día falta menos!

A mi amor y a la familia Alfonzo Forgione por haber confiado en mi y haberme apoyado en momentos difíciles.

Esta meta alcanzada es nuestra!!!

Mayerlim Rojas

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar a Dios, en quien creo profundamente, por darme la vida y atender siempre a mis plegarias.

A toda mi familia; a mis padres Enrique y Aracelis, a mis hermanos Quito y Maria, por estar siempre conmigo, apoyarme y entenderme en todo momento. A mis abuelitas Dominga y Yolanda, gracias por preocuparse por mi y darme tanto cariño. Y al resto de mi familia tíos, primos y mi abuelito Pascual.

A Narciso y Alejandra, por ser excelentes tutores y darme la oportunidad de realizar este trabajo que me ha dado tantas satisfacciones. A los profesores de la escuela de Ingeniería Química de la Universidad Central de Venezuela, por guiarnos en este camino, en especial al profesor Humberto Kum por sus consejos y palabras de aliento.

A las personas del laboratorio del carbón de la Universidad Simón Bolívar, en especial a Diego, Joliny y Clara. Gracias por su apoyo...

A Maye por ser mi amiga y compañera en esta etapa tan importante, fue un placer realizar la tesis juntas.

Y finalmente a todos mis amigos que me han apoyado a lo largo de este camino, en especial a mis compañeras de residencia con quienes compartí muchos momentos especiales. Gracias por acompañarme, escucharme y tenerme como amiga siempre...

Daniela Fontaine

Antes que todo quiero agradecer a Dios por darme la fuerza y la salud necesaria para llevar a cabo mis sueños y hacerme caminar en la dirección correcta.

A mi mamá Magaly por darme la vida y los principios que me hacen ser quien soy hoy. A Pedro por colaborar en mi educación integral. A mis hermanos Leonardo, Pedro y Gabriela por inspirarme, quererme y apoyarme, los amo... gracias!!!

A mi tía Zoraida y mi tío Oswaldo por su paciencia, apoyo y amor incondicional, no habría llegado hasta aquí de no ser por ustedes, mil gracias!!! A mi abuela Margot, a todos mis tíos y primos quienes colaboraron para ayudarme a alcanzar esta meta, especialmente a Margaret y Jackeline por estar siempre pendiente de mi, de mis cosas y darme tantas alegrías.

A Manuel por ser uno de los mejores amigos que alguien pueda tener, por todo su amor, apoyo, paciencia y comprensión. A la familia Alfonzo Forgione, especialmente a la Sra. Teresa y al Sr. Vicente por haber confiado en mi, haberme apoyado en momentos difíciles y por todas esas lecciones ofrecidas a lo largo de mis años de carrera, nunca haré lo suficiente para agradecerles!!!

A los profesores Alejandra Meza y Narciso Pérez por la oportunidad brindada, por su confianza, apoyo, dedicación, motivación y consejos durante el desarrollo de este Trabajo Especial de Grado, nunca los olvidaré!!!

A mis amigas Gabriela, Virginia, Ana cristina y Linancy que de una u otra forma compartieron momentos especiales conmigo y me dieron lecciones de vida invaluable; especialmente a Daniela, por su tranquilidad y equilibrio para la realización de este trabajo y de muchos otros a lo largo de la carrera. A los profesores de la escuela de Ingeniería Química porque no sólo contribuyeron a mi educación académica sino a la personal, especialmente a José Francisco Fernández, Rafael Martín, Carlos Morales, Humberto Kum y Anubis Pérez.

A Clara, Johliny y Diego, por el compañerismo, consejos y ayuda incondicional prestada durante el tiempo de trabajo en el Laboratorio del Carbón de la Universidad Simón Bolívar.

A la Universidad Central de Venezuela por ser prácticamente mi hogar a lo largo de todos estos años.

Finalmente, a todos los que de alguna u otra forma colaboraron para que alcanzara tan importante meta, aunque en este momento no los haya podido nombrar. Sin todos ustedes esta meta habría sido imposible de alcanzar. GRACIAS!!!

Mayerlim Rojas

**Fontaine D., Daniela S.
Rojas L., Mayerlim C.**

**DISEÑO A NIVEL BÁSICO DE UNA PLANTA DE ADSORCIÓN
DE METALES PESADOS SOBRE LIGNINA
A ESCALA PILOTO**

Tutores Académicos: Prof. Alejandra Meza. Prof. Narciso Pérez.

Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Química.

Año 2006, 228 p.

Palabras Claves: Adsorción, Planta piloto, Lignina, Escalamiento.

Resumen.

En la actualidad existe una creciente necesidad de eliminar metales pesados disueltos, presentes en líquidos por representar una fuente importante de toxicidad y la causa de reacciones y comportamientos indeseables en los procesos químicos en los cuales se encuentran involucrados. En este sentido se propuso el empleo de la lignina como adsorbente de estos metales, obteniéndose resultados satisfactorios para el caso de Ni (+2) y V (+5) provenientes de licores ácidos (LIM) producidos de la desmetalización y desulfuración del coque de petróleo por un proceso de digestión ácida vía microondas.

El escalamiento y diseño de este proceso a nivel comercial permitirá utilizar el coque procesado como combustible de alta calidad, aumentando su valor agregado y reutilizar el ácido empleado en la digestión. Sin embargo, por ser un proceso novedoso no se cuenta con los datos para llevarlo a cabo, por lo que se requirió realizar pruebas de escalamiento en el Grupo de Tecnologías Alternativas Limpias (TECall) de la Universidad Simón Bolívar, que permitieron obtener la información requerida para el diseño comercial con el menor riesgo posible.

Para lograr este objetivo se realizó el diseño y montaje del equipo a escala laboratorio, el cual consistió en un recipiente que contiene la solución de metal que se

desea procesar (20ppm de Ni ó 20ppm de V a un valor de pH de 4 aproximadamente), una bomba de émbolo que lleva el fluido mediante una manguera, desde el recipiente de almacenamiento hasta el extremo inferior de una columna de vidrio que contiene el empaque de lignina, obteniéndose del extremo superior de la columna una corriente procesada que se envía a un recipiente de almacenamiento de productos. Para el escalamiento del proceso de adsorción, se analizaron los criterios de la teoría de la semejanza, y se aplicó el modelo BDST.

Los resultados obtenidos a escala laboratorio demuestran que la lignina es un adsorbente efectivo para la adsorción de Níquel presente en el licor ácido, removiendo un 97% de este metal de la solución tratada, pero no así para el caso del Vanadio, ya que remueve sólo un 20%.

En base a toda la información obtenida de la parte experimental, se procedió al escalamiento y diseño de los equipos a escala piloto, implementando para su configuración los equipos considerados a escala laboratorio, sistemas de control, un filtro y algunos tanques adicionales que permiten el satisfactorio funcionamiento de la planta.

El diseño de la planta permitió generar todos los documentos de ingeniería correspondientes a un diseño a nivel básico, tales como DFP, DTI, listas, hojas de especificación de los equipos principales y una estimación de costo que representa una inversión inicial de 15.331.700Bs lo cual es aceptable para una planta a escala piloto y evidencia la factibilidad técnica, económica y financiera del proyecto.

ÍNDICE GENERAL

<i>Contenido</i>	<i>Pág.</i>
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I CONSIDERACIONES GENERALES DEL ESTUDIO.....	3
I.1. Planteamiento del problema.....	3
I.2. Objetivos.....	4
I.2.1. General.....	4
I.2.2. Específicos.....	4
CAPÍTULO II REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	6
II.1. Diseño de procesos.....	6
II.1.1. Ingeniería básica.....	7
II.1.2. Diagramas de proceso.....	8
II.1.3. Estrategias de control.....	11
II.1.3.1. Control por retroalimentación.....	12
II.1.3.2. Control por acción precalculada.....	13
II.1.4. Estimación de costos durante el diseño de proceso.....	15
II.2. Planta piloto.....	17
II.2.1. Aplicación de una planta piloto.....	19
II.2.2. Capacidad de una planta piloto.....	20
II.2.3. Escalamiento de proceso.....	22
II.2.4. Consideraciones del cambio de escala.....	22
II.2.5. Teoría de la semejanza.....	23
II.2.5.1. Análisis dimensional.....	26
II.2.6. Modelo Tiempo de Servicio de Altura de Lecho (Bed Depth Service Time).....	28
II.3. Diseño de torres para un proceso de adsorción.....	35
II.3.1. Adsorción.....	35
II.3.2. Operaciones de adsorción.....	38
II.4. Uso de lignina como adsorbente.....	41

II.4.1. Lignina.....	41
II.4.2. Propiedades generales de la lignina.....	42
II.4.3. Estructura de la lignina.....	43
II.4.4. Obtención industrial de la lignina.....	44
II.4.4.1. Lignosulfonatos.....	45
II.4.4.2. Ligninas alcalinas.....	46
II.5. Antecedentes.....	47
CAPÍTULO III METODOLOGÍA GENERAL.....	55
CAPÍTULO IV MATERIALES, REACTIVOS, EQUIPOS Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	59
IV.1. Materiales y reactivos para el desarrollo experimental.....	59
IV.1.1. Materiales y Reactivos.....	60
IV.2. Equipos.....	61
IV.2.1. pH-metro digital.....	61
IV.2.2. Plancha de agitación.....	62
IV.2.3. Bomba.....	63
IV.2.4. Balanza analítica.....	64
IV.2.5. Reóstato.....	65
IV.2.6. Manómetro de Bourdon.....	66
IV.2.7. Espectrómetro de plasma acoplado inductivamente (ICP-EA).....	67
IV.3. Procedimiento experimental.....	67
IV.3.1. Montaje de la planta a escala de laboratorio.....	68
IV.3.2. Preparación de las soluciones de metales.....	70
IV.3.3. Proceso de adsorción.....	71
IV.3.4. Prueba de adsorción atómica (ICP).....	72
CAPÍTULO V VISUALIZACIÓN DEL PROCESO.....	73
V.1. Propuesta del proceso.....	73
V.2. Bases de diseño.....	75
V.2.1. Características y condiciones de la materia prima.....	75
V.2.2. Especificaciones de productos finales.....	77

V.2.3. Insumos.....	79
V.2.4. Características de los servicios industriales.....	79
V.2.5. Factor de servicio.....	79
V.2.6. Manejo de efluentes.....	80
V.2.7. Requerimientos de almacén.....	81
V.2.8. Condiciones del sitio.....	82
V.2.9. Códigos y normas aplicables.....	83
V.3. Criterios de diseño.....	83
V.3.1. Tuberías.....	83
V.3.2. Bomba.....	84
V.3.3. Tanque de almacenamiento.....	85
V.3.4. Tanque de agitación.....	86
V.3.5. Columnas de adsorción.....	87
V.3.6. Filtro.....	88
V.3.7. Tolva.....	88
CAPÍTULO VI LOCALIZACIÓN Y CAPACIDAD DE LA PLANTA.....	90
VI.1. Localización de la planta.....	90
VI.2. Capacidad de la planta.....	90
VI.2.1. Capacidad mínima.....	91
VI.2.2. Capacidad máxima.....	92
CAPÍTULO VII ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL PROCESO SEMICONTINUO DE ADSORCIÓN A ESCALA LABORATORIO Y DEL ESCALAMIENTO.....	95
VII.1. Desarrollo del montaje del sistema de adsorción a escala laboratorio.....	95
VII.2. Resultados a escala laboratorio.....	100
VII.3. Análisis del escalamiento.....	107
VII.3.1. Aplicación de la teoría de la semejanza.....	107
VII.3.2. Resultados de la aplicación de la teoría de la semejanza.....	112
VII.3.3. Análisis y resultados del modelo BDST.....	116
CAPÍTULO VIII INGENIERÍA BÁSICA.....	120

VIII.1. Diagrama de bloque del proceso.....	120
VIII.2. Diagrama de flujo del proceso.....	121
VIII.3. Balance de masa del proceso.....	123
VIII.4. Descripción del proceso.....	126
VIII.4.1. Etapa de adsorción de la planta piloto.....	127
VIII.4.1.1. Regulación de pH de la materia prima.....	127
VIII.4.1.2. Adsorción de metales.....	129
VIII.4.1.3. Filtración de impurezas.....	130
VIII.4.2. Desalajo de la lignina pesada de la planta piloto.....	131
VIII.4.3. Lavado de la planta piloto.....	132
VIII.5. Descripción del diseño de los equipos.....	133
VIII.5.1. Tuberías.....	134
VIII.5.2. Bombas.....	136
VIII.5.3. Tanques de almacenamiento.....	137
VIII.5.4. Tanque de agitación.....	140
VIII.5.5. Columna de adsorción.....	143
VIII.5.6. Filtro.....	146
VIII.5.7. Tolva.....	147
VIII.6. Hojas de especificación de los equipos principales.....	148
VIII.7. Filosofía y estrategias de control.....	158
VIII.7.1. Estrategia de control del tanque de almacenamiento de la materia prima T-1101.....	159
VIII.7.2. Estrategia de control del tanque estabilizador T-1102.....	159
VIII.7.3. Estrategia de control del tanque de agitación M-1101.....	160
VIII.7.4. Estrategia de control del tanque de almacenamiento de producto T-1103.....	161
VIII.7.5. Estrategia de control de la columna de adsorción C-1101.....	161
VIII.8. Diagramas de tuberías e instrumentación.....	162
VIII.9. Listas de equipos de proceso.....	168
VIII.10. Lista de tuberías.....	168

VIII.11. Listas de instrumentos.....	170
VIII.12. Estimación de costos de la planta.....	172
CONCLUSIONES.....	176
RECOMENDACIONES.....	180
BIBLIOGRAFÍA.....	181
ANEXOS.....	185
A.1. Medidas de seguridad de los reactivos.....	185
A.1.1. Medidas de seguridad de la lignina.....	185
A.1.2. Medidas de seguridad de las soluciones de Níquel.....	186
A.1.3. Medidas de seguridad de las soluciones de Vanadio.....	187
A.1.4. Medidas de seguridad del ácido sulfúrico.....	188
A.1.5. Medidas de seguridad del amoníaco.....	188
A.2. Aplicación de la teoría de la semejanza.....	189
A.2.1. Longitud de lecho no utilizado.....	189
A.2.2. Aplicación de la teoría de la semejanza para el diámetro de lecho a escala piloto.....	195
A.2.3. Aplicación de la teoría de la semejanza para la altura de lecho a escala piloto.....	198
A.2.4. Aplicación de la teoría de la semejanza para la altura de lecho muerto a escala piloto.....	199
A.3. Cálculos tipo del diseño de los equipos de la planta piloto.....	200
A.3.1. Tuberías.....	200
A.3.2. Bomba.....	205
A.3.3. Tanques de almacenamiento.....	206
A.3.4. Tanques de agitación.....	212
A.3.5. Columna de adsorción.....	218
A.3.6. Filtro.....	223
A.3.7. Tolva.....	223
A.4. Tablas y figuras para el dimensionamiento de equipos.....	227

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Contenido</i>	<i>Pág.</i>
Tabla N°1. Distribución de pruebas experimentales para determinar la influencia del escalamiento.....	56
Tabla N°2. Características de la lignina Indulin AT.....	60
Tabla N°3. Especificaciones del licor ácido (LIM).....	76
Tabla N°4. Composición del licor ácido (LIM) (Krauter, 1992).....	76
Tabla N°5. Características de la lignina.....	77
Tabla N°6. Especificaciones de producto.....	78
Tabla N°7. Condición de la lignina pesada.....	78
Tabla N°8. Condiciones del sitio de la ubicación de la planta.....	82
Tabla N°9. Valores típicos de tuberías (Walas, 1990).....	84
Tabla N°10. Clasificación de los equipos de agitación.....	86
Tabla N°11. Experimentos a escala laboratorio.....	102
Tabla N°12. Tiempos de ruptura y agotamiento para el Níquel.....	106
Tabla N°13. Magnitudes para el análisis dimensional.....	108
Tabla N°14. Variables de diseño para la columna a escala laboratorio.....	113
Tabla N°15. Variables de diseño para la columna a escala piloto.....	114
Tabla N°16. Resultados a escala de planta piloto según BDST.....	118
Tabla N°17. Balance de masa para la regulación de pH de la materia prima del proceso.....	123
Tabla N°18. Balance de masa para la adsorción y filtración del proceso....	124
Tabla N°19. Balance de masa para el desalojo de licor limpio, lignina pesada y lavado de la columna de adsorción.....	125
Tabla N°20. Balance de masa para el lavado general y parcial del sistema.	126
Tabla N°21. Lista de equipos de proceso.....	168
Tabla N°22. Lista de tuberías requeridas.....	169
Tabla N°23. Lista de controladores.....	170
Tabla N°24. Lista de válvulas.....	171

Tabla N°25. Lista de indicadores.....	172
Tabla N°26. Costos de los equipos de la planta piloto.....	173
Tabla N°27. Diámetros nominales de tuberías de acero comercial. (Walas, 1990).....	227

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Contenido</i>	<i>Pág.</i>
Figura N°1. Capacidad de plantas según etapas en el desarrollo de un proceso (Kum, 1996).....	21
Figura N°2. Curva de ruptura (McCabe, 1991).....	29
Figura N°3. Curvas de ruptura a diferentes alturas de lecho (Hutchins, 1973).....	30
Figura N°4. Rectas BDST (Hutchins, 1973).....	32
Figura N°5. Balance de fuerzas en la superficie y en el interior de un sólido. (Fonseca y Delgado, 2001).....	37
Figura N°6. Unidad fenilpropano (González, 2005).....	44
Figura N°7. Cinamaldehído grupo terminal (González, 2006).....	44
Figura N°8. pH-metro digital.....	62
Figura N°9. Plancha de agitación y calentamiento.....	63
Figura N°10. Bomba de desplazamiento positivo.....	64
Figura N°11. Balanza analítica.....	65
Figura N°12. Reóstato.....	65
Figura N°13. Manómetro de Bourdon.....	66
Figura N°14. Sistema de adsorción a escala laboratorio.....	69
Figura N°15. Estructura de la columna de lecho fijo.....	70
Figura N°16. Separación del lecho.....	97
Figura N°17. Configuración resultante del la escala laboratorio.....	97
Figura N°18. Manguera de descarga de la bomba.....	98
Figura N°19. Toma muestra del sistema a escala laboratorio.....	98
Figura N°20. Regulación de pH de la solución a tratar.....	99
Figura N°21. Fraccionamiento de los lechos de lignina.....	99
Figura N°22. Filtración de las soluciones.....	100
Figura N°23. Curvas de ruptura para el Níquel.....	103
Figura N°24. Curvas de ruptura para el Vanadio.....	104

Figura N°25. Rectas BDST para Níquel.....	116
Figura N°26. Diagrama de bloque del proceso.....	121
Figura N°27. Diagrama de flujo del proceso.....	122
Figura N°28. Hoja de especificación de las bombas.....	150
Figura N°29. Hoja de especificación del tanque de almacenamiento T-1101.....	151
Figura N°30. Hoja de especificación del tanque de almacenamiento y estabilización T-1102.....	152
Figura N°31. Hoja de especificación del tanque de almacenamiento T-1103.....	153
Figura N°32. Hoja de especificación del tanque de agitación M-1101.....	154
Figura N°33. Hoja de especificación de la columna de adsorción C-1101...	155
Figura N°34. Hoja de especificación del filtro F-1101.....	156
Figura N°35. Hoja de especificación de la tolva de almacenamiento de lignina pesada B-1103.....	157
Figura N°36. Diagrama de tuberías e instrumentación N°1.....	163
Figura N°37. Diagrama de tuberías e instrumentación N°2.....	164
Figura N°38. Diagrama de tuberías e instrumentación N°3.....	165
Figura N°39. Diagrama de tuberías e instrumentación N°4.....	166
Figura N°40. Diagrama de tuberías e instrumentación N°5.....	167
Figura N°41. Número de potencia para un agitador. (Walas, 1990).....	228
Figura N°42. Tiempo de mezclado de un agitador. (Walas, 1990).....	228

INTRODUCCIÓN

En la actualidad existe una creciente necesidad de eliminar metales pesados disueltos, presentes tanto en líquidos como en gases, ya que estos representan por un lado, una fuente importante de toxicidad y por otro lado estos son la causa de reacciones y comportamientos indeseables en los procesos químicos en los cuales se encuentran involucrados.

Particularmente, para el desarrollo de este trabajo, los metales que se desean eliminar son Níquel (+2) y Vanadio (+5), ya que estos se encuentran en la corriente de licor ácido (LIM) proveniente de la desmetalización y desulfuración del coque de petróleo por un proceso de digestión ácida vía microondas, esto se hace con la finalidad de poder utilizar este coque como combustible y al mismo tiempo aumentar su valor agregado.

Para la remoción de Ni y V se cuenta con una sustancia llamada lignina la cual es un grupo de polímeros fenólicos que se localiza en el tejido leñoso de las plantas y es considerada un desecho de la industria de la madera. Su estructura permite que sea utilizada como adsorbente, ya que se caracteriza por tener la propiedad de retener sobre su superficie uno o más componentes a partir de un líquido o gas en contacto con ella.

Distintas pruebas de laboratorio realizadas por el grupo de Tecnologías Alternativas Limpias (TECall) de la Universidad Simón Bolívar, califican a la lignina para ser empleada como adsorbente de los metales presentes en el LIM. Con los resultados que se han obtenido a nivel de laboratorio es posible modelar los mecanismos de adsorción, y con ello se podría elaborar el diseño de una planta a escala piloto de adsorción de metales pesados con lignina, aplicando la ingeniería Básica, el cual será el objetivo principal de este trabajo.

Este trabajo cuenta básicamente con tres etapas, la primera se basa fundamentalmente en la búsqueda y revisión de la información referente al proceso de adsorción de metales pesados sobre la lignina, así como el diseño de plantas a pequeña escala, con el fin de sentar las bases teóricas necesarias para el desarrollo del proyecto. En la segunda etapa se realizarán todas las pruebas experimentales con las cuales se evaluarán principalmente el efecto de la influencia del escalamiento que permitirá pasar de la escala laboratorio (a la cual se han desarrollado las pruebas hasta ahora) a la escala piloto que es el objetivo de este trabajo; previamente será necesario el montaje del equipo a escala de laboratorio con la finalidad de proporcionar resultados representativos para la adsorción de metales pesados sobre lignina.

Por último se tiene la etapa de diseño de la planta como tal, en la cual se definirán los aspectos básicos para el diseño, se construirán los documentos característicos del mismo, se estimarán los costos del proyecto y se determinará su factibilidad técnica, económica y financiera.

Finalmente, se espera que el diseño de la planta piloto sea lo suficientemente versátil como para permitir el estudio de otros sistemas de adsorción.

CAPÍTULO I

CONSIDERACIONES GENERALES DEL ESTUDIO

1.1. Planteamiento del Problema

Venezuela es uno de los mayores productores a escala mundial del subproducto conocido como coque de petróleo (CP). Este CP podría ser clasificado como de grado combustible, sin embargo, debido a que exhibe altas concentraciones de azufre y metales pesados (mayoritariamente Níquel y Vanadio) se dificulta la posibilidad de poder emplearlo como combustible y por lo tanto disminuye su precio.

En los últimos años, el grupo de Tecnologías Alternativas Limpias (TECall) de la Universidad Simón Bolívar en Venezuela ha venido desarrollando un proceso de digestión ácida vía microondas para la simultánea desmetalización y desulfuración del coque. Si bien este proceso ha conducido a una remoción importante de los metales presentes en el coque, no resuelve el problema del todo, por cuanto los metales quedan atrapados en una corriente de licores ácidos identificada como “LIM” (licor de irradiación microonda) de la cual deben ser separados a fin de poder reciclar el licor.

En esta vía se propuso como posible agente adsorbente del Ni y V contenido en el LIM, a la lignina proveniente de los licores negros de la industria papelera nacional. Para probar esta hipótesis se analizó la estructura de la lignina y se realizaron pruebas a escala laboratorio que permitieron demostrar que la lignina empleada es un adsorbente competitivo con el carbón activado comercial para el V y superior para el Ni, así como la forma en la que se ve afectado el proceso por el efecto de las siguientes variables: tiempo de residencia, relación cantidad de adsorbente/cantidad de adsorbato, temperatura de operación y pH inicial.

Con la finalidad de ofrecer una alternativa para el mejoramiento del CP a nivel industrial se debe evaluar el efecto que puede tener el escalamiento de la planta a un tamaño mayor sobre la capacidad que tenga la lignina de adsorber los metales pesados, por lo que se hace necesario la instalación de una planta que a escala piloto permita evaluar la mayoría de estos efectos disminuyendo la incertidumbre en el momento de la instalación de la planta a escala industrial. El objetivo de este trabajo es entonces, desarrollar la ingeniería Básica de esta planta piloto, con el fin de que posteriormente TECall lleve a cabo la ingeniería de detalle y logre la instalación de la misma.

La diferencia entre este diseño y los comúnmente llevados a cabo para plantas a escala industrial, es que las correlaciones empleadas en escala industrial normalmente no pueden ser aplicadas a plantas pilotos, por lo que se hace necesario la utilización de heurísticas y de datos experimentales con el fin de obtener correlaciones apropiadas para el dimensionamiento de equipos a esta escala.

1.2. Objetivos

1.2.1. General

Diseñar a nivel básico una planta a escala piloto para la adsorción de metales pesados empleando lignina que permita verificar el efecto de los cambios de las principales variables operacionales.

1.2.2. Específicos

- Establecer la influencia del escalamiento en el proceso de adsorción de Níquel y Vanadio sobre lignina.
- Establecer las bases de diseño.

- Establecer la capacidad de la planta piloto acorde con los resultados del estudio de escalamiento.
- Establecer las variables operacionales a analizar con la planta piloto, así como su rango factible de estudio.
- Establecer los procesos requeridos en la planta piloto.
- Establecer los equipos requeridos para llevar a cabo las diferentes operaciones dentro de la planta.
- Dimensionar a nivel básico los equipos requeridos.
- Construir las hojas de especificaciones de los equipos principales.
- Proponer los mecanismos de control para los equipos de la planta.
- Seleccionar los equipos principales disponibles en el mercado.
- Estimar los costos involucrados para la instalación de la planta.
- Evaluar la factibilidad técnica, económica y financiera del proyecto.

CAPÍTULO II

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Se presentan los resultados obtenidos de la investigación bibliográfica realizada, estos aportan las bases necesarias para un buen entendimiento y análisis del diseño de una planta piloto así como de la utilización de lignina como adsorbente.

Este capítulo hace énfasis en información alusiva al diseño de una planta de proceso, en donde se mencionan los puntos referentes a diagrama de procesos, estrategias de control, ingeniería básica y estimación de costos para evaluar su rentabilidad; además de esto, se presentan los aspectos básicos de una planta piloto tales como aplicaciones y capacidad. Por otra parte, se hace mención al fenómeno de adsorción, a la operación unitaria que debe considerarse para tal fin y a la lignina como adsorbente.

II.1. Diseño de procesos

El diseño de una planta está realizado a partir de palabras, números y dibujos, un ingeniero piensa de manera natural en términos de bosquejos y diagramas, los cuales son sus dibujos. Luego que plasma de forma clara y específica todas sus ideas, debe evaluar si el proyecto es técnicamente factible, y con esto ya contaría con las herramientas necesarias para determinar la viabilidad económica del mismo. El diseño de proceso se lleva a cabo en varias etapas, estas son ingeniería Conceptual, Básica y de Detalle.

La primera etapa a desarrollar en el diseño de una planta de procesos químicos es la ingeniería Conceptual, la cual abarca la selección de la alternativa más conveniente para la realización del mismo, determina la visión del proyecto, establece las bases y alcances de la ingeniería Básica y permite estimar los costos preliminares. Después de

esta etapa, continúa la ingeniería Básica, aquí se desarrollan las bases y criterios de diseño, se alcanzan las especificaciones de los equipos involucrados garantizando la instalación de los procesos. Finalmente se aplica la ingeniería de Detalle donde se desarrollan los documentos necesarios para la compra de los equipos y materiales para la planta.

Es importante destacar que en este trabajo se pretende alcanzar hasta la ingeniería Básica, por tal motivo se hace un mayor énfasis sobre los alcances de esta etapa de diseño.

II.1.1. Ingeniería básica

Al momento de diseñar una planta de procesos químicos, se debe desarrollar la ingeniería Básica, los productos de esta etapa son:

- Bases de diseño y criterios de diseño.
- Descripción del proceso.
- Diagramas de proceso (DFP, DTI y DSE).
- Filosofía de control.
- Lista de equipos y tuberías.
- Especificaciones del equipo.
- Especificaciones de instrumentos.
- Especificaciones de tuberías.

Mediante todos los puntos anteriormente mencionados es posible cumplir con los objetivos de la ingeniería Básica que son:

- Garantizar productos finales en especificación.
- Información para estimados de costos de inversión.
- Información sobre la factibilidad técnica del proyecto.
- Requerimiento de materia prima y servicios entre otros.

- Garantizar la instalación de los procesos.
- Proporcionar las bases para la ingeniería de detalle.

La ingeniería de Detalle presenta los planos de las plantas donde se ubican los equipos requeridos, así como los servicios y obras civiles requeridas, conformando de ésta manera la presentación del diseño de la planta. De ésta forma se cuenta con la información necesaria para continuar con los proyectos de construcción y operación de la misma.

Por las razones antes expuestas, es necesario que la adecuada elaboración de diagrama de procesos sea un objetivo importante a cubrir en la documentación del proyecto de diseño de una planta, esto se logrará con el apoyo de las normas PDVSA, ASME e ISA.

II.1.2. Diagramas de proceso

Para resolver un problema de balance de masa, el ingeniero comienza con un bloque que representa al proceso y luego muestra las corrientes que entran y salen, con sus cantidades y propiedades. Esta representación primaria se denomina diagrama de bloque del proceso (DBP). En caso de que se solicite describir un proceso, se debe comenzar a bosquejar el equipo, mostrar las interconexiones, las condiciones y los flujos de operación; tal bosquejo se desarrolla en diagramas de flujo, los cuales son representaciones diagramáticas detalladas de los equipos, la secuencia de operación y el desempeño esperado de una planta propuesta o el desempeño real de una planta en operación.

Al momento de diseñar una planta de procesos químicos se deben considerar las bases y criterios de diseños, estos parámetros forman parte de la ingeniería Conceptual y están constituidos por las características y condiciones de la materia prima, la capacidad de la planta, las especificaciones de insumos y productos finales,

las características de los servicios industriales, el factor de servicio, el manejo de efluentes, los requerimientos de almacén, las condiciones del sitio y los códigos y normas aplicables.

Turton y otros (1998) indican, que el diagrama de flujo de un proceso (DFP) es una representación esquemática del proceso, las condiciones de operación normal y las condiciones del proceso; también se indican en él los efluentes (líquidos, gases o sólidos) emanados del proceso y su disposición. El diagrama incluye el balance de masa e información para el diseño y especificación de equipos, de igual forma muestra la secuencia del procesamiento desde el ingreso de la materia prima hasta la obtención de los productos finales. El DFP refleja la filosofía básica del proceso y contiene la información necesaria para el desarrollo del diagrama de tuberías e instrumentación (DTI). Adicionalmente este documento deberá servir como guía para la operación de la planta.

En el DFP se deben presentar los equipos de proceso, en cada equipo se debe indicar el código de identificación, el nombre del equipo y las características de operación normal. Estos equipos deben estar conectados a través de las líneas de procesos, dichas líneas van desde y hacia los equipos, se identifican con un número dentro de un rombo para así referirlas a los balances de masa y energía. Además de lo mencionado, debe contener el balance de masa, es decir se proporciona información de forma resumida (tabla) de las corrientes de alimentación, intermedias, reciclos y productos acabados, la información que debe presentarse en forma de tabla es la siguiente:

- Número de las corrientes.
- Descripción de las corrientes.
- Flujo másico y/o volumétrico.
- Temperatura y presión de operación.
- Densidad o gravedad específica.
- Viscosidad absoluta.

- Estado físico.

Por otra parte, el DTI (Turton y otros, 1998) muestra el proceso principal con los detalles mecánicos de los equipos, tuberías y válvulas, así como también, los lazos de control para garantizar la segura operación de la planta. La información contenida en estos diagramas sirve de guía para las actividades de ingeniería y construcción de plantas por lo que requiere un alto grado de precisión y una completa información. Se preparan DTI para el proceso, para los servicios industriales y para los sistemas de efluentes. Los DTI sirven como documentos básicos para definir el diseño de la planta.

Los DTI muestran todos los equipos de proceso, incluyendo los equipos de respaldo con el mismo nivel de detalle, cada uno de estos debe contener el código de identificación, nombre, características de diseño, espesor y tipo de aislamiento; así mismo se presentan las tuberías y accesorios, tanto de proceso como de servicio, las cuales se identifican con el diámetro nominal, tipo de servicio, número de tubería, especificación y dirección de flujo. Además de lo anterior, se deben presentar todas las válvulas (que no sean para el control), para estas válvulas se debe indicar el tamaño y el tipo de material.

De la misma forma el DTI debe contener la instrumentación y control de proceso, por ello se muestran todos los lazos de control en los equipos, identificándose todas las variables así como la acción de los controladores, para ello se debe tener conocimiento sobre las estrategias de control básicas comúnmente utilizadas.

Por otra parte, Turton y otros (1998) señalan, que los diagramas de sistemas de efluentes (DSE) muestran todos los efluentes (gases, líquidos y sólidos) y su tratamiento para garantizar la calidad ambiental, por lo tanto éste representa la distribución de efluentes y tratamientos dentro de la planta así como los sistemas de alivios y mechurrios.

II.1.3. Estrategias de control

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

En la mayoría de las plantas de procesos (Corripio, 2004) existen cientos de variables que se deben mantener en algún valor determinado, esto requería una gran cantidad de operarios, por ello, sería preferible realizar el control de manera automática, es decir, contar con instrumentos que controlen las variables sin necesidad de que intervenga el operador. Esto es lo que significa el control automático de procesos.

Los cuatro componentes básicos de todo sistema de control son:

- Sensor, que también se conoce como elemento primario.
- Transmisor, el cual se conoce como elemento secundario.
- Controlador, que es el cerebro del sistema de control.
- Elemento final de control, frecuentemente se trata de una válvula de control en la mayoría de los casos. Otros elementos finales de control comúnmente utilizados son las bombas de velocidad variable, los transportadores y los motores eléctricos.

Los principios del funcionamiento del sistema de control se pueden resumir con tres letras.

- Medición (M): la medición de la variable que se controla se hace generalmente mediante la combinación de sensor y transmisor.
- Decisión (D): con base en la medición, el controlador decide que hacer para mantener la variable en el valor que se desea.

- Acción (A): como resultado de la decisión del controlador se debe efectuar una acción en el sistema, generalmente ésta es realizada por el elemento final de control.

Es necesario definir algunos de los términos que se usan en el campo del control automático de procesos.

- Variable controlada, es la variable que se debe mantener o controlar dentro de algún valor deseado.
- Punto de control, es el valor que se desea que tenga la variable controlada.
- Variable manipulada, es la variable que se utiliza para mantener a la variable controlada en el punto de control.
- Perturbación o trastorno, cualquier variable que ocasione que la variable de control se desvíe del punto de control.
- Circuito de lazo abierto, se refiere a la situación en la cual se desconecta el controlador del sistema, es decir, el controlador no realiza ninguna función relativa a como mantener la variable controlada en la acción efectuada por el controlador y no afecta a la medición. Ésta es una deficiencia fundamental del diseño del sistema de control.
- Control de circuito cerrado, se refiere a la situación en la cual se conecta el controlador al proceso; el controlador compara el punto de control (la referencia) con la variable controlada y determina la acción correctiva.

En cuanto a los tipos de estrategias de control se tiene la aplicación del control por retroalimentación y el control por acción precalculada.

II.1.3.1. Control por retroalimentación

El control por retroalimentación o también llamado circuito de control por retroalimentación (Corripio, 2004) es una técnica que fue aplicada por primera vez hace casi 200 años por James Watt, para controlar un proceso industrial; en este

procedimiento se toma la variable controlada y se retroalimenta al controlador para que éste pueda tomar una decisión.

La ventaja del controlador por retroalimentación consiste en que es una técnica muy simple que compensa todas las perturbaciones. Cualquier perturbación puede afectar a la variable controlada, cuando ésta se desvía del punto de control, el controlador cambia su salida para que la variable regrese al punto de control. El circuito de control no detecta que tipo de perturbación entra al proceso, únicamente trata de mantener la variable controlada en el punto de control y de ésta manera compensar cualquier perturbación.

Las desventajas del control por retroalimentación estriban en que únicamente puede compensar la perturbación hasta que la variable controlada se ha desviado del punto de control, esto quiere decir, que la perturbación se puede propagar por todo el proceso antes de que pueda compensar el control por retroalimentación.

II.1.3.2. Control por acción precalculada

El control por retroalimentación es la estrategia de control más común en la industria de procesos, ha logrado tal aceptación gracias a su simplicidad. Sin embargo, en algunos procesos el control por retroalimentación no proporciona la función del control que se requiere, por lo que se deben diseñar otros tipos de control. El objetivo del control por acción precalculada es medir las perturbaciones y compensarlas antes de que la variable controlada se desvíe del punto de control; si se aplica de manera correcta, la variable controlada no se desvía del punto de control.

Es importante destacar que en esta estrategia de control aun están presentes las tres operaciones básicas. Los sensores y los transmisores se encargan de realizar la medición; la decisión la toma el controlador por acción precalculada o por retroalimentación, y la acción la realiza el elemento final de control.

Además de las dos estrategias de control ya mencionadas existen otras estrategias de control aun más avanzadas. En 2004, Corripio señala que las técnicas avanzadas de control más comunes son las que se muestran a continuación:

- Control de razón. Ésta técnica se fundamenta en mantener la relación entre dos o más variables del proceso, en donde una o más serán consideradas como “salvajes” porque no es posible controlarlas sino únicamente medirlas y a partir de esto se controla una variable para compensar la variación.
- Control en cascada. Se utiliza cuando la variable manipulada está sometida a perturbaciones externas que modifican su valor, por lo tanto es necesario contrarrestarlas antes que perturben a la variable controlada principal. En este caso se requiere de un lazo de control secundario o esclavo.
- Control por superposición. Esta técnica es utilizada cuando una variable manipulada de un sistema puede o debe ser manejada por varias condiciones del proceso, este control se puede deber a condiciones de seguridad o por restricciones operacionales.
- Control selectivo. Esta técnica de control se fundamenta en la selección de la variable de proceso más importante para mantener las condiciones de un proceso entre variables alternativas por razones de economía, eficiencia y seguridad.
- Control de rango dividido. Se aplica principalmente, cuando el rango de la variable manipulada es muy amplio y cuando se tienen dos variables manipuladas con diferentes efectos sobre la variable controlada. Como ejemplo, esta técnica se utiliza en procesos de enfriamiento y calentamiento, o en control de pH.

En líneas generales las técnicas de control avanzadas son más costosas, requieren de una mayor inversión en el equipo y en la mano de obra necesaria para su diseño, implementación y mantenimiento. Por ello, es necesario justificar la inversión de capital antes de implementar algún sistema. El mejor procedimiento es diseñar e implementar primero estrategias de control sencillas, teniendo en mente que si no resulta satisfactoria es justificada la utilización de una estrategia más avanzada. Sin

embargo, es importante estar conciente de que en estas estrategias más avanzadas aún se requiere alguna retroalimentación de compensación.

Una vez fijadas las bases y criterios de diseño, construidos los diagramas de procesos y establecidas las estrategias de control, es conveniente realizar una estimación de costos preliminar que permita evaluar la factibilidad económica del proyecto.

II.1.4. Estimación de costos durante el diseño de proceso

Una vez que se conoce las condiciones del proceso a diseñar, es decir, cuando las bases y criterios de diseño están bien definidos, así como los equipos necesarios para alcanzar los objetivos, es posible estimar un costo de capital. Turton (1998) señala que la estimación de costo de capital se refiere a los costos de construcción de una planta nueva o a las modificaciones en la manufactura de una planta química existente; además, este estudio cuenta con una clasificación que está directamente relacionada con los alcances del proyecto.

La principal razón de la estimación de costos es evitar el fracaso de un proyecto al incluir todas las unidades de operación necesarias. Sin embargo, dependiendo de la clasificación empleada se contará con mayor o menor precisión, esto depende directamente de la información con la que se cuenta para realizar dicho estudio.

En 1998, Turton y otros sugieren que la estimación de costos de capital, generalmente considerada en cualquier industria de procesos químicos, cuenta con la siguiente clasificación:

- Estimación del orden de magnitud. Típicamente representa los costos del proceso completo con la información previa a la construcción de la planta y es ajustado considerando apropiadamente el factor de escalamiento, la capacidad y la inflación; además, requiere como mínimo del diagrama de bloques del proceso.

- Estimación de estudio. Éste tipo de estimación requiere de una lista de los principales equipos de proceso, esto incluye las bombas, compresores, turbinas, recipientes e intercambiadores de calor entre otros, con la finalidad de incluir en la estimación un aproximado del costo de los equipos a partir de la cantidad y de las dimensiones. La estimación de costos de los equipos es un factor importante en la estimación de capital.
- Estimación preliminar. Para éste tipo de estimación se requiere conocer las dimensiones de los equipos de forma más precisas, adicionalmente, se debe tener información de diseño sobre las tuberías, la instrumentación, el sistema eléctrico y una estimación de los servicios industriales, para ello se debe contar con los DFP, los planos de la planta y los diagramas de elevación.
- Estimación definitiva. Éste tipo de estimación requiere de especificaciones preliminares de todos los equipos, de los servicios industriales, de la instrumentación, del sistema eléctrico y de los productos de la planta, para ello se debe contar con los DFP, DTI preliminares, y el balance de los servicios industriales.
- Estimación detallada. Esta estimación requiere de la ingeniería completa del proceso y de todo lo referente a las entradas y salidas del mismo, para ello se debe contar con los DFP, DTI, balances de servicios industriales, planos de la planta, diagramas de elevación entre otros, es decir, se debe contar con todos los diagramas que se requieren para la construcción de la planta; además se debe tener información sobre las cuotas de todo lo necesario para la obtención del producto. Esta estimación detallada se realiza antes de comenzar con la construcción de la planta.

Una vez conocida la clasificación para la estimación de costos de capital se debe fijar que tan riguroso debe ser el resultado esperado para la estimación y la cantidad de información con la que se cuenta para el estudio, esto depende del tipo de planta a construir, de su escala y de los objetivos que se aspiren alcanzar con la construcción de la misma.

Una clasificación de las plantas químicas según su tamaño es escala de laboratorio, escala banco, escala piloto y escala comercial, debido al interés y a los alcances planteados para este trabajo, la escala considerada debe ser la piloto.

II.2. Planta piloto

La evolución del desarrollo de un proceso o de una tecnología, desde sus fases iniciales de generación de las ideas y conceptos básicos, seguida por su demostración a escala laboratorio y la fase culminante de dicho desarrollo, que comprende el diseño, la construcción y puesta en marcha de una unidad comercial, requiere pasar por una etapa intermedia e insalvable, pero a la vez invaluable, la cual es la demostración a escala de planta piloto.

En 1996, Kum señala que el concepto de planta piloto data como mínimo desde el año 1912, cuando J. Whiting indicaba que era absurdo pasar directamente desde la escala laboratorio a la industrial, principalmente con la aparición en escena de la ingeniería química como un arte/ciencia, y a la vez, recomendaba pasar por tres etapas intermedias antes de ir a la escala de planta industrial.

Una planta piloto (Kum, 1996), pudiera definirse como una instalación experimental, de dimensiones comprendidas entre equipo de laboratorio y planta comercial. Está conformada por una secuencia de equipos, instrumentos, accesorios, líneas, entre otros, dispuestos de forma lógica y apropiada para simular, homologar o reproducir un determinado proceso, o una parte importante de éste, con el fin de generar entre otras cosas, información para un diseño comercial, soluciones a problemas de escalamiento o de operación y ampliación de conocimiento, todo ello asociado al diseño y operación de una planta comercial.

Por otra parte, un aspecto de vital relevancia que ha de ser considerado, tanto en el diseño, como en la operación de una planta piloto, es el pertinente a la seguridad; ya que por lo general y por su naturaleza, las actividades investigativas que se llevan a cabo a escala de planta piloto envuelven incógnitas e incertidumbres, por ello, a esta escala se tiene la existencia de riesgos que no existen a la nivel de laboratorio. Estos riesgos pueden tornarse peligrosos a escala piloto y más aún a nivel comercial; de allí que, la seguridad operativa debe ser considerada como una prioridad por los responsables del diseño.

La naturaleza cambiante que caracteriza a una planta piloto, constituye otro factor que evidencia aún más la necesidad de considerar al máximo los aspectos de seguridad inherentes a su diseño y operación. Por lo anteriormente señalado, es conveniente incluir en la estrategia de diseño acciones tales como: mantener una comunicación permanente con los químicos o científicos asociados al proyecto, un conocimiento detallado sobre las características físicas y químicas (toxicidad, volatilidad y corrosividad, entre otros) de las sustancias a ser manejadas y de las reacciones que van a ser investigadas, así como las condiciones de severidad, fundamentalmente presión y temperatura, tal como señala Palluzi (1992).

También es importante señalar que el costo de una instalación a escala piloto depende fundamentalmente de varios factores, como lo son:

- Dimensiones (tamaño y capacidad entre otros).
- Propósito (usos múltiples, usos específicos y uso general).
- Complejidad (asociada a cantidad y variedad de equipos e instrumentos y de variables a monitorear y controlar).
- Severidad de la operación y grado de automatización, el cual está asociado al nivel de atención requerido (permanente, intermedia y mínima u operación desatendida).

Una planta piloto puede presentar diversas aplicaciones, éstas dependerán de los objetivos que se deseen alcanzar y del tipo de proceso a estudiar.

II.2.1. Aplicación de una planta piloto

La experimentación en investigación de procesos mediante la utilización de plantas piloto, constituye una fase fundamental para el desarrollo de tecnologías óptimas, competitivas, confiables y económicas, principalmente cuando el proceso en desarrollo constituye en sí mismo una innovación tecnológica, cuando involucra alta complejidad, cuando la investigación requerida para una planta industrial es considerable, o cuando existe un alto nivel de incertidumbre en cuanto a su escalamiento.

Por lo general, los objetivos más comunes (Kum, 1996) que se persiguen cuando se diseñan, construye y opera una planta piloto son:

- Realizar investigación básica y aplicada alrededor de una tecnología en fase de desarrollo.
- Efectuar evaluaciones económicas y/o de impacto ambiental de un proceso.
- Generar información para el diseño de una planta comercial.
- Prestar servicio y apoyo técnico.
- Preparar muestras representativas de productos (por ejemplo para fines de mercadeo).

Naturalmente que la diversidad y el alcance de los objetivos que se puedan pretender en una planta piloto dependen fundamentalmente del diseño de la misma en lo que respecta a flexibilidad, complejidad y capacidad, entre otros aspectos.

II.2.2. Capacidad de una planta piloto

Las dimensiones o el tamaño de una planta piloto usualmente están directamente relacionadas con su capacidad, así como también con el objetivo para el cual ha sido diseñada y construida. Aún cuando se han establecidos algunos criterios, más o menos concretos en relación a este aspecto, es importante señalar que la decisión a la hora de establecer la capacidad de una planta piloto debe estar basada fundamentalmente en el objetivo que se persiga con su diseño y en la consideración de que, tanto su diseño como los resultados que en ella se generan, deberán de ser escaladas a planta industrial.

Si el objetivo (Kum, 1996) de una planta piloto es realizar evaluaciones comparativas de la producción, sometiendo el proceso a diversas condiciones, con la finalidad de determinar las condiciones de operación (temperatura y presión entre otras) óptimas; es posible que para tal fin una planta de baja capacidad ($60\text{-}500\text{cm}^3/\text{h}$) sea suficiente. Mientras que si el objetivo que se persigue es generar información técnico-económica para un diseño comercial, preparar muestras de un producto a los fines de mercadeo o producir cargas para evaluarlas en otras plantas de menos capacidad, se requerirá, por conveniencia, disponer de una planta de mediana capacidad ($100\text{-}50000\text{cm}^3/\text{h}$).

En 1992, Palluzi señala que cuando el diseño de una planta está asociado a un proceso altamente novedoso que involucra etapas o equipos no convencionales o no escalables, con facilidad convendrá pasar al menos por dos o tres etapas intermedias a escala de planta piloto. Dichas etapas irían, desde una planta piloto de mediana capacidad, pasando por plantas usualmente denominadas PDU (Process Demonstration Unit) cuya capacidad pudiera oscilar entre $30\text{L}/\text{h}$ y $1000\text{L}/\text{h}$, hasta llegar a lo que se denomina planta prototipo o de demostración semi-comercial, la cual debe reproducir en todos los aspectos, excepto en su capacidad, a lo que sería la futura planta industrial.

En la figura N°1 se indica una clasificación de las plantas, entre laboratorio y producción a escala industrial, esta clasificación está basada en la capacidad de sus recipientes principales tales como columnas y reactores entre otros, cuyas capacidades oscilan entre 5 litros como máximo para equipos de laboratorio y 2000 litros como máximo para plantas piloto. Sin embargo, es posible convertir de una escala a otra manteniendo las características propias del proceso, por tal motivo es necesario establecer la forma de lograrlo como parte importante del diseño de una planta de proceso.

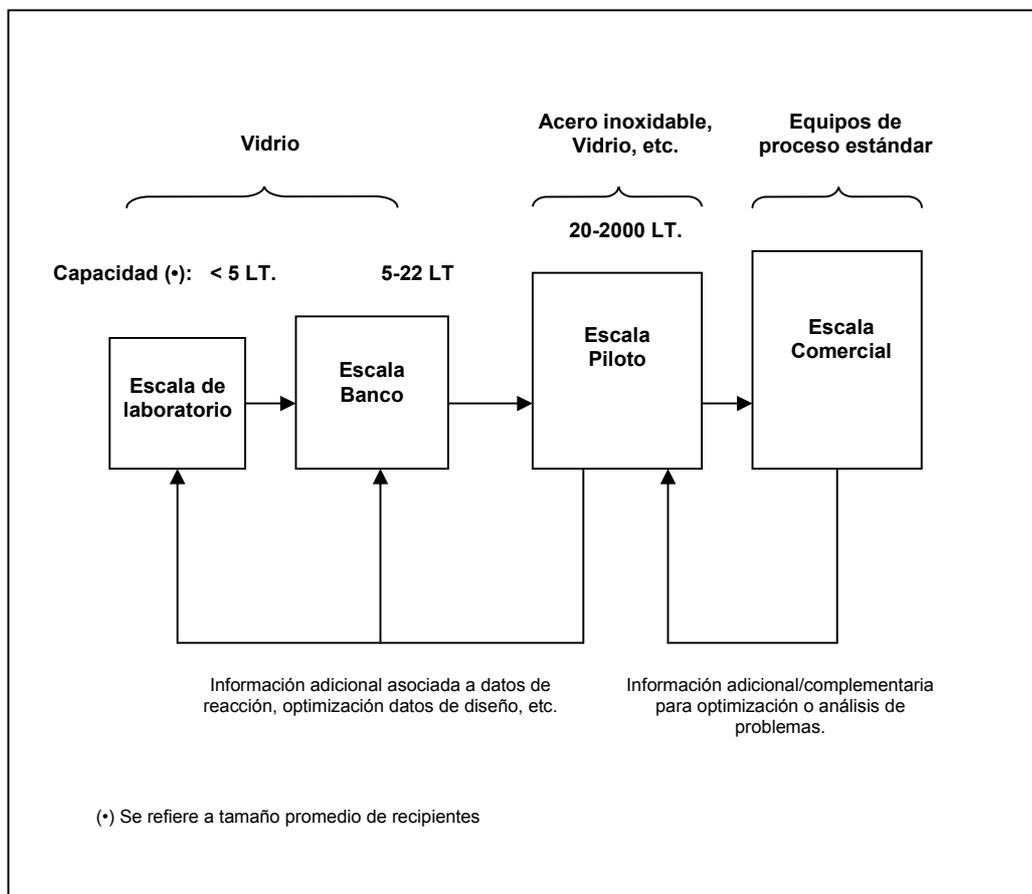


Figura N°1. Capacidad de plantas según etapas en el desarrollo de un proceso (Kum, 1996).

II.2.3. Escalamiento de proceso

En la investigación y desarrollo de los procesos químicos se establece una etapa, que con frecuencia resulta un problema complejo, que es la extensión y aplicación de los resultados del laboratorio a escala industrial y comercial, es decir, el denominado cambio de escala.

Calleja (1999) señala que la operación de cambio de escala tiene como objetivo reproducir en escala superior los resultados alcanzados en el laboratorio. En términos prácticos, se trata de obtener al menos las mismas conversiones, selectividades y rendimientos cumpliendo con las especificaciones exigidas.

Aunque hoy día los modelos de simulación de procesos químicos han experimentado un considerable desarrollo y resultan útiles para estudiar los problemas del cambio de escala sin otros datos que los obtenidos en el laboratorio, continúan siendo insuficientes a la hora de asegurar el comportamiento del proceso a escala industrial. Por ello, sigue siendo importante una buena planificación y un estudio experimental completo del cambio de escala, en el cual hay que tomar en cuenta varias consideraciones.

II.2.4. Consideraciones del cambio de escala

Al momento de proceder al cambio de escala hay que tener en cuenta que los sistemas de transformación de la materia son sistemas complejos, en el sentido de que están formados por un gran número de elementos que se encuentran interconectados por numerosas variables, y que tienen que satisfacer, además de las leyes de equilibrio y de la cinética química; los balances de materias, cantidad de movimiento y energía para cada una de las fases presentes.

Todos los procesos químicos implican, además de la conversión química, diversos fenómenos que generalmente no actúan de modo independiente sino acoplados de forma simultánea. Entre éstos se encuentran: los equilibrios termodinámicos, físicos y químicos, las reacciones químicas paralelas, la transmisión de calor, la transferencia de materia (en una o más fases) y la circulación de los fluidos (por convección natural o forzada).

Cuando una de los fenómenos que determina la velocidad con que transcurre el proceso global es mucho más lento que los demás, se denomina etapa controlante y las ecuaciones que han de considerarse en el diseño resultan simplificadas en cada caso particular dependiendo de cual sea el fenómeno más lento.

La teoría de la semejanza, es utilizada para el proceso de cambio de escala, debido a su sencilla aplicación y buenos resultados.

II.2.5. Teoría de la semejanza

Calleja (1999) explica que esta teoría se ocupa únicamente de la forma de los sistemas fisicoquímicos, prescindiendo del resto de sus características (tamaño y composición), entendiéndose por forma no sólo la que se refiere a la geometría de los equipos sino a los perfiles de las propiedades intensivas en el interior del mismo: perfiles de velocidades, fuerzas o presiones, temperaturas y concentraciones.

Cuando se emplean equipos de reducido tamaño (maquetas), operando con o sin reacción química, para la obtención de datos útiles del cambio de escala fundamentado en la teoría de la semejanza, se parte del conocimiento previo de los módulos adimensionales que caracterizan los principales mecanismos que controlan el proceso.

Cuando se desea determinar el valor de una variable en un equipo de mayor tamaño (prototipo), hay que proceder en primer lugar a realizar un análisis dimensional, que consiste en agrupar las variables que intervienen en el proceso, en un conjunto de combinaciones sin denominaciones físicas llamadas módulos adimensionales, y se busca una relación entre ellos. Luego se aplica el principio de la semejanza, el cual implica que manteniendo la escala en ambos módulos estos mantendrán su valor. Cuando se cumple esta circunstancia se dice que la maqueta y el prototipo son semejantes.

En Ingeniería Química no siempre es posible que se cumpla simultáneamente la igualdad de todos los factores que conducen a la semejanza estricta, por ello, en función de cuales sean las condiciones que cumplan los sistemas, se pueden establecer distintos tipos de semejanza parcial: semejanza geométrica, semejanza mecánica (dinámica y cinemática), semejanza térmica, semejanza de concentraciones y semejanza química (Calleja, 1999).

Es posible también establecer las condiciones que han de satisfacer los módulos, es decir, las variables que intervienen en el fenómeno para que se cumpla cada una de las semejanzas parciales.

Por su parte, la semejanza geométrica existe cuando todos los puntos del modelo tienen un punto correspondiente en el prototipo y viceversa, es decir, todas las dimensiones lineales del sistema aumentan o disminuyen en una misma proporción. El valor que representa esta proporción es denominado factor de escala geométrica.

Cuando se habla de semejanza mecánica, ésta se puede presentar como dinámica y cinemática. La semejanza dinámica es cuando además de existir semejanza geométrica entre ambos modelos, también existe semejanza de los perfiles de fuerzas. De acuerdo con el principio de semejanza, eso exige que exista un único valor de factor de escala para todas las fuerzas, es decir, que todas las fuerzas que intervienen

en el fenómeno mantengan una relación constante entre sus valores en todos los puntos correspondientes de maqueta y de prototipo. Por otra parte, la semejanza cinemática (semejanza de los perfiles de velocidad), se caracteriza porque los elementos de fluidos situados en puntos específicos recorrerán trayectorias semejantes con velocidades proporcionales siempre que los sistemas sean dinámicamente semejantes, por tal motivo se dice que ésta se encuentra ligada a la semejanza dinámica.

Cuando se supone la igualdad de los perfiles de temperatura en ambas escalas (maqueta y prototipo), se habla de semejanza térmica. Para ello, es condición previa no sólo la semejanza geométrica sino también la semejanza cinemática, como consecuencia de la directa intervención del movimiento del fluido en la velocidad con que se produce la transmisión de calor, que determina el perfil térmico.

Una de las semejanzas más compleja es la que se refiere a la que aparece cuando son semejantes los perfiles de concentraciones en maqueta y prototipo, esto es la semejanza de concentraciones. Precisa de la existencia previa de semejanza geométrica, cinemática y térmica; la condición de esta semejanza se traduce en la necesaria igualdad entre maqueta y prototipo de todos los módulos adimensionales que relacionan velocidades de transporte de materia del componente de interés por diferentes mecanismos y su velocidad de generación por reacción química.

La velocidad con la que transcurren los procesos químicos está determinada por la temperatura y la concentración de los reaccionantes que intervienen en la misma. Por ello, la semejanza química, la cual es la semejanza más compleja, requiere como condición necesaria la existencia de semejanza térmica y de concentraciones, requiriendo la igualdad en maqueta y prototipo de todos los módulos adimensionales correspondientes.

Tal como se ha mencionado, para establecer cada una de las semejanzas es necesario previamente conocer los módulos adimensionales correspondientes, estos se obtienen a partir del análisis dimensional del proceso a estudiar.

II.2.5.1. Análisis dimensional

Con la finalidad de obtener los módulos adimensionales que caracterizan un fenómeno fisicoquímico se emplea el método de Rayleigh. Este método fue propuesto en 1899 y constituye un procedimiento simple y directo para agrupar las variables en números adimensionales caracterizándose por tener una amplia aplicación. Se aplica a partir del conocimiento previo de las variables que intervienen en el fenómeno y consta de los siguientes pasos (Calleja, 1999):

- Se expresa una de las variables según la forma de la ecuación (1).

$$Y = CX_1^{a_1} X_2^{a_2} X_3^{a_3} X_4^{a_4} \dots X_n^{a_n} \quad (1)$$

Donde Y generalmente es la variable de mayor interés, y se expresa como una función potencial de las restantes variables (X_i) y de las constantes dimensionales del sistema de unidad elegido, que estarán elevadas a exponentes a determinar, a_i . Además, se cuenta con un factor adimensional (C), habitualmente relacionado con la geometría del sistema.

- Las variables y constantes dimensionales son sustituidas en la ecuación (1) por sus ecuaciones de dimensiones, en un mismo sistema de unidades.
- Se plantea una ecuación de condición de homogeneidad para cada una de las unidades fundamentales, estableciendo que el exponente al que están elevadas cada una de las unidades fundamentales en el primer miembro de la ecuación debe ser igual a la suma de los exponentes a los que se encuentra elevada esa misma unidad en los términos que constituyen el producto en el segundo miembro.
- Siendo n el número de variables a considerar, el número de incógnitas (exponentes a determinar) será $n-1$. Por lo tanto, si el sistema elegido tiene p

unidades fundamentales, es decir, p ecuaciones de condición, el sistema normalmente estará indeterminado, ya que $(n-p-1) > 0$. Esto hace que sea necesario fijar $n-p-1$ incógnitas para que el sistema pueda ser resuelto y calcular de ese modo las p incógnitas (exponentes) restantes, expresadas en función de las fijadas previamente. Cuando dos o más ecuaciones de condición (c) resulten equivalentes, únicamente una de ellas establece una condición independiente, por lo que el número de ecuaciones útiles se reduce a la ecuación (2).

$$p' = p - c + 1 \quad (2)$$

Donde p' es número de ecuaciones útiles, para aplicar la ecuación (2) habría que fijarse un número mayor de incógnitas ($n-1-p'$) para obtener las p' incógnitas restantes.

- Los exponentes así calculados junto con los elegidos previamente se sustituyen en la función potencial inicial, agrupándose las variables elevadas a los mismos exponentes. De este modo se obtiene un módulo adimensional π_1 elevado a la unidad, que suele mantenerse en el primer miembro, mientras que en el segundo miembro aparecen $(n-1-p)$ o $(n-1-p')$ grupos adimensionales π_i elevados a los exponentes fijados previamente, constituyéndose en las nuevas variables independientes del sistema.

Así, finalmente se obtiene una relación como la ecuación (3).

$$\pi_1 = \phi(\pi_2, \pi_3, \dots) \quad (3)$$

La expresión (3) contiene algunos módulos que representan razones con un sólo término en el numerador y otro en el denominador; dichos módulos se denominan factores de forma y suelen representarse por ω_i . Así, es frecuente expresar (3) como la ecuación (4).

$$\pi_1 = \phi(\pi_2, \pi_3, \omega_1, \omega_2, \dots) \quad (4)$$

Por otra parte, además de la aplicación de la teoría de la semejanza existen modelos tales como el de Bohart Adams, Tiempo de Servicio de Altura de Lecho, Thomas, Michaels y Brauch Schlunder entre otros que permiten obtener parámetros importantes sobre el proceso de adsorción en lecho fijo. Sin embargo, el seleccionado para el proceso de escalamiento de la planta desde escala laboratorio a piloto es el de Tiempo de Servicio de Altura de Lecho, debido a la simplicidad tanto del procedimiento experimental requerido como el de los cálculos involucrados para la obtención de los parámetros del proceso.

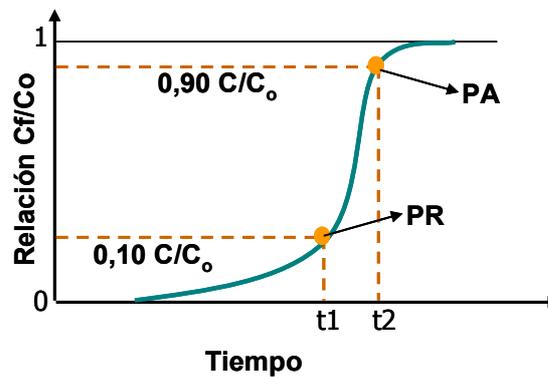
II.2.6. Modelo Tiempo de Servicio de Altura de Lecho (Bed Depth Service Time)

Con la finalidad de conocer las variables de diseño que afectan un proceso de adsorción en lecho fijo se cuenta con modelos que permiten analizar la columna, uno de éstos es el modelo Bed Depth Service Time (BDST) que según Zulfadhly y otros (2001), permite predecir la relación entre la altura de lecho y el tiempo de servicio en función de la concentración del proceso y de los parámetros de adsorción, empleando una representación gráfica denominada curva de ruptura, la cual se obtiene experimentalmente a partir de un sistema de adsorción en una columna de lecho fijo a escala laboratorio.

Las curvas de ruptura son perfiles que relacionan las concentraciones correspondientes al fluido y a la alimentación (C/C_0) en función del tiempo, esto ocurre porque la mayor parte de la transferencia de materia tiene lugar a la entrada del lecho, donde el fluido se pone en contacto con adsorbente fresco, al transcurrir el tiempo, la zona de transferencia de masa se mueve en el lecho hasta su agotamiento (McCabe, 1991).

En el caso ideal la zona de transferencia de materia sería infinitamente estrecha y la curva de ruptura sería una línea vertical de 0 a 1. En la práctica, debido a la existencia de resistencias a la transferencia de materia, la curva presenta una forma sigmoideal en

donde la región de mayor cambio de concentración es la llamada zona de transferencia de materia y sus límites frecuentemente se toman cuando la relación C/C_0 se encuentra entre 0,90 y 0,10; éste comportamiento se observa en la figura N°2.



PR: punto de ruptura. PA: punto de agotamiento.

Figura N°2. Curva de ruptura (McCabe, 1991).

Sobre la curva de ruptura mostrada en la figura N°2 es posible señalar dos puntos muy importantes como lo son: el de ruptura y el de agotamiento. Con frecuencia el punto de ruptura se toma como una concentración relativa de 0,10 que representa el punto en donde se ha adsorbido la mayor cantidad de metales, a partir de allí comienza a aumentar la concentración de metales en la solución tratada hasta llegar al punto de agotamiento, que está representado por el 0,90 de la relación C/C_0 .

El sistema a escala de laboratorio que permite obtener los puntos para la construcción de las curvas de rupturas consiste en hacer pasar una solución que contenga contaminantes a través de una columna de lecho fijo rellena con el adsorbente a estudiar, esto se realiza a una velocidad de flujo constante y para tres alturas de lecho diferentes con la finalidad de aplicar el modelo BDST, las tendencias de las curvas de ruptura obtenidas para estas tres alturas de lecho, manteniendo constante la concentración inicial de la solución y el flujo de alimentación, se muestran en la figura N°3, donde además se evidencia que a mayor altura de lecho más desplazada

hacia la derecha se encuentran las curvas, esto se debe a que se tarda más tiempo en agotarse el lecho estudiado, tal como señala Hutchins (1973).

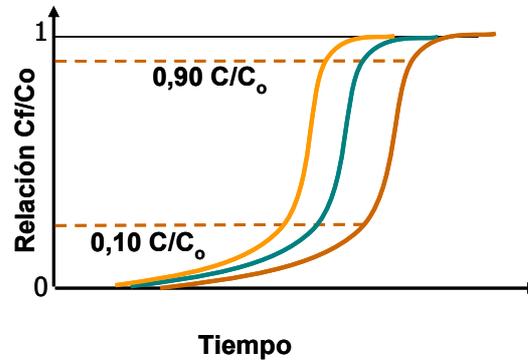


Figura N°3. Curvas de ruptura a diferentes alturas de lecho (Hutchins, 1973).

Zulfadhly y otros (2001), señalan que el modelo BDST permite predecir la relación entre la altura de lecho y el tiempo de servicio en función de la concentración del proceso y de los parámetros de adsorción mostrados en la ecuación (5).

$$\ln\left(\frac{C_0}{C} - 1\right) = \ln\left(e^{\frac{KaNoX}{F}} - 1\right) - KaCot \quad (5)$$

Este modelo se basa en la suposición de que la tasa de adsorción es controlada por la superficie de reacción del adsorbente y por la cantidad no utilizada del mismo.

Por su parte, Hutchins en 1973 propuso una relación lineal entre la altura de lecho y el tiempo de servicio, tal como se muestra en la ecuación (6).

$$t = \frac{No}{CoF} X - \frac{1}{KaCo} \ln\left(\frac{C_0}{C} - 1\right) \quad (6)$$

Donde:

C : concentración de soluto del efluente (mg/l).

C_0 : concentración inicial de soluto en la fase líquida (mg/l).

F : flujo volumétrico (m^3/s).

No : capacidad de adsorción (mg soluto/l adsorbente).

Ka : constante de adsorción de la solución (l/mgh).

t : tiempo de servicio en la columna (s)

X : altura de lecho (m).

La ecuación (6) relaciona el tiempo de servicio de una columna de lecho fijo con la altura del mismo. El tiempo de servicio y la altura de lecho se correlacionan con parámetros del proceso tales como la concentración inicial y la capacidad de adsorción, estas correlaciones están representadas por las ecuaciones (7) y (8).

$$a = \frac{N_o}{C_o K a} \quad (7)$$

$$b = \frac{1}{C_o K a} \ln \left(\frac{C_o}{C} - 1 \right) \quad (8)$$

Simplificando la ecuación (6) con las ecuaciones (7) y (8) se obtiene la expresión de una línea recta como se muestra en la ecuación (9).

$$t = aX + b \quad (9)$$

Donde:

a : pendiente (h/cm).

b : intercepción (h).

También se puede determinar la altura mínima de lecho necesaria para producir una concentración de salida deseada mediante la ecuación (10).

$$X_o = \frac{F}{K a N_o} \ln \left(\frac{C_o}{C} - 1 \right) \quad (10)$$

Una vez que se tiene la información experimental para las tres alturas de lecho de un proceso de adsorción en lecho fijo y además se tienen las representaciones gráficas de los perfiles de concentración de dichas experiencias, se procede a la construcción de las rectas BDST. Para la construcción de éstas se consideran los puntos de ruptura y de agotamiento de cada una de las tres alturas de lecho dando como resultado dos

Donde:

F_A : velocidad de alimentación del soluto ($\text{g}/\text{cm}^2\text{h}$)

u_0 : velocidad de la zona de transferencia (cm/s)

C_0 : concentración inicial de soluto (ppm)

M : peso molecular del soluto (g/gmol).

Por otra parte, se debe calcular el área debajo de la curva de ruptura, ya que ésta representa el soluto total adsorbido durante el proceso (McCabe, 1991). Este cálculo se logra al evaluar la integral mostrada en la ecuación (12), la cual involucra el área correspondiente a toda la curva de ruptura de la columna seleccionada.

$$t = \int_a^b (1 - C / C_0) dt \quad (12)$$

Donde:

t : tiempo ideal de adsorción (min).

a : tiempo inicial del proceso de adsorción (min).

b : tiempo final del proceso de adsorción (min).

C / C_0 : relación de concentraciones (adim.).

El área obtenida por la ecuación (12) corresponde al tiempo ideal que se necesitaría para adsorber la misma cantidad adsorbida durante la experiencia pero en caso de que la curva de ruptura fuese vertical (McCabe, 1991). Una vez conocido el valor de la integral se calcula la masa de adsorbente por unidad de área de la sección transversal del lecho a partir de la ecuación (13).

$$A_T = L_L \rho_L \quad (13)$$

Donde:

A_T : masa de adsorbente por área de la sección transversal del lecho (g/cm^2).

L_T : altura del lecho (cm).

ρ_T : densidad del lecho de adsorbente (g/cm^3).

Tal como señala McCabe (1991), con la finalidad de calcular la carga de adsorbato en el equilibrio se considera la ecuación (14).

$$W_{sat} = \frac{F_A t}{A_T} \quad (14)$$

Donde:

W_{sat} : carga de adsorbato en el equilibrio (gsoluto/gsolvente).

Una vez calculada la carga de adsorbato en el equilibrio se procede al cálculo de la carga de adsorbato en el punto de ruptura, pero para ello se requiere de la aplicación de la ecuación (15) obteniéndose así el tiempo de adsorción hasta el punto de ruptura (McCabe, 1991). La integral se calcula considerando como límite inferior el tiempo cero y como límite superior el tiempo correspondiente al punto de ruptura.

$$tb = \int_a^c (1 - C / C_o) dt \quad (15)$$

Donde:

tb : tiempo de adsorción hasta el punto de ruptura (min).

c : tiempo correspondiente al punto de ruptura (min).

Por su parte, McCabe (1991) señala que la cantidad de adsorbato en el punto de ruptura se calcula mediante la ecuación (16).

$$W_b = \frac{F_A tb}{A_T} \quad (16)$$

Donde:

W_b : cantidad de adsorbato en el punto de ruptura (gsoluto/gsolvente).

Por último, para obtener la fracción de lecho muerto se aplica la ecuación (17).

$$L_m = 1 - \frac{W_b}{W_{sat}} \quad (17)$$

Donde:

L_m : fracción de lecho que no se utiliza (adim.)

Los parámetros obtenidos a partir del modelo BDST permiten conocer información sobre el proceso de adsorción, sin embargo, para el diseño de torres se requiere contar con más conocimientos sobre el fenómeno, como lo son: los diferentes tipos de adsorción posibles, las fuerzas que intervienen en el proceso y permiten que éste ocurra, así como sus aplicaciones más comunes y de los equipos necesarios para que se lleve a cabo este proceso.

II.3. Diseño de torres para un proceso de adsorción

En la práctica el proceso de adsorción se logra a través de operaciones por etapas o por contacto continuo, esto dependerá del tipo de absorbente y de la rigurosidad de la separación; pero antes de profundizar sobre el tipo de equipos empleados para esta operación unitaria, es necesario esclarecer lo referente al fenómeno de adsorción.

II.3.1. Adsorción

El fenómeno fisicoquímico adsorción se define (Barrow, 1964) como la propiedad de un sólido de retener o de concentrar sobre su superficie uno o más componentes (átomos, moléculas o iones) a partir de un líquido o gas en contacto con la superficie. Este proceso se distingue de la absorción, ya que ésta se define como la penetración de un componente en la masa de otro, y del término sorción porque éste se utiliza cuando se desconoce la naturaleza propia del fenómeno de transferencia de masa asociado al proceso. El proceso inverso a la adsorción se denomina desorción.

Levine (1996) indica que en un proceso de adsorción el sólido en cuya superficie se produce la adsorción, es decir, el que aporta la superficie de interacción se denomina adsorbente o sustrato y el compuesto retenido se denomina adsorbato. A pesar de que el fenómeno de adsorción puede presentarse sobre cualquier superficie, resulta conveniente emplear materiales de elevada área superficial por unidad de masa,

denominados sólidos activados. Una variable que dificulta de forma considerable el estudio del sistema es la superficie de los sólidos debido a que la no uniformidad de ésta afecta el comportamiento del proceso.

El mecanismo del proceso de adsorción involucra una difusión primaria del adsorbato a la superficie del sólido activado y sobre éste se registran una serie de colisiones con un intercambio neto de energía, la energía superficial de cada sólido adsorbente hace que éste tenga mayor o menor afinidad por el adsorbato, esta energía se denomina generalmente calor de adsorción.

El adsorbato (Levine, 1996) se fija de forma aleatoria sobre la superficie del adsorbente hasta crear la denominada monocapa, luego se van formando capas subsiguientes hasta el llenado del poro, a esto también se le denomina condensación capilar. Las interacciones superficiales generan fuerzas atractivas de naturaleza semejante a las de Van der Waals que son las que originan la condensación del vapor, por otra parte la adsorción de moléculas de una fase fluida (gas o líquido) en la superficie de un sólido, está estrechamente relacionada a la catálisis heterogénea.

Los estudios de adsorción están, casi siempre, directamente relacionados con el comportamiento de las reacciones químicas que ocurren sobre la superficie, ya que en ocasiones la superficie interviene en la reacción de un catalizador. Sin embargo, es de sumo interés tener en cuenta, al realizar el estudio de la adsorción, que la mayor parte de estos fenómenos según sea la fuerza que fija las moléculas de adsorbato sobre la superficie del adsorbente, se reducen a dos tipos: físicas o químicas.

Fonseca y Delgado (2001) dicen que toda superficie es capaz de adsorber átomos, moléculas o iones existentes a su alrededor porque esta superficie adsorbente puede formarse por la ruptura de un cristal perteneciente a un sólido covalente. En este proceso de ruptura algunos enlaces covalentes entre átomos se rompen, lo que origina que cada átomo de la superficie posea una o más valencias libres. Cualquier átomo

que se localice en la superficie creada se encuentra en una posición poco usual, el número de vecinos que poseía antes de la formación de la superficie disminuye y experimentan un conjunto de fuerzas no balanceadas, esta situación conduce al fenómeno de energía libre superficial, tal como se observa en la figura N°5. Si una molécula con afinidad hacia estas valencias libres se acerca lo suficiente, se producirá un rearrreglo electrónico con el sistema tal como se observa en una reacción química, obteniéndose así la fijación de la molécula en la superficie a través de una adsorción química o quimisorción.

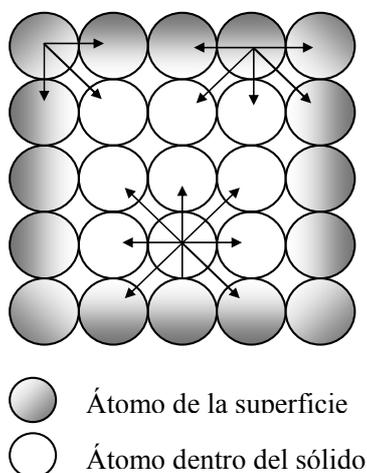


Figura N°5. Balance de fuerzas en la superficie y en el interior de un sólido. (Fonseca y Delgado, 2001).

La otra forma de adsorción reconocida es la que ocurre por fuerzas de tipo Van der Waals, entre un átomo o una molécula y la superficie, en éste caso no existe rearrreglo electrónico en el sistema y sólo las fuerzas de atracción electrostáticas son las causantes de tal proceso. A éste tipo de interacción que ocurre sin modificación alguna de la molécula se le ha llamado adsorción física o fisorción.

Es común en la interacción química entre el adsorbente y el adsorbato que se produzcan cambios en la estructura de los compuestos involucrados; esto puede modificar su reactividad y de ello depende la capacidad catalítica del adsorbente. La cantidad de material adsorbido en un sistema depende de la temperatura y la presión o

de la concentración del adsorbato. Si la temperatura se mantiene constante durante el experimento, el grado de adsorción puede estudiarse como función de la presión o de la concentración y generar así lo que se conoce como la isoterma de adsorción. Cuando el proceso dominante es la fisisorción, las características cualitativas de las isotermas de adsorción de diversos materiales son muy similares.

El fenómeno de adsorción es de gran importancia debido a sus aplicaciones múltiples en la industria química, así como sus aportes a nivel de laboratorio. El Laboratorio de Carbón y Residuales de Petróleo y el Centro de Estadística y Software Matemático de la Universidad Simón Bolívar (2005) presentaron un proyecto ante el Fondo Nacional de Ciencia Tecnología e Investigación (FONACIT), en donde indican que la adsorción, en particular, resulta fundamental en procesos químicos que son acelerados por la presencia de catalizadores cuyo estado de agregación es distinto al de los reactivos. Éste tipo de catálisis heterogénea se utiliza en procesos como la pirólisis del petróleo, el proceso Haber para la síntesis de amoníaco (catalizador de Fe), la fabricación de ácido sulfúrico (con V_2O_5) y nítrico (con Pt/Rh), la hidrogenación catalítica de aceites y grasas (con Pt/Pd), y muchos más. Otro ejemplo se puede encontrar en los convertidores catalíticos de los automóviles, donde los contaminantes se adsorben sobre catalizadores de Pt/Pd. Incluso a nivel biológico, el primer paso en el proceso de catálisis enzimática es la adsorción del sustrato sobre la superficie de la enzima que se encuentra en suspensión coloidal.

Conocido el fenómeno de adsorción es posible comentar sobre la aplicabilidad de éste como operación unitaria.

II.3.2. Operaciones de adsorción

Tal como indica Treybal (1997), se evidencia que esta operación unitaria explota la capacidad especial de ciertos sólidos para hacer que sustancias específicas de una

solución se concentren sobre la superficie del mismo, de ésta forma es posible separar uno de otros componentes de soluciones gaseosas y líquidas.

En vista de que existen diversas aplicaciones para el proceso de adsorción, las técnicas utilizadas incluyen tanto los métodos por etapas como los de contacto continuo; esto se aplica en operaciones por lotes, continuas, o semicontinuas.

Cuando (Walas, 1990), de una mezcla de fluidos (gases o líquidos) se adsorbe fuertemente uno de los dos componentes, la separación de la mezcla con fines de cálculo es análoga a la adsorción de gases, en donde la fase insoluble agregada es el adsorbente en este caso y el disolvente líquido en caso de la absorción. Cuando los dos componentes del fluido (gas o líquido) se adsorben fuertemente, la separación requiere de un proceso de fraccionamiento.

Perry (1986) señala que las características de operación de un adsorbente sólido para tratar corrientes de líquidos o gases dependen de cuatro factores principales:

- La capacidad final del adsorbente hacia el soluto, que puede utilizarse o no en forma plena en las condiciones del proceso real.
- El equilibrio de fase, que influye en la eficiencia con la que se alcanza dicha capacidad y, en muchos casos controla la capacidad real del adsorbente.
- El comportamiento de la velocidad, así como el mecanismo y las resistencias que la regulan.
- La configuración del proceso con sus consecuencias para el balance masa.

Una vez seleccionado el adsorbente, las dos maneras para llevar a cabo la operación de adsorción son: con operaciones por etapas o por contacto continuo.

Para las operaciones por etapas, Treybal (1997) señala que en el caso de soluciones líquidas en donde el soluto que se va a separar se adsorbe más o menos fuertemente en comparación con el resto de la solución, se trata en operaciones por lotes,

semicontinuas o continuas. Las cascadas continuas a contracorriente pueden simularse o llevarse a cabo en la realidad mediante técnicas como lechos fluidizados. Cada etapa requiere el contacto íntimo entre dos fases insolubles durante el tiempo suficiente para tener una aproximación razonable al equilibrio, contacto que va seguido de la separación física de las fases. Las operaciones de adsorción más conocidas son la filtración de líquido por contacto y la operación a contracorriente en varias etapas.

En el caso de operaciones por contacto continuo, el fluido y el adsorbente están en contacto en todo el equipo, sin separaciones periódicas de las fases. Las operaciones pueden realizarse en forma estrictamente continua, en estado estacionario, caracterizadas por el movimiento del sólido al igual que del fluido. De modo alternativo, a causa de la rigidez de las partículas del adsorbente sólido, también es posible operar con ventajas de manera semicontinua, caracterizada por un fluido móvil y un sólido estacionario. Esta operación tiene como resultado condiciones en estado no estacionario en donde las composiciones en el sistema cambian con el tiempo. Algunas operaciones comúnmente empleadas son la absorción de lecho móvil en estado estacionario y la absorción de lecho fijo en estado no estacionario.

Los sólidos adsorbentes por lo general se utilizan en forma granular, estos varían de tamaño desde aproximadamente 12mm de diámetro hasta granos tan pequeños como de 10 μ m. Además, estos sólidos deben poseer ciertas propiedades relativas a la ingeniería, éstas dependerán de la aplicación que se le vaya a dar. Por ejemplo, si se utiliza en un lecho fijo a través del cual va a fluir un líquido o un gas, éste no debería ofrecer una caída de presión del flujo muy grande, ni deben ser arrastrados con facilidad por la corriente que fluye. Debe tener adecuada resistencia para que no se reduzca su tamaño al ser manejados o para que no se rompan al soportar su propio peso en lechos del espesor requerido, y si se van a introducir y retirar con frecuencia de los recipientes que los contienen, deben ser capaces de fluir libremente. Para el

caso de estudio, según investigaciones previas (Pérez⁽¹⁾, 2006 y Pérez⁽²⁾ 2006), la lignina es un adsorbente capaz de satisfacer las necesidades requeridas.

II.4. Uso de lignina como adsorbente

La lignina es un grupo de polímeros fenólicos que se localizan en el tejido leñoso de la planta, su estructura permite que sea utilizado como adsorbente, por lo cual es importante el conocimiento de sus características, propiedades generales, estructura y obtención a nivel industrial.

II.4.1. Lignina

Sarkanen y Ludwing, (1971) señalan que la palabra lignina proviene del término latino *lignum*, que significa leña. La lignina es, después de la celulosa, el principal componente de la madera, y realiza múltiples funciones que son esenciales para la vida de las plantas. Por ejemplo, posee un importante papel en el transporte interno de agua, nutrientes y metabolitos, proporciona rigidez a la pared celular y actúa como puente de unión entre las células de la madera, creando un material que es notablemente resistente a los impactos, compresiones y flexiones.

Su estructura química en la madera (Sarkanen y Ludwing, 1971) sigue siendo prácticamente desconocida; pero cuando se separa de otras sustancias, la lignina se caracteriza por ser una sustancia polimérica que tiene grupos hidróxilos y metóxilos.

Después de los polisacáridos, la lignina es el polímero orgánico más abundante en el mundo vegetal y es importante destacar que es la única fibra no polisacárida que se conoce. Sin embargo, las ligninas conocidas son aquellas producidas como coproductos de la industria del papel. Pero en este tipo de industria, varios procesos pueden ser utilizados para remover y aislar las ligninas, y cada uno de ellos produce

un material de composición y propiedades diferentes según el origen de la lignina y al tratamiento de precipitación al cual es sometida.

Muchos materiales derivados de la madera se designan hoy como lignina (Sarkanen y Ludwing, 1971) a pesar de que la mayoría contienen cantidades elevadas de sustancias que no son concretamente ligninas, o que simplemente son derivados de las mismas, y también se ha extendido la costumbre de adicionar al término lignina términos auxiliares que indican el origen del producto o el método aplicado para su preparación. Hay, por consiguiente, muchas ligninas. De esta manera, se ha definido el término protolignina como las ligninas que se encuentran en la madera cuya estructura aún no ha sido posible describir; y la mayoría de los fabricantes ha recurrido, para evitar equívocos, a nombres comerciales y designaciones en clave.

El problema con la aplicación del término lignina (Pearl, 1967) radica de hace muchos años atrás, ya que para comienzos del siglo XIX el término ya se utilizaba, pero para designar a la sustancia de la madera misma y después a toda la porción que no era celulosa. Al progresar los conocimientos y la destreza de los químicos, se identificaron y se separaron diversas sustancias en la parte no celulósica de la madera: carbohidratos, taninos, resinas y otros compuestos orgánicos. El residuo siguió llamándose lignina. A medida que se fueron separando más sustancias y se fueron acumulando datos sobre ese residuo, los químicos se convencieron de que sus propiedades eran suficientemente específicas para considerarlo como un grupo de sustancias relacionadas, tal vez un polímero de una molécula de lignina definida, y ésta es la opinión actualmente prevaleciente. Para estudiar la aplicación de la lignina como adsorbente es necesario definir sus propiedades generales.

II.4.2. Propiedades generales de la lignina

Ralph, J. y Otros (2004) sugieren que las ligninas aisladas experimentalmente o que se encuentran en el comercio son sólidos friables, por lo general polvos, sin forma

cristalina visible, ni aún en el microscopio electrónico. Su color suele ser pardo, aunque experimentalmente se han logrado ligninas muy claras. Las ligninas son insolubles en agua, en ácidos minerales fuertes y en hidrocarburos. Su insolubilidad en ácido sulfúrico al 72% es la base de una prueba cuantitativa para distinguirlas de la celulosa y otros carbohidratos en maderas y pulpas de madera.

Las ligninas comerciales son solubles en soluciones alcalinas acuosas, y algunas son también solubles en muchos compuestos orgánicos oxigenados y en aminas. Por el calor, las ligninas no se funden, sino que se reblandecen y después se carbonizan. Otro aspecto importante del estudio de la lignina como adsorbente, es el conocimiento de su estructura.

II.4.3. Estructura de la lignina

La consecuencia más importante de la naturaleza combinatoria de las reacciones de acoplamiento en la formación de las ligninas (Rouchi y Washington, 2001), es el hecho de que no existe una secuencia fija de unidades en el polímero de lignina. La aleatoriedad en la generación de las uniones y el número astronómico de isómeros posibles, sugiere que existe muy poca probabilidad de encontrar dos macromoléculas de ligninas idénticas. Si a esto se suma el hecho de que su aislamiento es difícil y que su caracterización requiere un compromiso entre su pureza y su integridad estructural, es entendible que la estructura de la lignina no esté absolutamente definida o determinada.

Sin embargo, las principales características estructurales, basadas en los conocimientos disponibles hoy en día, se pueden resumir al describir a las protoligninas como biopolímeros basados en unidades de tipo fenilpropano y su estructura se muestra en la figura N°6.

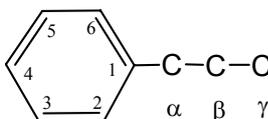


Figura N°6. Unidad fenilpropano (González, 2005).

Estas unidades según Ralph y otros (2004) poseen un átomo de oxígeno en la posición para (como OH u O-C) y ninguno, uno dos o más grupos metoxi en las posiciones orto a ese átomo de oxígeno. Las unidades fenilpropano están unidas por una serie de enlaces característicos, principalmente β -O-4, β -5, β - β , entre otros, o alternativamente existe una serie de grupos terminales característicos como por ejemplo unidades cinamaldehído, éstas se muestran en la figura N°7.

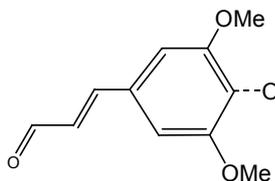


Figura N°7. Cinamaldehído grupo terminal (González, 2006).

De esta manera, varios autores han definido distintos modelos estructurales de las ligninas los cuales siguen siendo modificados hoy en día porque no se conoce aún exactamente la estructura de la protolignina, tampoco se sabe a ciencia cierta cómo se forma y todas las funciones específicas que cumple en las plantas, se tiene mayor conocimiento sobre las ligninas separadas de la madera (Sarkanen y Ludwing, 1971), pero su estructura no está todavía claramente establecida. Para la utilización de la lignina como adsorbente es importante conocer las distintas maneras en la cual se obtiene de forma industrial.

II.4.4. Obtención industrial de la lignina

Los derivados de ligninas obtenidos a partir de procesos industriales son producidos como subproductos de la industria del papel (González, 2005), frecuentemente este material es quemado para producir energía o desechado a través de sistemas de

tratamiento biológico. Algunos de los productos obtenidos son comercializados y todos contienen cantidades variables de compuestos químicos distintos a las ligninas y deben ser purificados. Las ligninas obtenidas se clasifican según el proceso primario del cual se derivan en: lignosulfonatos y ligninas alcalinas.

II.4.4.1. Lignosulfonatos

González (2005) señala que el origen común de esta clase de ligninas es el residual sulfitado de las fábricas de pulpa por el procedimiento del sulfito y el ácido. En realidad la mayoría de ellas no contienen ligninas sino solamente derivados sulfónicos.

En este proceso, luego de que la madera se descorteza y se desmenuza, se cuece a presión con una solución de bisulfito y anhídrido sulfuroso a pH entre 1-2 y a temperaturas entre 125-145°C. Las protoligninas, insolubles en agua y en soluciones ácidas, por la acción del sulfito en caliente, sufren alteraciones por las cuales se convierten en ácidos lignosulfónicos muy solubles, cuyas sales son igualmente solubles. El líquido sulfítico que se obtiene contiene también hexosanas y pentosanas, ácidos orgánicos y otras materias orgánicas complejas; se encuentran también compuestos químicos inorgánicos provenientes de los residuales de la madera. De esta manera se disuelve aproximadamente el 55% de la madera.

Los ácidos lignosulfónicos en el líquido sulfítico (González, 2005) son polímeros con pesos moleculares que varían entre 2000 y 15000. Contienen de 2 a 4 unidades monómeros por átomo de azufre de sulfóxido. Estos ácidos pueden separarse como sales de sodio, calcio, magnesio o amonio y pueden ser convertidas a otras sales mediante procedimientos de cambios de base. Los lignosulfonatos producidos solubles en agua contienen polímeros sulfonados de lignina, azúcares, ácidos de azúcares y una pequeña cantidad residual de compuestos inorgánicos provenientes de la madera.

II.4.4.2. Ligninas alcalinas

González (2005) en su investigación reseña que las ligninas alcalinas son las obtenidas de los líquidos residuales de los procedimientos al sulfato (Kraft-Ligninas) y a la soda en la fabricación de la pasta para papel. El líquido de desecho del que se extraen las ligninas alcalinas se conoce como licor negro.

En este proceso luego de que la madera se descorteza y se desmenuza se cuece en un líquido fuertemente alcalino con NaOH y Na₂S de 1 a 3 horas a 170-180°C, las condiciones dependen de las especificaciones de la pulpa y por lo general se disuelve más del 50% de la madera.

La protolignina de la madera sometida a la acción de soluciones de NaOH con o sin sulfuro de sodio, se convierte a lignato de sodio muy soluble en soluciones fuertemente alcalinas. Cuando el pH de estas soluciones disminuye por debajo de 11,5 la viscosidad de las mismas aumenta y su solubilidad es más sensible a la presencia de otras sales. Esta propiedad es la base de casi todos los procedimientos para obtenerlas del licor negro. Entonces, para obtener la lignina del licor negro, primero se reduce la elevada alcalinidad del licor negro a un punto en el cual precipita una cantidad suficiente de lignato de sodio y luego éste puede convertirse en lignina reduciendo su pH con ácido sulfúrico a un valor entre 2-3. El producto lavado y seco puede purificarse en grado elevado.

Las ligninas alcalinas se encuentran actualmente en el comercio en formas relativamente puras (González, 2005); es decir, exentas de elementos que no sean ligninas. Por ejemplo, el fabricante de Indulin, lignina procedente de pulpa al sulfato con madera de pino, anuncia su producto con este análisis elemental aproximado: 65% de carbono, 5% de hidrógeno y 30% de oxígeno. Se atribuye a este polímero un peso por unidad igual a 840.

Las ligninas alcalinas son insolubles en agua, en hidrocarburos, y en ácidos inorgánicos. Son solubles en soluciones alcalinas acuosas, en muchos compuestos orgánicos oxigenados y en muchas aminas. Las ligninas alcalinas pueden esterificarse, nitrarse, mercuriarse, halogenarse y oxidarse fácilmente. Reaccionan bien con fenoles, aminas, aldehídos, sulfuros y sulfitos. Pueden producirse (Sarkanen y Ludwing, 1971) materiales aromáticos por fusión alcalina y por hidrogenación a presión.

Como se mencionó anteriormente, los sólidos poseen frecuentemente una capacidad muy específica para adsorber grandes cantidades de ciertas sustancias, por lo tanto, es evidente que la naturaleza química del sólido tiene mucho que ver con su comportamiento como adsorbente. Sin embargo, la simple identidad química no es suficiente para caracterizar su utilidad, influye de forma determinante el método de fabricación así como los antecedentes de adsorción y desorción del mismo.

II.5. Antecedentes

Los antecedentes de este trabajo se basan en las investigaciones realizadas al comportamiento de la lignina como adsorbente de metales y al desarrollo de plantas de adsorción a pequeña escala.

Lalvani y otros (2000). Realizaron un estudio de la capacidad de adsorción de cromo con lignina, en esta publicación se presenta un estudio sistemático de la remoción de Cromo (VI) y Cromo (III) en soluciones acuosas mediante el uso de ligninas. Los resultados obtenidos demuestran que tanto el Cromo (VI) como el Cromo (III), por separado eran adsorbidos por las ligninas.

Particularmente en la remoción de Cromo hexavalente se observó que la remoción máxima fue de 60% para una concentración inicial del metal de 34,2ppm. La

eficiencia de la remoción se incrementa con la concentración inicial del metal hasta cierto máximo a partir del cual comienza a decrecer, el porcentaje de remoción del metal disminuye al aumentar el pH, la cantidad de metal removido disminuye al aumentar la concentración de lignina y el proceso de adsorción parece seguir el modelo de adsorción de la isoterma de Langmuir.

En la remoción de Cromo trivalente con lignina se observó que el uso de lignina resulta en una remoción del 100% del metal sólo para bajas concentraciones del metal (aproximadamente 7ppm,) un aumento en la concentración del metal disminuye la eficiencia de la remoción, la eficiencia de la remoción aumenta al aumentar el pH, un incremento continuo de la concentración del adsorbente es acompañado de un agudo incremento de la remoción del metal y el proceso de adsorción parece seguir el modelo de adsorción de la isoterma de Langmuir.

Basso y otros (2002). Realizaron un estudio de la capacidad de varios tipos de materiales lignocelulósicos, especialmente desechos, para remover trazas de metales tóxicos, empleando como modelo para ello soluciones diluidas de Cadmio y Níquel. Los materiales lignocelulósicos utilizados como adsorbentes fueron cáscara de nueces brasileras, bagaso de caña de azúcar, tallos de la especie *Arundo donax* (familia de las gramíneas de tallo alto y erecto) y una especie de madera nativa (*Prosopis ruscifolia*) de Argentina; como patrones de comparación se utilizó el carbón activo comercial y las algas marinas rojas pertenecientes al orden de las coralinas.

Los resultados obtenidos indican que todos los materiales examinados presentaron una remoción apreciable de ambos metales, se confirma que las ligninas son el componente más activo en la remoción de Ni y Cd, principalmente debido a que los grupos funcionales cargados, que poseen en su estructura amorfa y polimérica, permiten y favorecen la remoción de iones metálicos. La remoción de Cadmio está favorecida frente a la de Níquel, debido a que el Níquel tiene una densidad de carga superficial mayor a la del Cadmio. El equilibrio es representado por la isoterma de

Langmuir y sólo para las cáscaras de nueces la remoción de Níquel es superior a la del carbón activado. Es decir, los resultados indican que las cáscaras de nueces son potenciales bioadsorbentes lignocelulósicos para la remoción de trazas de metales tóxicos.

Dupont y Guillon (2003). En su trabajo estudiaron la adsorción de Cromo hexavalente mediante un sustrato lignocelulósico que está constituido por lignina proveniente de desechos de la industria del salvado de trigo, celulosa y una pequeña cantidad de ácidos grasos. Realizaron estudios espectroscópicos que incluyen técnicas de infrarrojo y estudios de absorción de rayos X para estructuras finas, entre otros, y se determinó que el proceso de adsorción se lleva a cabo mediante un proceso de óxido-reducción en el cual el Cromo (VI) se reduce a Cromo (III).

Los resultados obtenidos en este trabajo realizado por Dupont y Guillon, son importantes no sólo porque demuestran que son los componentes asociados con la lignina los que actúan como adsorbentes, especialmente mediante los grupos carboxilatos, sino también porque ayudan a comprender como se realiza este proceso para este ión metálico en particular y además implica la utilización de un material de bajo costo (lignina) como posible bioadsorbente que pudiera permitir la limpieza de efluentes cargados con estos compuestos.

Ojeda y Pérez (2005). Presentaron en su trabajo el estudio del efecto de la temperatura sobre la adsorción con lignina de Níquel y Vanadio en soluciones de los metales puros y en mezclas de los mismos. Los análisis se realizaron para temperaturas desde 25 hasta 92 °C y de los resultados obtenidos se pudo concluir que los porcentajes de adsorción de Níquel son superiores a los de Vanadio, que variaciones de temperatura en el rango mencionado no afectan el porcentaje de adsorción de Níquel cuando se encuentra puro pero en mezcla con Vanadio disminuye la adsorción a 65 °C. Por su parte, la adsorción de Vanadio es superior cuando está en mezcla y estando puro no varía con la temperatura hasta 75 °C, sin

embargo, el Vanadio si es capaz de duplicar la capacidad de adsorberse cuando se operan a temperaturas más altas de los 75 °C.

Itriago y Pérez (2005). Determinaron la capacidad adsortiva de la lignina sobre metales pesados contenidos en licores ácidos, para ello se llevó a cabo una experimentación a nivel de laboratorio, trabajando con tres tipos de muestra, soluciones de Níquel, soluciones de Vanadio y soluciones de mezcla Níquel-Vanadio, esto a diferentes proporciones, a concentraciones de 2, 5, 10, 20 y 40 ppm, a temperatura ambiente y pH ácido de 4.

Los análisis realizados dieron como resultado que el Níquel tiende a adsorberse más fácilmente que el Vanadio, cuando ambos están en solución a distintas proporciones; además se tiene que a bajas concentraciones de estas mezclas de metales pesados, el Níquel no se ve afectado por la presencia del Vanadio y se adsorbe por completo, pero a concentraciones más altas disminuye el porcentaje de adsorción pero no de manera tan marcada como el Vanadio; en estos casos la competencia entre los metales es bastante notoria. Por otra parte se obtuvo que el punto de operación óptimo para la adsorción de Níquel, para 0,4 gramos de lignina, es cuando se alimenta 28,5ppm, dando un porcentaje de operación del 60,7%; en cambio el punto óptimo de operación del Vanadio es cuando se alimenta 10ppm, ya que después se alcanza la saturación de adsorbente.

Goel y otros (2005). Presentaron un estudio de una columna por cargas para eliminación de Plomo (II) por adsorción, usando carbón activado granular tratado. Este estudio muestra el comportamiento de la adsorción de Pb (II) en sistemas acuosos sobre carbón activado (CA) y carbón activado tratado (CAT), la caracterización de ambos adsorbentes representó un área importante en el estudio, esto demostró una demarcación clara en varias características físicas y químicas del adsorbente modificado.

Ambos adsorbentes se sujetan a los estudios estáticos del proceso de adsorción, estableciéndose una comparación basada en el análisis de la isoterma; con ello se define el adsorbente más eficiente para el proceso de adsorción de la columna de estudio. El objetivo de realizar los estudios era determinar el efecto de varias variables de proceso, tales como: la altura del lecho, la tasa de carga hidráulica, la concentración inicial de la alimentación en cada carga y la capacidad de adsorción. Esto ayudó a comprobar la aplicabilidad práctica del adsorbente.

Las curvas del proceso fueron trazadas para la adsorción de Pb (II) en el adsorbente, usando la operación de flujo continuo de la columna, variando los parámetros anteriormente mencionados, la tasa de carga hidráulica ($3,0-10,5\text{m}^3/(\text{h m}^2)$), la altura del lecho (0,3-0,5m) y la concentración de la alimentación (2,0-6,0mg/L). Además de esto, se considera modelar los datos generados del estudios de la columna empleando como relación empírica el modelo de Bohart-Adams, este modelo proporcionó resultados representativos del sistema de adsorción, y la constante obtenida de éste se utilizó para alcanzar el último objetivo del estudio, es decir, un aumento de escala para el diseño del proceso de la adsorción a nivel de escala piloto.

Taty-Costodes y otros (2005). Estudiaron el retiro de los iones del Plomo (II) de efluentes sintéticos usando el aserrín de los pinos silvestres, en una columna de adsorción de lecho fijo. El propósito de este trabajo era evaluar el potencial del aserrín de los pinos silvestres, para un retiro continuo de los iones de Plomo (II) de los efluentes sintéticos e industriales acuosos. Los parámetros cinéticos obtenidos en el proceso fueron los utilizados para realizar el aumento de escala de una mini-columna a escala de planta piloto.

Los datos experimentales de la columna referentes a los volúmenes tratados fueron correlacionados usando el modelo del tiempo de servicio de altura de lecho. Estos datos experimentales se acercaron favorablemente al modelo en un 10%. Los resultados del modelo del tiempo de servicio de altura de lecho de la columna a

pequeña escala luego fueron utilizados para diseñar la unidad de adsorción de una planta piloto, la cual, una vez puesta en operación funcionó acorde con estos resultados. Los experimentos realizados en un reactor dinámico permitieron poner en evidencia la influencia de varios parámetros en la eficacia del aserrín de los pinos silvestres. Además, mediante el proceso fue comprobado el tratamiento de efluentes acuosos industriales a escala de planta piloto y los resultados concuerdan con los obtenidos para los efluentes sintéticos.

Jarmer y otros (2006). Presentaron cuatro criterios de escalamiento para aumentar la escala de un proceso desde una escala de laboratorio a una escala de planta piloto, esta planta cuenta con un inyector con compartimiento confinado de mezclado. Los criterios del aumento de escala consisten en mantener constante: el número de Reynolds, la velocidad axial, el tiempo de residencia y la densidad de la suspensión o la tasa de disipación de energía.

Con la finalidad de obtener el comportamiento se evaluó cada uno de los criterios. Los experimentos fueron conducidos en un inyector con un compartimiento confinado de mezclado semicontínuo, con un polímero biodegradable (ácido láctico) que fue utilizado como el soluto del modelo. El éxito del aumento de escala se basa en mantener las distribuciones del tamaño de partículas del polímetro después de aumentada la escala del proceso.

Los criterios de aumento de escala en donde sólo se mantenía el número de Reynold o las velocidades axiales constantes no eran suficientes para asegurar el funcionamiento del proceso equivalente durante el escalamiento, estos criterios implican un aumento en el diámetro medio del polímero. Por otra parte, el criterio del cambio en las distribuciones de tamaño de partícula del polímero, hacia fracciones de tamaño más grandes, implicó una baja tasa de disipación de la energía en el compartimiento confinado de mezclado. El escalamiento del inyector con un tiempo de residencia y una densidad constantes de la suspensión, o de una tasa constante de disipación de

energía, dio lugar a distribuciones de tamaño similares de partícula de polímero en cada escala de la operación porque se mantiene la calidad de mezclado del proceso a escala.

Medina y otros (2006). Presentaron en su trabajo un estudio del efecto del tiempo de residencia y acidez inicial en la adsorción sobre lignina, tipo Indulin AT, de Níquel y Vanadio así como mezclas de ambos metales en solución. Se realizaron análisis manteniendo en contacto el adsorbente y el adsorbato a diferentes tiempos de residencia desde 1,5 horas hasta 4 horas, determinándose mayor afinidad con el Níquel que con el Vanadio, obteniendo tiempos óptimos de operación de 1,73 horas y 2,28 horas respectivamente. En cuanto a la acidez inicial se estudió la adsorción a pH entre 2,5 y 4,5 obteniendo un pH óptimo de 4,5 para ambos metales tanto en soluciones puras como en mezclas.

Como objetivo adicional se estudió la relación de cantidad de lignina y la concentración de los metales en solución, para la cual se obtuvo un porcentaje de adsorción constante en el caso del Níquel, mientras que para el Vanadio la máxima y mínima adsorción para el rango estudiado fue $7,70 \times 10^{-4}$ ml y $3,10 \times 10^{-4}$ ml para 100ml de solución a 80 y 40ppm respectivamente.

Camacaro y otros (2006). Estudiaron la cinética de la adsorción de Níquel sobre lignina modificada. El objetivo principal de este estudio fue determinar los parámetros del equilibrio de adsorción del Níquel sobre lignina, para ello se empleó peróxido de hidrógeno (H_2O_2) con la finalidad de establecer el efecto del agente oxidante sobre la lignina, la cual es utilizada como adsorbente de metales pesados (Níquel y Vanadio) presentes en el licor proveniente de la digestión ácida vía microondas del coque de petróleo.

Las experiencias de laboratorio desarrolladas, con la finalidad de cumplir los objetivos de este estudio, dependieron básicamente de la variación de las

concentraciones del ácido y el tiempo de oxidación, para luego realizar la adsorción de Níquel en solución acuosa a 20ppm sobre lignina a diferentes temperaturas y a un pH fijo. Como resultado de la experimentación se obtuvo que a bajas concentraciones de ácido y menores tiempos de oxidación la capacidad adsorptiva de la lignina se ve afectada en una menor proporción. Además, se evidenció una alta dependencia de la reacción de adsorción del Níquel con la temperatura observándose que a mayor temperatura, mayor velocidad de adsorción.

CAPÍTULO III***METODOLOGÍA GENERAL***

En este capítulo se presenta de manera detallada la metodología general para cumplir con los objetivos del presente trabajo de diseño a nivel básico de una planta de adsorción de metales pesados sobre lignina a escala piloto. Esta metodología fue dividida en tres etapas básicas:

- **ETAPA I-ESTADO DEL ARTE:** esta etapa se fundamentó en la búsqueda y revisión de la información referente al proceso de adsorción de metales pesados sobre la lignina, así como de diseño de plantas a pequeña escala, con el fin de sentar las bases teóricas del presente proyecto.

- **ETAPA II-DESARROLLO EXPERIMENTAL:** en esta etapa se llevó a cabo el montaje del equipo requerido para la adsorción de metales pesados sobre lignina a escala de laboratorio, y se realizaron todas las pruebas experimentales que permitieron determinar principalmente el efecto de la influencia del escalamiento sobre el proceso.
 - Para llevar a cabo el montaje del equipo se consideró una columna de lecho fijo a través de la cual se hizo circular una corriente de líquido de forma semicontinua; además de esto se requirió tomar en cuenta que el proceso debe llevarse a cabo con un pH óptimo y con capacidad de recircular la corriente a ser tratada para regular el flujo de alimentación a la columna.
 - Para determinar la influencia del escalamiento sobre el proceso, se realizaron pruebas experimentales del proceso de adsorción empleando lignina como adsorbente, así como Ni y V como metales adsorbidos, construyendo, a nivel de laboratorio, una columna de lecho fijo que

representa un proceso de adsorción continuo. Este sistema está conformado por un lecho de lignina cuya altura se varió para cada experiencia, de la siguiente manera: 0,10; 0,15 y 0,20m para la adsorción de Níquel y de 0,05; 0,10 y 0,15m para la adsorción de Vanadio; cada uno de los lechos se fraccionó mediante la utilización de fibra de vidrio. En cuanto a la concentración del metal en la solución alimentada a la columna, ésta fue de 20ppm tanto para el Níquel como para el Vanadio. Se garantizó la repetitividad de los datos experimentales obtenidos realizando una réplica a cada una de las experiencias, para conformar 4 pruebas por altura de lecho y un total de 12 pruebas a escala laboratorio, tal como se muestra en la tabla N° 1.

Tabla N°1. Distribución de pruebas experimentales para determinar la influencia del escalamiento.

Altura del lecho de lignina (m)	Concentración Níquel (ppm)	Número de pruebas	Concentración Vanadio (ppm)	Número de pruebas	Número de pruebas totales para cada altura de lecho
0,10	20	2	20	2	4
0,15	20	2	20	2	4
0,20	20	2	20	2	4
Número total de pruebas para cada metal	6		6		Número total de pruebas: 12

- **ETAPA III-DISEÑO DE LA PLANTA:** en esta etapa se definieron los aspectos básicos para el diseño, se construyeron los documentos característicos del mismo, se estimaron los costos del proyecto y se determinó la factibilidad del mismo. Cada uno de estos pasos se describe a continuación:
 - Definir tanto las características de la materia prima (representada por la lignina y el LIM) como las de los productos que se desean obtener (licor limpio y lignina pesada), tomando en cuenta la disponibilidad, costo y riesgo para los operarios, equipos y comunidad en general.
 - Determinar las condiciones de operación y diseño a partir del análisis de estudios previos y de heurísticas establecidas.
 - Determinar la capacidad de la planta basada en el compromiso de garantizar un tamaño suficiente para que no existan los problemas de operatividad comunes en las plantas pequeñas y que produzcan la menor cantidad de reactivos y pasivos ambientales.
 - Desarrollar un diagrama de bloques del proceso (DBP) que permita identificar el balance global de materia con los procesos requeridos antes y después de la adsorción.
 - Desarrollar un diagrama de flujo de proceso (DFP) que permita identificar los equipos mayores requeridos (con sus condiciones de operación) en cada uno de los procesos de la planta, así como la resolución del balance de masa y energía para cada uno de ellos.
 - Dimensionar los equipos mayores empleando para ello heurísticas y modificaciones apropiadas de correlaciones existentes en la bibliografía, reportando los resultados en las hojas de especificaciones de los equipos.
 - Analizar el DFP con el fin de identificar las posibles variaciones de las condiciones operacionales que se pueden llevar a cabo durante el funcionamiento de la planta, de esta forma se identificarán las variables que deben ser controladas y como deben ser controladas, es decir, establecer los sistemas de control.

- Construir el diagrama de tuberías e instrumentación (DTI) de la planta que indique los resultados de la definición de la filosofía de control.
 - Estimar el costo preliminar, tomando en cuenta la oferta de los equipos, instrumentos, partes y materiales de proveedores nacionales.
 - Establecer la factibilidad del proyecto a partir del análisis de los requerimientos técnicos resumidos en el DTI, los económicos a partir de las estimaciones de costos y los financieros a partir de las partidas previstas en el proyecto.
-
- **ETAPA IV-ANÁLISIS DE RESULTADOS:** a esta etapa corresponde la discusión y análisis de los resultados obtenidos por el montaje a escala de laboratorio, escalamiento y diseño a nivel básico de la planta de adsorción de metales pesados sobre lignina, obteniendo así los argumentos para concluir y realizar las recomendaciones pertinentes del trabajo y finalmente efectuar la defensa del mismo.

CAPÍTULO IV

MATERIALES, REACTIVOS, EQUIPOS Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En este capítulo se presentan de manera detallada la descripción de los materiales, equipos y procedimiento experimental a seguir para cumplir con los objetivos del presente trabajo.

El desarrollo de esta parte del trabajo está dividido en dos etapas importantes, una primera etapa de desarrollo experimental para establecer la influencia del escalamiento en el proceso de adsorción de Níquel y Vanadio sobre lignina, así como la selectividad del adsorbente sobre el proceso. Para ello se realizaron una serie de experiencias en el Laboratorio de Carbón de la Universidad Simón Bolívar (USB), el cual contó con materiales, equipos y muestras requeridas para las pruebas experimentales realizadas.

La segunda etapa está orientada a desarrollar el diseño a nivel básico de la planta piloto de adsorción de metales pesados sobre lignina, para lo cual sólo se necesitó de una computadora de alta velocidad equipada con los paquetes de software necesarios para realizar los cálculos pertinentes y construir los documentos característicos de este trabajo. A continuación se describen los materiales, reactivos, equipos y procedimientos experimentales utilizados durante la primera etapa.

IV.1. Materiales y reactivos para el desarrollo experimental

Estos suministros fueron encontrados en las instalaciones del Laboratorio de Carbón de la Universidad Simón Bolívar (USB) y se listan a continuación:

IV.1.1. Materiales y Reactivos

Los materiales empleados durante el desarrollo experimental son columnas de vidrio, mangueras, perlas de ebullición, lana de vidrio, varillas de vidrio, válvulas de paso, codos, bifurcaciones, fiolas, balones aforados, pipetas, pastillas magnéticas, vasos de precipitado, papeles de filtro, embudos de filtración y envases de plásticos con tapa.

En cuanto a los reactivos utilizados en la realización de las experiencias se tiene principalmente lignina, una solución de Níquel y una solución de Vanadio. La solución matriz de Níquel contaba con una concentración de 1.000ppm y el estado de oxidación del metal es +2; en cuanto a la solución de Vanadio, ésta tenía una concentración de 1.000ppm y su estado de oxidación es +5. Estos estados de oxidación representan la condición más estable de los iones en estudio y fueron seleccionados según lo indicado en 1992 por Krauter.

La lignina a emplear en este estudio es conocida con el nombre de Indulín AT, proviene de la madera de pino sometida a un procedimiento al sulfato llamado Kraft; en la tabla N°2 se muestran algunas características de dicho polímero orgánico.

Tabla N°2. Características de la lignina Indulin AT.

Composición	Porcentaje de carbono (%)	65
	Porcentaje de Hidrógeno (%)	5
	Porcentaje de Oxígeno (%)	30
Peso molecular	840g/gmol	
Grupos funcionales por mol de lignina	Metóxidos	4
	Hidrófilos	4
	Carbonilo	1

Con la finalidad de ajustar el valor de pH a un valor muy cercano a 4 en las soluciones de metales, se debió considerar la utilización de reactivos, que si bien no son principales, gracias a estos se logró el óptimo desarrollo de la experiencia. Estos reactivos se encontraban en fase acuosa. Se utilizaron el ácido sulfúrico (al 30% p/p) y el amoníaco (al 25% p/p).

IV.2. Equipos

Para el desarrollo experimental de este trabajo se requirió de determinados equipos, estos se muestran a continuación y además para cada uno de ellos se presenta una breve descripción.

IV.2.1. pH-metro digital

Es posible medir el pH de una disolución con buena exactitud usando un pH-metro, éste es un aparato electrónico, que consta de un electrodo que se introduce en la disolución de pH desconocida. En líneas generales, el funcionamiento del pH-metro se basa en que el electrodo contiene una disolución ácida encerrada en una membrana de vidrio especial que permite la migración de los iones H_3O^+ . Si la disolución desconocida tiene un pH diferente a la disolución dentro del electrodo, se establece una diferencia de potencial, la cual se registra en la escala de pH que presenta el equipo.

El pH-metro digital empleado es un equipo que se caracteriza por medir valores de pH entre 0 y 14, éste cuenta con circuitos electrónicos de alta calidad. El equipo se presenta en la figura N°8.



- 1 Electrodo pH de doble junta.
- 2 Botones reguladores.
- 3 Carcasa impermeable.
- 4 Pantalla digital.

Figura N°8. pH-metro digital.

Tal como se muestra en la figura N°8, el pH-metro es de tipo portátil marca HANMA Instruments, ensamblado en caja plástica, acondicionado con pila que lo hace útil tanto en el laboratorio como en campo. Éste cuenta con un control manual de temperatura. La disposición de sus controles garantiza un fácil manejo.

IV.2.2. Plancha de agitación

Es posible mantener una muestra agitada y a una temperatura fija mediante la utilización de una plancha de agitación y calentamiento, ésta cuenta con una placa magnética, que permite al introducir una pastilla magnetizada en el recipiente de la muestra y poner en contacto el fondo del recipiente con la superficie de la placa, calentar la solución y mantener la agitación de la muestra a una velocidad regulada.

La plancha de agitación utilizada para la realización de la experiencia a escala laboratorio cuenta con una plancha apoyada sobre una base en donde se encuentran las perillas correspondientes a la regulación de temperatura y agitación. Es de marca Fisaton, trabaja con un rango de temperatura entre 50-300°C y posee nueve niveles de agitación sin especificar las revoluciones por minuto para cada nivel. En la figura N°9 se muestra la plancha de agitación y calentamiento.



- 1 Placa de calentamiento magnética.
- 2 Sistema de encendido y control de temperatura.
- 3 Sistema de encendido y control de agitación.
- 4 Cable de poder.
- 5 Pastilla magnética de agitación.

Figura N°9. Plancha de agitación y calentamiento.

Éste es un equipo que está diseñado para calentar muestras a temperaturas hasta 300°C, tal como se mencionó anteriormente, y así suplir con las necesidades de mezclado y calentamiento en el laboratorio, se caracteriza por estar ensamblada en una caja metálica y debido a su conformación es de fácil manejo y limpieza. Además cuenta con una placa de calentamiento de aluminio magnética, posee un control continuo de calentamiento con su respectivo sistema de encendido y en su panel posterior tiene el portafusible y el cable de poder.

IV.2.3. Bomba

Siempre que se haga referencia a un proceso químico, de cierta forma se está involucrando un fluido que generalmente se encuentra en circulación a través del sistema, por tal motivo se requiere de la consideración de bombas en su construcción, ya que éstas se encargan de proporcionar la energía cinética necesaria para garantizar que el fluido se desplace a través del sistema venciendo las caídas de presión.

El funcionamiento de una bomba es el de un convertidor de energía, es decir, éste transforma la energía mecánica en energía cinética, generando presión y velocidad en el fluido; para ello se cuenta con diversos tipos de bombas que existen para cumplir

con diferentes aplicaciones, pero particularmente para el sistema de adsorción instalado se empleó una bomba de émbolo alternativo.

El modelo de bomba empleado está diseñado para ser utilizado en procesos que requieran de una vida útil muy larga. El equipo cuenta con un motor cubierto y se caracteriza por ser útil para fluidos corrosivos y para funcionar durante 24 horas al día.

El bombeo funciona mediante el principio de desplazamiento positivo, ya que la rotación del motor transmite mediante una palanca pivote un movimiento hacia arriba y abajo del émbolo, lográndose impulsar el fluido a una presión de descarga constante. La bomba empleada se muestra en la figura N°10.



- 1 Succión.
- 2 Descarga.
- 3 Motor.
- 4 Conexión eléctrica.
- 5 Sistema de encendido.

Figura N°10. Bomba de desplazamiento positivo.

IV.2.4. Balanza analítica

La balanza analítica es uno de los instrumentos de medida más usados en laboratorio y de la cual dependen básicamente todos los resultados analíticos.

La balanza analítica empleada es un equipo moderno marca Sartorius, capaz de registrar un peso máximo de 160g con un error de aproximadamente 0,0001g. Está bastante desarrollada, ya que cuenta con una urna de cristal que protege la muestra de manera que no es necesaria la utilización de cuartos especiales para la medida del peso. Aún así, el simple empleo de circuitos electrónicos no elimina las interacciones

del sistema con el ambiente. De estos, los efectos físicos son los más importantes porque no pueden ser suprimidos. En la figura N°11 se muestra la balanza utilizada para el desarrollo experimental.



- 1 Plato de pesada de acero inoxidable.
- 2 Perillas reguladoras.
- 3 Pantalla de dígitos iluminados.
- 4 Urna de cristal con puertas deslizantes.
- 5 Pies roscados.

Figura N°11. Balanza analítica.

IV.2.5. Reóstato

Con el fin de regular el voltaje en un equipo eléctrico se emplean los reóstatos, estos equipos generalmente son utilizados como arrancadores ya que están en la capacidad de limitar la corriente que fluye cuando el motor se conecta, controlándose la velocidad de éste según sea necesario. El reóstato utilizado funciona de forma manual, su construcción es de tambor y su cubierta protegida, tal como se muestra en la figura N°12.



- 1 Escala de voltaje.
- 2 Perilla de graduación.
- 3 Sistema de encendido.
- 4 Conexión con bomba.
- 5 Conexión eléctrica.

Figura N°12. Reóstato.

IV.2.6. Manómetro de Bourdon

Puede decirse que las mediciones de presión son las más importantes que se hacen en la industria, sobre todo en industrias de procesos químicos. La presión es una fuerza ejercida sobre un área determinada, y se mide en unidades de fuerzas por unidades de área, y cada vez que esta fuerza se ejerce se produce una deflexión, una distorsión o un cambio de volumen.

Los manómetros son instrumentos para medir presión. Por lo general, los manómetros se diseñan para medir intensidades de presión por encima o por debajo de la presión atmosférica, considerando a la atmosférica como base. Las presiones medidas de éste modo se denominan presiones relativas o manométricas en donde los valores negativos indican la cantidad de vacío.

El método más usual para medir presiones es por medio del manómetro de Bourdon, que consiste en un tubo aplanado de bronce o acero curvado en arco. A medida que se aplica presión al interior del tubo, éste tiende a enderezarse, transmitiéndose el movimiento a un cuadrante por intermedio de un mecanismo amplificador adecuado. El manómetro empleado para el desarrollo de la experiencia registraba presiones entre 0 y 100psi, éste se muestra en la figura N°13.



- 1 Escala de presión.
- 2 Unidades de la escala de presión.
- 3 Aguja indicadora de presión.
- 4 Conexión al sistema.

Figura N°13. Manómetro de Bourdon.

IV.2.7. Espectrómetro de plasma acoplado inductivamente (ICP-EA)

Con la finalidad de evaluar el potencial de un adsorbente tal como la lignina se emplea el espectrómetro de plasma acoplado inductivamente (ICP-EA), marca GBC, Modelo Integra XL, este sistema consiste en una serie de tubos de cuarzo concéntricos a través de los que fluye argón; todo el conjunto se encuentra alojado en el interior de una bobina conectada a un generador de alta frecuencia.

El funcionamiento del espectrómetro de plasma acoplado inductivamente consiste en hacer circular la corriente de alta frecuencia a través de la bobina generando un campo magnético cuyas líneas de fuerza están orientadas axialmente; este campo magnético induce a los iones y electrones a moverse dentro del tubo en órbitas circulares, lo cual produce un calentamiento de los gases ionizados. El sistema consta de una fuente de alimentación que suministra la energía necesaria para llevar a los átomos al estado excitado y los mismos se focalizan sobre un monocromador de muy alta resolución al final del cual, se encuentra un detector que está conectado a un computador de control que se encarga de realizar las funciones de cálculo automáticamente y de mostrar al operador los resultados mediante un lector digital, de esta forma se obtiene la cantidad de metales presentes en la solución.

A continuación se describirá el procedimiento experimental a seguir para lograr los objetivos de este estudio.

IV.3. Procedimiento experimental

Se llevó a cabo un proceso experimental a nivel de laboratorio, trabajando con dos tipos de muestras: soluciones de Níquel y soluciones de Vanadio, tal como se indicó en el capítulo tres, en la tabla N°1.

En líneas generales, para el desarrollo experimental se dispuso de una cantidad variable de lignina y diversas soluciones acuosas de los metales pesados con concentraciones previamente establecidas en ppm, se procedió a hacerlos interactuar en una columna de lecho fijo durante un tiempo que varió dependiendo de la altura de lecho con la que se trabajó, para luego obtener una solución acuosa resultante y determinar la cantidad de metal pesado remanente (no adsorbido por la lignina) en la solución.

IV.3.1. Montaje de la planta a escala de laboratorio

Con la finalidad de cumplir los objetivos de este trabajo fue necesario desarrollar, como parte experimental, el montaje de una planta de adsorción de metales con lignina a escala de laboratorio, utilizando una columna de lecho fijo, esto con el propósito de observar el comportamiento del proceso de forma continua y tomar así las variables requeridas para el escalamiento a planta piloto.

El montaje consistió en un recipiente que contiene la solución de metal que se desea procesar, esta solución es bombeada por una bomba de émbolo que lleva el fluido, mediante una manguera, al extremo inferior de una columna de vidrio de 0,01m de diámetro y 0,3m de largo, a través de la cual circula la solución, poniéndose en contacto con la lignina y dando como resultando una corriente procesada que se envía a un recipiente de almacenamiento. Para la toma de muestras en el sistema se contó con una bifurcación y una llave de paso que permitió la recolección de las muestras en línea. En la figura N°14 se muestra el montaje del equipo.



- 1 Recipiente con la solución a tratar.
- 2 Bomba.
- 3 Columna de lecho fijo.
- 4 Recipiente recolector.
- 5 Toma de muestra.

Figura N°14. Sistema de adsorción a escala laboratorio.

El elemento principal del montaje, es la columna de lecho fijo la cual está estructurada desde el extremo inferior al superior de la siguiente forma:

- Lana de vidrio. Está conformada por una pequeña cantidad de lana que se coloca en forma de tapón y cubre aproximadamente 0,005m de la altura de la columna.
- Perlas de ebullición. Se colocan con el fin de lograr que el fluido que atraviesa la columna se distribuya más uniformemente antes de ponerse en contacto con el adsorbente. Tiene una altura de aproximadamente 0,017m.
- Lana de vidrio. Este material se emplea nuevamente para evitar que el fino polvo de lignina se disperse en los espacios intrínsecos de las perlas, debido a su objetivo, esta capa debe ser muy fina, aproximadamente 0,001m para no afectar el efecto de las perlas colocadas debajo de ella.
- Lecho de lignina. Corresponde a la altura ocupada por el adsorbente, la cual varía dependiendo de la experiencia; para efectos de reducir la caída de presión a través de esta zona se fraccionó el mismo colocando una pequeña cantidad de lana de vidrio aproximadamente cada 0,02m de lecho de adsorbente.
- Lana de vidrio. Esta capa se establece con la finalidad de representar un filtro para evitar que el polvo de lignina salga del sistema y al mismo tiempo opone

resistencia para que el lecho no se desplace de su posición original. La altura es de aproximadamente 0,015m.

- Perlas de ebullición. Representa la penúltima capa de la columna y se considera con el propósito de generar resistencia sobre el lecho para evitar que éste sea desplazado por el fluido que lo atraviesa.
- Lana de vidrio. Es la última capa de la columna y funciona como último filtro para la lignina y además evita que las perlas de ebullición se desplacen, mide aproximadamente 0,013m de altura.

Las partes que conforman la estructura de la columna de lecho fijo mencionadas anteriormente se observan más claramente en la figura N°15.



- 1 Lana de vidrio.
2 Perlas de ebullición.
3 Lecho de lignina.

Figura N°15. Estructura de la columna de lecho fijo.

IV.3.2. Preparación de las soluciones de metales

En esta etapa del desarrollo experimental lo que se desea es preparar las soluciones de Níquel y Vanadio a concentraciones específicas, mediante los siguientes pasos:

- Verificar que los materiales estén limpios.

- Calcular la relación necesaria entre el volumen de la muestra y la solución de 1.000ppm correspondiente para obtener la muestra a la concentración deseada.
- Colocar una cantidad apropiada en un vaso precipitado de la solución matriz, bien sea la de Ni o la de V.
- En un balón aforado de 1.000ml se agrega, mediante el uso de una pipeta, el volumen necesario de la solución matriz que se encuentra en el vaso precipitado.
- El nivel de solución del balón aforado se lleva hasta el aforo con agua destilada. De esta forma se asegura la nueva concentración de la muestra.
- El balón aforado se agita vigorosamente con la finalidad de homogenizar la solución que se encuentra en su interior.
- Verificar el valor de pH de la solución resultante, mediante el uso de un pH-metro. Este valor de pH es regulado usando ácido sulfúrico (al 30% p/p) o amoníaco (al 25% p/p) según sea necesario, mediante el uso de un pH-metro, una pastilla de agitación y una plancha de agitación magnética.

Una vez seguidos los pasos anteriores para cada una de las concentraciones deseadas se obtienen las muestras necesarias para continuar con el desarrollo de la experiencia.

IV.3.3. Proceso de adsorción

En esta etapa del desarrollo experimental se lleva a cabo el proceso de adsorción, para ello se debe seguir con los siguientes pasos:

- Verificar que todas las partes del sistema montado estén limpias y secas.
- Agregar a la columna de vidrio la cantidad de lignina requerida, para ello se rellena el interior de la columna desde el fondo con lana de vidrio, perlas de ebullición, nuevamente lana de vidrio para posteriormente agregar la cantidad de lignina necesaria para cumplir con la altura deseada dependiendo del caso (0,05; 0,10; 0,15 y 0,20m intercalada con lignina), luego se termina de rellenar

con lana, perlas de ebullición y finalmente con lana de vidrio, obteniendo así una columna de lecho fijo.

- Una vez completado el interior de la columna se procede a conectarla al sistema montado, uniendo cada uno de los extremos con las mangueras correspondientes.
- Se pone en funcionamiento la bomba que se encarga de impulsar la solución de Ni y V a través de la columna de lecho fijo de lignina. Este proceso se realiza durante un tiempo estipulado de 60 minutos, tomándose una muestra recolectada en un envase de plástico cada 10 minutos.
- A las muestras recolectadas se les mide el pH y el potencial eléctrico.
- Cada una de las muestras recolectadas se someten a un proceso de filtración con la finalidad de eliminar las partículas de lignina que pudieran encontrarse en fase dispersa. Esto se logra mediante el uso de una bomba de vacío y un lavado con agua destilada para asegurar que se arrastren todos los metales.
- Las soluciones filtradas se transvasan a un envase con tapa para ser enviadas a una prueba de adsorción atómica (ICP).

IV.3.4. Prueba de adsorción atómica (ICP)

Este paso se aplicó con el objetivo de evaluar el potencial adsorbente de la lignina. Se tomó una muestra de la solución del paso anterior con la finalidad de medir la concentración final de metales disueltos en la solución mediante un espectrómetro de plasma acoplado inductivamente (ICP-EA). Esta prueba es realizada por los técnicos de la Unidad de Gestión Ambiental de la Universidad Simón Bolívar (UGA-USB).

Como resultado de la experiencia, se tiene que la diferencia entre las cantidades iniciales y finales del metal corresponde a la cantidad fijada por adsorción sobre la lignina.

CAPÍTULO V

VISUALIZACIÓN DEL PROCESO

En el diseño de una planta de proceso, es importante contar con el conocimiento detallado, no sólo de los objetivos para los que va a ser diseñada y puesta en marcha, sino también de las características que ésta debe poseer, teniendo así una visión del funcionamiento y las condiciones que debe cumplir; en base a todo lo anteriormente mencionado es posible establecer las bases y criterios de diseño necesarios en el proyecto.

Las bases y criterios de diseño son una serie de parámetros que se deben establecer para diseñar una planta de proceso, estos se caracterizan por formar parte de los productos de la ingeniería Básica.

En este capítulo se presentan de forma detallada no sólo las características de la planta, sino cada una de las bases de diseño, las cuales involucran las características y condiciones de la materia prima, las especificaciones de insumos y productos finales, las características de los servicios industriales, el factor de servicio, el manejo de efluentes, los requerimientos de almacén, las condiciones del sitio, los códigos y normas aplicables. Una vez establecidas las bases de diseño se presentan los criterios, los cuales están conformados por la filosofía de diseño, control, seguridad y protección.

V.1. Propuesta del proceso

Antes de sentar las bases y criterios de diseño se debe iniciar estableciendo una imagen de la planta a instalar, por lo que se requiere definir con claridad el fin de la investigación. En este caso el objetivo de la investigación es diseñar a nivel básico

una planta de adsorción de metales pesados sobre lignina a escala piloto, por tal motivo se señalan a continuación algunos puntos a considerar para el diseño:

- El licor ácido proveniente de la irradiación vía microondas (LIM) debe ser almacenado en un tanque con la finalidad de garantizar para el tiempo de operación un flujo constante.
- El proceso debe llevarse a cabo de forma semicontinua, ya que esta operación tiene como resultado condiciones en estado no estacionario, en donde las composiciones resultantes del sistema cambian con el tiempo, es decir, el lecho se satura y debe sustituirse para cumplir así de nuevo con las especificaciones de composición.
- El proceso debe garantizar un flujo constante durante el funcionamiento de la planta y proporcionar la recirculación del producto a otros procesos.
- La columna debe ser de lecho fijo, ésta es la configuración más conveniente para trabajar con adsorbentes de partículas muy pequeñas (polvo) y trepadoras, ya que disminuye el arrastre de las mismas. Debe ser vertical con un adsorbente sólido que es mojado por una fase líquida ascendente de forma continua. Esta configuración se justifica en la sección VII.1.
- El pH de la alimentación debe ser controlado antes de alimentarse a la columna para garantizar que la adsorción ocurra a un pH óptimo.
- El producto de la torre de adsorción debe ser alimentado a un filtro con la finalidad de eliminar todas las partículas de adsorbente que se hayan arrastrado durante el proceso.
- La planta piloto diseñada debe presentar versatilidad en cuanto a las condiciones de proceso. Debe ser lo suficientemente flexible en lo que respecta a variables como presión y alimentación permitiendo condiciones de operación diferentes.
- Los extremos de la columna requieren la utilización de placas perforadas o tamices para disminuir la canalización del fluido y el paso de lignina a la corriente de salida.

- La planta piloto debe ser capaz de generar información que permita verificar el efecto de los cambios de las principales variables operacionales.
- La planta debe ser lo más económica posible, en base a la limitación de los recursos económicos, considerándose esto en cada una de las decisiones tomadas a lo largo del diseño.
- La planta debe ser segura para el proceso, el personal que opere en la misma y para el medio ambiente.

Una vez establecidas las consideraciones y parámetros de cómo debe ser la planta de adsorción de metales pesados sobre lignina a escala piloto es posible establecer las bases y criterios necesarios para el diseño de la misma.

V.2. Bases de diseño

Las bases de diseño son los parámetros que sirven de origen o raíz para el proceso de diseño de una planta, en este caso, para una planta de adsorción de metales pesados sobre lignina a escala piloto, y así continuar con la aplicación de la ingeniería Básica. Dichas bases se explican a continuación.

V.2.1. Características y condiciones de la materia prima

La materia prima utilizada en este proceso está conformada por una corriente de LIM, la cual contiene Níquel y Vanadio, por otra parte se tiene al adsorbente empleado para retirar estos metales, denominado lignina.

Para obtener un producto con las especificaciones deseadas, se debe tomar en cuenta la naturaleza físicoquímica y las condiciones de proceso de la materia prima; conformadas por la composición, gravedad específica, peso molecular, presión y temperatura a las cuales está disponible. Las especificaciones consideradas para LIM se muestran en la tabla N°3.

Tabla N°3. Especificaciones del licor ácido (LIM).

Especificación	Valor
Peso molecular (kg/kmol)	18,31
Densidad (kg/L)	0,993
Presión (atm)	1
Temperatura (°C)	25

Cabe destacar que para efectos de diseño se considera el LIM que proviene de la desmetalización y desulfuración de coque retardado mediante un proceso de digestión ácida vía microondas. El coque es la fracción media de la planta de Refinación Cardón, se identifica como CD-CRM-PCR y posee una granulometría mayor a 250 μ m.

En cuanto a la composición del LIM se tiene la información mostrada en la tabla N°4.

Tabla N°4. Composición del licor ácido (LIM) (Krauter, 1992).

Componente	Concentración (ppm)
Ácido clorhídrico	17.612
Níquel	2,25
Vanadio	20

Por otro lado, es necesario considerar que las características del LIM a ser tratado en un sistema de adsorción varían dependiendo de las características del coque del cual se obtenga, ya que tanto las condiciones del yacimiento del hidrocarburo como el método de coquización empleado afectan las propiedades físicas y químicas de éste.

La lignina empleada para adsorber los metales pesados contenidos en el LIM proviene de la madera de pinos sometida a un procedimiento al sulfato llamado Kraft y sus características se muestran en la tabla N°5.

Tabla N°5. Características de la lignina.

Propiedad típica	Valor
Nombre químico	Lignina Kraft
Fórmula química	$((\text{CH}_3\text{O})(\text{OH})\text{Ar}(\text{C}_3\text{H}_4\text{O}))_x$
Solubilidad en agua	Insoluble
Forma física	Polvo castaño suelto.
Densidad a granel suelta	0,416kg/L
Densidad a granel compacta	0,512kg/L
Humedad	5%
pH (solución acuosa al 15% y 20°C)	6,5
Contenido de lignina (base seca)	97%
Gravedad específica	1,3
Tensión superficial (1% acuoso)	43mN/m
Disponibilidad	Paquetes de 35lb (15,9kg)

V.2.2. Especificaciones de productos finales

En esta sección debe ser tomado en cuenta el rendimiento de los productos, las especificaciones de los mismos y las condiciones de entrega, tales como las cantidades absolutas (porcentajes o conversión química), valores límites de los parámetros de composición, presión y temperatura (Turton, 1998).

Por la naturaleza de este estudio se tienen dos objetivos claros, por una parte se desea eliminar de la corriente de LIM los metales pesados disueltos, con la finalidad de recircular dicho licor al proceso de desmetalización. Esto genera que uno de los productos del proceso sea una corriente de licor ácido con la menor cantidad de metales disueltos posible. Por otra parte, se considera por condiciones ambientales que es conveniente transformar esos metales que se encuentran en fase líquida disueltos en el licor a una fase sólida, es por ello que la lignina pesada, en donde quedan atrapados los metales, es considerada un producto del proceso.

Para el proceso estudiado, una vez tratada la materia prima, debe obtenerse una corriente de licor limpio a 1atm y a 27°C con las especificaciones mostradas en la tabla N°6.

Tabla N°6. Especificaciones de producto.

Componente del licor limpio	Porcentaje de remoción del metal (%)
Níquel	97
Vanadio	20

La lignina resultante del proceso debe obtenerse con la condición mostrada en la tabla N°7. La lignina obtenida es llamada lignina pesada por encontrarse retenidos sobre su superficie los metales removidos del licor ácido.

Tabla N°7. Condición de la lignina pesada.

Condición	Valor
Temperatura	27°C

V.2.3. Insumos

Los insumos requeridos para la adsorción de metales pesados sobre lignina son los siguientes:

- Ácido sulfúrico (al 30% p/p) y el amoníaco (al 25% p/p): con la finalidad de ajustar el valor de pH a un valor muy cercano a 4 en el LIM. Esto es fundamental para el óptimo desarrollo de la adsorción.

V.2.4. Características de los servicios industriales

Para la operación de la planta propuesta se requiere únicamente de los siguientes servicios industriales.

- Energía eléctrica: se utiliza para el funcionamiento de todos los equipos e instalaciones eléctricas. Se requiere de la existencia de conectores eléctricos bifásicos de 220 voltios. En la zona donde será ubicada la planta se cuenta con este servicio.
- Agua de lavado: empleada en la remoción de lignina pesada y de otras sustancias provenientes del LIM que se encuentran presentes en el sistema.
- Aire de instrumentación: utilizados en los instrumentos de control con una presión 90psia.

V.2.5. Factor de servicio

El factor de servicio se refiere, al tiempo requerido para arranques, paradas y otras situaciones en las cuales la planta no operaría (Turton, 1998), éste se calcula mediante la expresión (18).

$$F_{servicio} = \frac{t_{operacion}}{t_{total}} \quad (18)$$

Donde:

$F_{servicio}$: factor de servicio (adim.).

$t_{operación}$: tiempo de operación de la planta (h).

t_{total} : tiempo total de la planta, sin descontar las paradas (h).

Para efectos del desarrollo de este trabajo, el factor será considerado en base trimestral, por ser la forma de trabajo de la Universidad Simón Bolívar; además es importante destacar que la planta diseñada tiene fines de investigación y puede ser operada únicamente durante horario de oficina; por tal motivo su tiempo de operación será de dos horas diarias, seis veces al trimestre, dando un total de 12 horas trimestrales, el resto del tiempo la planta no estará en funcionamiento dando un factor de servicio de 0,017; tal como se muestra al sustituir la expresión (18).

$$F_{servicio} = \frac{(2 \text{ horas / día})(6 \text{ días / trimestre})}{(8 \text{ horas / día})(90 \text{ días / trimestre})}$$

$$F_{servicio} = 0,017$$

El factor de servicio se calcula normalmente para plantas industriales con fines comerciales, por tal motivo el valor obtenido para la planta piloto diseñada no es representativo. Sin embargo, se determinó por formar parte de las bases de diseño.

V.2.6. Manejo de efluentes

En la fase inicial de un proyecto deben ser considerados los efluentes según los lineamientos para el manejo y disposición, bien sea de efluentes gaseosos, líquidos o sólidos, para ello es necesario considerar concentraciones y/o condiciones límite para la disposición, leyes y códigos vigentes. Debido a que la aplicación de esta planta piloto es con fines de investigación, es importante considerar que todos los productos y subproductos generados durante la operación de la misma no serán comercializados, por lo tanto, todos son considerados efluentes del proceso con riesgo de contaminación.

A pesar que el interés principal del proyecto recae sobre la producción de lignina pesada y licor con bajo contenido de metales, también existe la presencia de otros

efluentes que deben ser dispuestos adecuadamente como lo son el agua de lavado y los sólidos retenidos en la etapa de filtrado del proceso; estos son depositados y luego entregados a un laboratorio de desechos que se encargará de su posterior tratamiento.

La Universidad Simón Bolívar cuenta con un laboratorio de desechos el cual está en la disposición de encargarse del tratamiento de los efluentes obtenidos del proceso para posteriormente desecharlos sin causar daños al medio ambiente.

V.2.7. Requerimientos de almacén

El almacenamiento de materiales depende de la dimensión y características de éstos, se pueden almacenar en una simple estantería hasta en sistemas complicados que involucran grandes inversiones y complejas tecnologías. La elección del sistema de almacenamiento de materiales depende del espacio disponible, del tipo de material y de la cantidad a almacenar (Turton, 1998).

La planta a escala piloto de adsorción de metales pesados sobre lignina requiere de cinco tanques de almacenamiento, un primer tanque que contiene la materia prima LIM la cual será tratada en el proceso, un segundo tanque intermedio con el objetivo de almacenar y estabilizar el licor limpio antes de ser enviado a la etapa de filtrado, un tercer tanque con la finalidad de almacenar el producto principal del proceso que es el licor limpio, así como un tercer y cuarto tanque de menor tamaño que contienen las soluciones de amoníaco y ácido sulfúrico que se utilizan como reguladoras de pH.

Por otro lado, la lignina a utilizar como adsorbente es suministrada por el fabricante en paquetes de 15,9kg. Como su alimentación al sistema no es constante porque para su sustitución se debe esperar hasta el agotamiento de la misma, estos paquetes deben ser almacenados en estantes cerrados de madera o metal bien identificados mientras no son utilizados, logrando así que el material adsorbente no se encuentre directamente expuesto a la humedad del aire. Ésta es una de las técnicas de

almacenaje más simple y es empleada básicamente cuando se trabaja con pequeñas cantidades (Turton, 1998).

Adicionalmente, la lignina con Níquel y Vanadio obtenida como producto del proceso, está en estado sólido y húmedo, en éste caso es recomendable recolectarla en tambores o bolsas de plástico. Es importante considerar que el almacenaje de la lignina debe contar con ambientes frescos y secos, alejados de fuentes de ignición, materiales combustibles y calor. Así mismo debe evitarse la acumulación de polvos mediante una adecuada ventilación con la finalidad de evitar que ésta se quemé o que sus propiedades se vean afectadas, tal como se señala claramente en la sección A.1. correspondiente a los anexos.

V.2.8. Condiciones del sitio

La planta piloto será instalada en la Universidad Simón Bolívar ubicada en Sartenejas, en el estado Miranda, específicamente en el Laboratorio de Química Ambiental. Una vez fijada la ubicación de la planta es posible conocer cuáles son las condiciones meteorológicas promedio de la zona, ya que esta información es necesaria para el diseño de los equipos del proceso. Las condiciones del Laboratorio de Química Ambiental se muestran en la tabla N°8.

Tabla N°8. Condiciones del sitio de la ubicación de la planta.

Temperatura promedio (°C)	23,6
Presión (atm)	0,88
Humedad relativa (%)	72

V.2.9. Códigos y normas aplicables

A continuación se presentan las normas aplicadas al diseño y dimensionamiento de equipos, así como a los diagramas de flujo de proceso y de tuberías e instrumentación.

- PDVSA. Manual de Elaboración de Diagramas del Proceso.
- PDVSA. Manual de Ingeniería de Diseño, Identificación y Numeración de Tuberías.
- Normas ANSI. American National Standards Institute. Código de tuberías.
- Normas ISA. Instrument Society of America. Identificación de instrumentos.
- Normas ASME. Normativa relacionada con los recipientes a presión.
- Normas API. American Petroleum Institute.

Adicionalmente, y con el fin de resguardar la zona de instalación de la planta se utilizó la Ley Orgánica del Ambiente.

V.3. Criterios de diseño

Para el diseño, selección e instalación en general de una planta se deben considerar ciertos aspectos referentes a los equipos requeridos para cumplir con los objetivos, estos son un conjunto de criterios y normas que comprenden la filosofía de diseño, control, seguridad y protección.

V.3.1. Tuberías

Para el diseño de cualquier proceso químico es importante considerar las tuberías. Éstas no son más que el medio a través del cual se conduce un fluido de un punto a otro del sistema. Están hechas para un número discreto de tamaños y espesores de pared, estableciendo relaciones variables entre los diámetros externos e internos. Al momento de diseñar son necesarias las siguientes consideraciones (Walas, 1990):

- Para intercambiadores de calor, sistemas de refrigeración y servicios en general usualmente se requieren tuberías de diámetros entre 1/16 y 1/8 de pulgada.
- Dependiendo de fluido que se desee trasladar y de las condiciones de temperatura y presión a la que se tenga el mismo, se debe considerar el material de construcción ya que pueden ser de metal, cerámica, vidrio o plástico.
- Cuando se trabaja con tuberías de 2 pulgadas de diámetro o inferiores, las conexiones tienden a ser atornilladas, pero cuando son más grandes es recomendable soldarlas.
- Las conexiones entre la línea de tubería y algún equipo, siempre que se requiera el montaje y desmontaje de los mismos, deben contar con pestañas y válvulas en los extremos para fijar las tuberías a los equipos.
- Existen algunos valores típicos para la velocidad lineal del fluido y la caída de presión dentro de la tubería, éstos se muestran en la tabla N°9.

Tabla N°9. Valores típicos de tuberías (Walas, 1990).

	Velocidad lineal (pie/s)	Caída de presión (psi/100pie)
Descarga de bombas	$(5+D/3)$	2,0
Succión de bombas	$(1,3+D/6)$	0,4
Vapor o gas	20D	0,5
Líquido	-	4,0

V.3.2. Bomba

Un proceso químico involucra un fluido que generalmente se encuentra en circulación a través del sistema, éste requiere de energía cinética y para su desplazamiento se consideran bombas en la construcción de de la planta. Particularmente estos equipos

no se diseñan en la Ingeniería Básica, sólo se especifican, requiriendo para ello de la siguiente información (Walas, 1990):

- Las bombas centrífugas de una etapa se caracterizan por ofrecer entre 15 y 5.000gpm y 500pie cabezal y cuando son de múltiples etapas proporcionan entre 20 y 11.000gpm y 5.500pie de cabezal. En cuanto a la eficiencia, estos equipos cuentan aproximadamente con 45%/100gpm, 70%/500gpm y 80%/10.000gpm.
- Las bombas axiales se caracterizan por ofrecer entre 20 y 100.000gpm, 40pie de cabezal y una eficiencia entre 65-85%.
- Las bombas rotatorias se caracterizan por ofrecer entre 1 y 5.000gpm, 50.000pie de cabezal y una eficiencia entre 50-80%.
- Las bombas reciprocantes se caracterizan por ofrecer entre 10 y 10.000gpm, 1.000.000pie de cabezal y una eficiencia de 70%/10HP, 85%/50HP y de 90%/100HP.

V.3.3. Tanque de almacenamiento

La planta a diseñar requiere de cinco tanques de almacenamiento, uno para la materia prima LIM la cual será tratada en el proceso, otro con la finalidad de almacenar el producto obtenido de la columna de adsorción y que es utilizado como estabilizador, otro que se encarga de almacenar el producto principal del proceso que es el licor limpio y por último dos tanques de menor tamaño para las soluciones reguladoras de pH. Para el diseño de los tanques de almacenamiento se deben considerar algunos de los siguientes criterios (Walas, 1990):

- La cantidad mínima de masa que debe ser almacenada por ciclo se determina mediante un balance de materia del proceso.
- Para obtener la capacidad de los equipos a diseñar se considera la cantidad mínima de materia a ser almacenada con un exceso de 30%.
- La capacidad de los tanques de almacenamiento suele ser al menos 1,5 veces el tamaño de los equipos de transporte asociados al sistema.

- La relación largo diámetro (L/D) se establece a partir de los requerimientos de presión hidrostática del sistema. Se pueden considerar para el diseño relaciones L/D entre 3 y 5. Los diámetros se definen a partir de los valores comerciales.

V.3.4. Tanque de agitación

En el proceso estudiado se requiere mantener homogéneo el licor a tratar, una de las principales razones es para mantener el pH de toda la solución constante, por esta razón, para el diseño de un equipo de agitación se deben considerar los siguientes criterios (Walas, 1990):

- Una agitación suave se consigue al mantener en circulación el líquido mediante un impulsor con velocidades entre 0,1 y 0,2pie/s, y la agitación intensa se logra con una velocidad entre 0,7 y 1,0pie/s.
- La intensidad de agitación depende del tipo de operación que se lleve a cabo tal como se muestra en la tabla N°10.

Tabla N°10. Clasificación de los equipos de agitación.

Operación	Potencia (HP/1000)	Velocidad del impulsor (ft/min)
Mezclador	0,2-0,5	-
Reactor homogéneo	0,5-1,5	7,5-10,0
Reactor con transferencia de calor	1,5-5,0	10,0-15,0
Mezclador líquido-líquido	5,0	15,0-20,0
Mezclador líquido-gas	5,0-10,0	15,0-20,0

- Para un tanque de agitación el nivel de líquido debe ser igual al diámetro del tanque (D), el diámetro de la turbina del impulsor debe ser $D/3$. En cuanto a la altura del impulsor, éste debe estar ubicado a $D/3$ medido desde el fondo del tanque y el ancho de la hélice del agitador debe ser $D/15$.
- La potencia requerida para una mezcla de líquido-gas es entre 25 y 50% mayor a la necesaria por una mezcla de líquido exclusivamente.

V.3.5. Columnas de adsorción

Las columnas de adsorción comúnmente empleadas para sistemas como el estudiado son simplemente columnas rellenas que pueden ser diseñadas como recipientes a presión (pressure vessels), para las cuales se deben considerar algunos de los siguientes criterios (Walas, 1990):

- La temperatura de diseño aceptable según los márgenes de seguridad debe estar entre 28,9 y 343,3°C.
- La presión de diseño es el 10% o entre 10 y 25psia de la máxima presión de operación. La máxima presión de operación es 25psia sobre la presión normal de operación.
- Se considera un sistema a vacío cuando la presión de diseño está entre el vacío absoluto y 15psia.
- El espesor mínimo de carcasa considerado es de 0,25 pulgadas para 42 pulgadas de diámetro, de 0,32 pulgadas para diámetros entre 42 y 60 pulgadas y de 0,38 para diámetros mayores a 60 pulgadas.
- Según la corrosión, el espesor de la carcasa es de 0,35 pulgadas si el fluido es corrosivo; de 0,15 pulgadas si no se conocen propiedades corrosivas del fluido y de 0,06 cuando se contenga vapor.
- La tensión máxima aceptable depende de la temperatura y del material de construcción.

V.3.6. Filtro

En la planta de adsorción de metales pesados sobre lignina, una vez que se ha tratado la corriente de LIM alimentada al sistema, la misma debe ser procesada por un filtro con la finalidad de eliminar todas aquellas partículas de lignina que hayan sido arrastradas, es por ello que se consideran los siguientes puntos para el diseño de un filtro (Walas, 1990):

- Los procesos de filtración se clasifican según el espesor de la torta que se forma en su interior para un determinado intervalo de tiempo; pueden ser rápidos (0,1 y 10,0cm/s), medios (0,1 y 10,0cm/min) o lentos (0,1 y 10,0cm/h).
- La filtración en continuo no es conveniente si el espesor de la torta es inferior a 1/8 pulgada después de transcurrido 5 minutos del proceso.
- Tanto la filtración rápida como la media, se logran al utilizar bombas de vacío o centrífugas.
- Son aconsejables las pruebas de laboratorio para determinar el comportamiento del sistema a una escala muy pequeña, de ésta forma es posible evaluar el endurecimiento y secado de la torta de filtración.
- Para la filtración de sólidos muy finos, se recomienda la utilización de filtros con tambor rotatorio a unas condiciones de 1500lb/(day)(sqft), 20rev/h y 18-25in Hg.
- Cuando se emplean sistemas rotatorios para la filtración de sólidos gruesos o cristales, las condiciones son de 6000lb/(day)(sqft), 20rev/h y 2-6in Hg.

V.3.7. Tolva

El proceso de adsorción requiere únicamente de un tolva que se encargará de almacenar en su interior la lignina con Ni y V una vez que ésta se agote y se desaloje del interior de la torre de adsorción. La tolva se considera como un recipiente de almacenamiento abierto a la atmósfera y los criterios considerados para este equipo se muestran a continuación:

- La cantidad mínima de masa a ser almacenada se establece a partir del balance de materia del proceso.
- Para obtener la capacidad de los equipos a diseñar se considera la cantidad mínima de materia a ser almacenada con un exceso de 30%.
- La relación base altura (A/B) no debe ser mayor a 0,5 y se establece a partir de la capacidad requerida.
- La relación entre la base y la altura se determina al considerar las dimensiones comerciales.
- La geometría de la tolva se selecciona para evitar la acumulación de sólidos en puntos específicos de la misma, es por ello que se recomienda una geometría en forma de pirámide disminuyendo así la existencia de zonas muertas.

CAPÍTULO VI

LOCALIZACIÓN Y CAPACIDAD DE LA PLANTA

Para el diseño de una planta de proceso es importante contar con un mínimo de información básica del proyecto, tal como la ubicación de ésta y su capacidad, con la finalidad de establecer las oportunidades y limitaciones que involucran dichas características y con el fin de minimizar los riesgos asociados al proyecto.

VI.1. Localización de la planta

La planta piloto será instalada en la Universidad Simón Bolívar ubicada en Sartenejas, en el estado Miranda, específicamente en el Laboratorio de Química Ambiental.

Debido a que la idea de este proyecto es realizar el montaje de forma integrada con otras plantas piloto, la ubicación de ésta tiene un área disponible de aproximadamente 16m². El laboratorio donde se instalará la planta está en la capacidad de proveer de espacio y servicios básicos e industriales requeridos para su funcionamiento, y en el caso que alguno de ellos no se encuentre ya disponible, podrán hacerse las adaptaciones pertinentes; además, en esta área se cuenta con el personal necesario para su futura operación y análisis de resultados.

VI.2. Capacidad de la planta

Las dimensiones de una planta piloto usualmente están relacionadas con su capacidad, así como también con el objetivo para el cual ha sido diseñada. De igual manera, se debe tener presente el hecho de que la planta debe ser lo más pequeña posible para minimizar la disposición de desechos, inversión inicial en equipos, así como los requerimientos de materia prima y servicios requeridos.

La capacidad de una planta a nivel industrial generalmente se define en términos de los productos principales y se determina mediante un estudio de mercado al considerar las oportunidades de colocación de estos.

Para el caso de plantas piloto generalmente el objetivo no es colocar un producto en el mercado sino realizar un estudio sobre el comportamiento del proceso instalado. Por tal motivo la capacidad en este caso se define al considerar una producción lo suficientemente grande como para garantizar la cantidad requerida de productos para su caracterización, con un flujo suficiente en las tuberías que garanticen velocidades lineales mínimas bajo las cuales no ocurra el taponamiento por relaciones largo/diámetro de tubería existentes en el mercado; todo esto con la mínima disposición de desechos, requerimientos de materia prima e inversión inicial.

Además de todas las consideraciones pertinentes para estimar la capacidad se debe considerar que para la planta de adsorción de metales pesados sobre lignina a escala piloto, la capacidad está limitada por un proceso aguas arriba, el cual está encargado de generar la materia prima para la planta, es decir, es el encargado de desmetalizar el coque de petróleo vía irradiación microonda y de esta manera suministrar el licor ácido (LIM) que se procesará.

Por todo lo anteriormente mencionado, para estimar la capacidad de la planta piloto de adsorción de metales pesados sobre lignina se deben evaluar la capacidad mínima y la capacidad máxima requerida.

VI.2.1. Capacidad mínima

La capacidad mínima de la planta de estudio no se establece a partir de la colocación del producto en el mercado, sino que se define al considerar una producción lo suficientemente grande como para garantizar la cantidad de productos requeridos para

su caracterización, manteniendo un flujo que genere caídas de presión dentro de un rango estipulado.

En este caso en particular, por ser una planta piloto no necesariamente se deben cumplir los rangos teóricos para la velocidad lineal en el interior de las tuberías, ya que previo al diseño de la planta se realizó un montaje a escala laboratorio en donde se comprobó que no ocurre taponamiento por relaciones largo/diámetro de tubería y además se genera la mínima disposición de desechos, así como de requerimientos de materia prima.

Tal como demuestran las pruebas realizadas a escala laboratorio, con un flujo de 0,6L/h se obtiene suficiente producto como para realizar las pruebas pertinentes y lograr caracterizar el producto. Por otra parte, de la experimentación resultó que con los diámetros de tuberías existentes en el mercado, las caídas de presión en las tuberías del sistema se encuentran dentro de los valores recomendados por la teoría, aún cuando corresponden a relaciones de escala industrial (Walas, 1990) y aunque no se cumplen los valores recomendados para la velocidad lineal en la tubería, el sistema funciona satisfactoriamente sin ocurrir taponamiento en ellas.

A partir de esta información se puede concluir que para obtener como mínimo las cantidades requeridas para el análisis de los productos, sólo se requiere procesar en la planta de adsorción de metales pesados sobre lignina 0,6L/h de LIM. Por lo tanto, se establece como capacidad mínima para la planta piloto una capacidad de 0,6L/h, asegurándose así que la planta funcionará de forma satisfactoria.

VI.2.2. Capacidad máxima

Una vez determinada la capacidad mínima de la planta de adsorción se puede establecer la capacidad máxima, para ello se considera la cantidad de materia prima generada por el proceso aguas arriba y la cantidad de producto que ésta ocasiona.

En la fase inicial de este proyecto de diseño para la adsorción de metales pesados sobre lignina se consideró que el objetivo principal de la planta es producir la cantidad necesaria de licor limpio y de lignina pesada para su posterior caracterización, y una vez que las muestras tomadas sean analizadas, éstas serán tratadas como desechos al igual que el resto de los subproductos de la planta. En base a esto, es necesario tener en cuenta que mientras mayor sea la capacidad de la planta piloto de adsorción de metales sobre lignina, mayor será la cantidad de desechos generados.

Ya que el diseño de la planta proviene de un proceso de escalamiento desde la planta a escala laboratorio, es fundamental garantizar la operabilidad de la misma, para ello se debe tomar en cuenta que mientras mayor sea la capacidad establecida, mayores serán las dimensiones de los equipos necesarios. Esta tendencia dificulta la operación de la planta ya que se necesitaría de mayores cantidades de lignina y se generarían mayores cantidades de lignina pesada (desecho).

Además de lo anteriormente mencionado, cabe destacar que para establecer la capacidad máxima de la planta se debe tomar en cuenta que la misma no contará con grúas o similares para el manejo de los equipos. Por lo tanto, las capacidades mayores que dificultan las labores de inspección antes y durante la operación, así como las de mantenimiento preventivo y correctivo no son viables para el proyecto por implicar complicaciones en la construcción, montaje y puesta en marcha de la planta.

En base a lo anterior y recordando que el proceso de adsorción de metales pesados sobre lignina es alimentado por un proceso aguas arriba, el cual es la desmetalización y desulfuración de coque de petróleo por irradiación vía microondas y se encarga de proporcionar aproximadamente 5L/h de licor ácido cada vez que opere la planta, se puede decir, que la capacidad mediante la cual será aprovechada la cantidad de LIM

alimentada a la planta de adsorción es de 5L/h, por lo tanto ésta se considera como la capacidad máxima de la planta.

CAPÍTULO VII

ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL PROCESO SEMICONTINUO DE ADSORCIÓN A ESCALA LABORATORIO Y DEL ESCALAMIENTO

El proceso de adsorción es un mecanismo de gran importancia debido a sus aplicaciones múltiples en la industria química y en el laboratorio. Éste se caracteriza por involucrar una difusión primaria mediante la cual un adsorbente es capaz de retener sobre su superficie uno o más componentes.

En la práctica, muchos de estos procesos operan de un modo empírico, simplemente basados en la experiencia. El hecho de que cada sistema posea características que lo hacen diferente de cualquier otro obliga a realizar las investigaciones pertinentes para cada sistema en particular, ya que sus comportamientos impiden la comparación de casos semejantes con facilidad.

Por lo anteriormente descrito, en éste capítulo se presentan las dificultades superadas con la finalidad de lograr el montaje adecuado para la realización de un procedimiento experimental a escala de laboratorio de forma semicontinua, para la lignina como adsorbente de metales pesados, así como los resultados obtenidos por el mismo. Con dicha información se procedió a la aplicación de métodos tales como lo son el BDST (Tiempo de Servicio de Altura de Lecho) y la teoría de la semejanza que permiten el escalamiento de ciertas características del sistema.

VII.1. Desarrollo del montaje del sistema de adsorción a escala laboratorio

Para lograr el montaje definitivo del sistema de adsorción en semicontinuo a escala laboratorio fue necesario pasar a través de una serie de dificultades asociadas a los reactivos y equipos; igualmente es importante destacar que una limitante para el

desarrollo de esta etapa fue contar con una cantidad restringida de materiales a la disposición para la realización del montaje, cuyos pasos fueron los siguientes:

- Se instaló el sistema con el flujo de alimentación de solución a tratar por el tope de la columna, con un goteo producido por una válvula y la acción de gravedad, observándose una salida excesivamente lenta de solución tratada (menor a 0,18L/h).
- Al alimentar el flujo de solución a tratar por el tope de la columna mediante una bomba de desplazamiento positivo, se continuó observando una salida de solución tratada similar a la del punto anterior.
- Se observó que el goteo excesivamente lento se debió a la compactación del lecho cuando se encuentra mojado, esto ocurre debido al pequeño diámetro de las partículas de lignina (10 μ m), ya que la compactación implica que el fluido necesitó vencer una mayor caída de presión, dificultando su paso a través del lecho.
- Con la finalidad de disminuir la caída de presión ocasionada por el lecho, se probó el montaje de la columna mezclando la lignina con perlas de diferentes diámetros y a distintas proporciones para lograr una mejor circulación de fluido a través del lecho, sin embargo, el goteo siguió siendo excesivamente lento (menor a 0,18L/h).
- Probando una configuración que ayudara a vencer la caída de presión a través del lecho se instaló el sistema de la columna con la alimentación del flujo de forma ascendente mediante una bomba de desplazamiento positivo. Por la acción del bombeo, la zona con lignina se desplazaba dentro de la columna tal como se muestra en la figura N°16, por tal motivo fue necesario aplicar peso sobre el lecho para mantenerlo en su posición original, esto se logró con la colocación de perlas de ebullición sobre el lecho, tal como se mencionó en la sección IV.3.1. correspondiente al montaje de la planta a escala laboratorio.

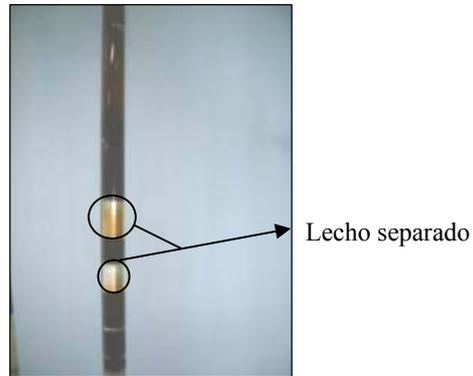


Figura N°16. Separación del lecho.

- Con la configuración que involucra el lecho, la alimentación de forma ascendente y las perlas, se logró un flujo de salida adecuado para el desarrollo de la experiencia tal como se muestra en la figura N°17.

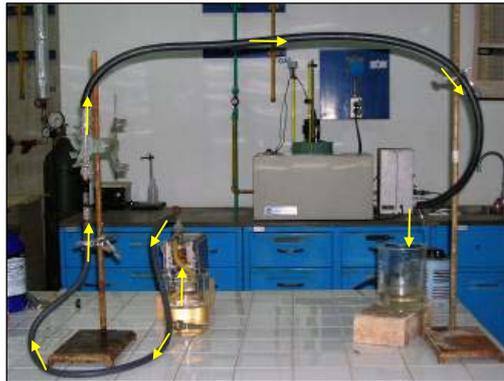


Figura N°17. Configuración resultante del la escala laboratorio.

- La sección de manguera que unía la descarga de la bomba con el fondo de la columna fue lo suficientemente resistente para soportar la presión, y además necesitó ser de un material adecuado, ya que la solución que la atravesó fue un ácido y se desgasta con rapidez. La manguera utilizada se muestra en la figura N°18.

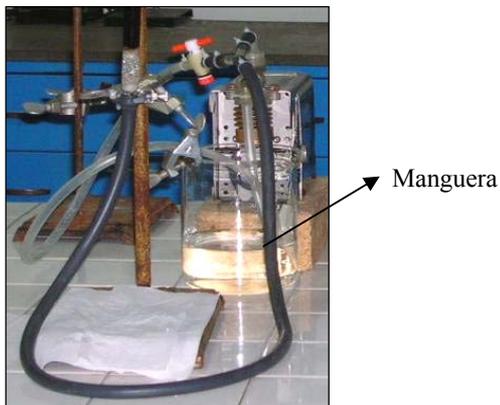


Figura N°18. Manguera de descarga de la bomba.

- Una vez instalada la columna se requirió una bifurcación en la salida del sistema para tomar las muestras pertinentes, sin correr el riesgo de dejar caer solución tratada fuera del recipiente destinado para ello. La bifurcación de toma de muestra se presenta en la figura N°19.

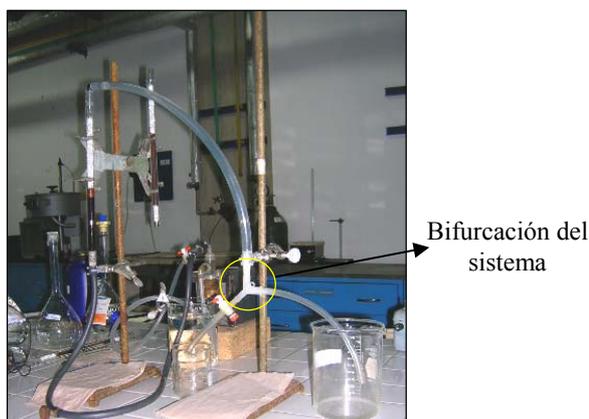


Figura N°19. Toma muestra del sistema a escala laboratorio.

- Debido a las presiones desarrolladas por el sistema, para que el flujo esté en la capacidad de vencer la caída de presión, se evidencian fugas que deben ser controladas antes de poner en funcionamiento el montaje, para ello se aseguraron todas las conexiones de las mangueras.
- Para el desarrollo de la experiencia es importante que el pH de la solución a tratar sea de aproximadamente 4. Se reguló éste parámetro por ser vital para que ocurra la adsorción en el sistema, ya que a otras condiciones no ocurre el

fenómeno de forma óptima y además se observó la dilución de la lignina en la solución que la atraviesa. La forma mediante la cual se reguló el pH de la solución a tratar se muestra en la figura N°20.



Figura N°20. Regulación de pH de la solución a tratar.

- En el montaje se consideró la disminución de la caída de presión ocasionada por el lecho de la columna. Dependiendo de la experiencia la altura del lecho es de 0,05; 0,10; 0,20; o 0,30m. Con la finalidad de disminuir la caída de presión se fraccionó la altura de lignina, es decir, se separó la altura de lecho cada 0,02 o 0,03m aproximadamente según el caso, mediante la utilización de lana de vidrio entre las fracciones de lecho, esto se muestra en la figura N°21.



Figura N°21. Fraccionamiento de los lechos de lignina.

- Una vez obtenidas las muestras resultantes del proceso se procedió a filtrarlas con la finalidad de eliminar todas aquellas partículas de lignina que se arrastraron durante el proceso de adsorción. Para la filtración se utilizaron

embudos con filtros porosos y una bomba de vacío, en la figura N°22 se presenta el montaje.



Figura N°22. Filtración de las soluciones.

- Como medida final para el montaje, una vez finalizado el proceso de adsorción, se procedió a medir la presión en la alimentación de la torre, esto se logró mediante un manómetro de Bourdon que registraba presiones entre 0 y 100psi. El manómetro fue conectado con una bifurcación en el extremo de la manguera que comunica la descarga de la bomba con la columna de adsorción.

VII.2. Resultados a escala laboratorio

Con el montaje presentado en la sección VII.1. fue posible llevar a cabo el proceso de adsorción de metales pesados sobre lignina en una columna de lecho fijo a escala laboratorio.

En esta sección se presentarán los resultados obtenidos en los experimentos dinámicos de adsorción; es decir, las curvas de ruptura, que muestran cómo evoluciona la concentración de soluto a la salida de la columna frente al tiempo, tanto para las soluciones de Níquel como las de Vanadio. Así mismo, se podrá observar

cuál es la cantidad de metales pesados adsorbidos en el sólido a medida que las soluciones atraviesan la columna.

La concentración inicial de metales en las soluciones fue establecida por las bases de diseño del proceso. Éstas han sido definidas por estudios previos referentes a la desmetalización y desulfuración del coque de petróleo mediante un proceso de digestión ácida vía microondas (González, 2005); por lo tanto, la concentración inicial de Níquel y Vanadio utilizada para las experiencias fue de aproximadamente 20ppm. Por otra parte, el caudal de solución alimentado a la columna fue de aproximadamente 0,6L/h para todas las experiencias, basado en experiencias similares realizadas con otros adsorbentes (Kumar y Bandyopadhyay, 2006; Zulfadhly y otros, 2000; Adak y otros, 2006). La variable que se manipuló para estas experiencias fue la altura del lecho (cantidad de lignina) y el procedimiento empleado es el descrito en el capítulo IV de este trabajo.

Para el óptimo desarrollo del procedimiento experimental, la velocidad lineal de la solución que atraviesa la columna se seleccionó teniendo en cuenta que este trabajo pretende reproducir a diferentes escalas un proceso semicontinuo de adsorción. Por ello, los experimentos a escala de laboratorio se realizaron con un caudal capaz de proporcionar una velocidad lineal del mismo orden que las empleadas por otros investigadores (Kumar y Bandyopadhyay, 2006; Zulfadhly y otros, 2000; Adak y otros, 2006), los cuales determinaron la eficiencia de algunos sistemas de adsorción en lecho fijo a partir de la aplicación del modelo BDST. Esta velocidad fue fijada en 0,065m/h.

Tal como se mencionó anteriormente, la variable del proceso evaluado fue la altura de lecho (cantidad de lignina), es por ello que las experiencias de cada metal se identificaron con una letra diferente. Para el caso del Níquel, A es el lecho de 0,10m; B es el de 0,15m y C el de 0,20m. Por su parte, para las experiencias de Vanadio se identificó con A al lecho de 0,05m; B al de 0,10m y la experiencia C involucra al

lecho de 0,15m. La diferencia de alturas de lecho entre las experiencias de Ni y de V se deben a que con menores alturas de lecho es posible obtener un comportamiento satisfactorio para el estudio de la adsorción.

En la tabla N°11 se muestran los experimentos realizados para las soluciones de Níquel y Vanadio en el laboratorio, así como los valores de las variables en cada uno de ellos.

Tabla N°11. Experimentos a escala laboratorio.

Metal	Experiencia	Masa de lignina (kg)x10⁻³	Longitud de lecho (m)	Concentración inicial de metal (ppm)	Caudal (L/h)	Velocidad lineal (m/h)
Níquel	Níquel_A	3,82	0,10	20,39	0,6	0,065
	Níquel_B	5,30	0,15	20,48		
	Níquel_C	6,79	0,20	25,50		
Vanadio	Vanadio_A	2,81	0,05	23,24		
	Vanadio_B	5,48	0,10	24,17		
	Vanadio_C	7,80	0,15	24,14		

Es necesario recordar que en una adsorción en lecho fijo, las concentraciones en la fase fluida y en la fase sólida varían con el tiempo y con la posición en el lecho. Al principio, la mayor parte de la transferencia de materia tiene lugar a la entrada del lecho, donde el fluido se pone en contacto con adsorbente fresco, al transcurrir el tiempo, la zona de transferencia de masa se mueve en el lecho. La concentración en la salida durante el inicio del proceso es prácticamente cero y cuando el lecho está saturado y ya no adsorbe más, la concentración a la salida tiende a ser la del fluido inicial; esto proporciona el perfil de concentraciones o curva de ruptura.

Con la finalidad de obtener datos para la construcción de las curvas de ruptura se tiene que la prueba empleada para determinar la concentración de metales en la solución tratada a escala laboratorio, ha sido la adsorción atómica mediante un espectrómetro de plasma acoplado inductivamente y se ha encontrado que para valores próximos a cero usualmente presenta un error experimental que puede ser debido a impurezas en la muestra o en el equipo. A partir de esto, las curvas de ruptura obtenidas para el Níquel se muestran en la figura N°23.

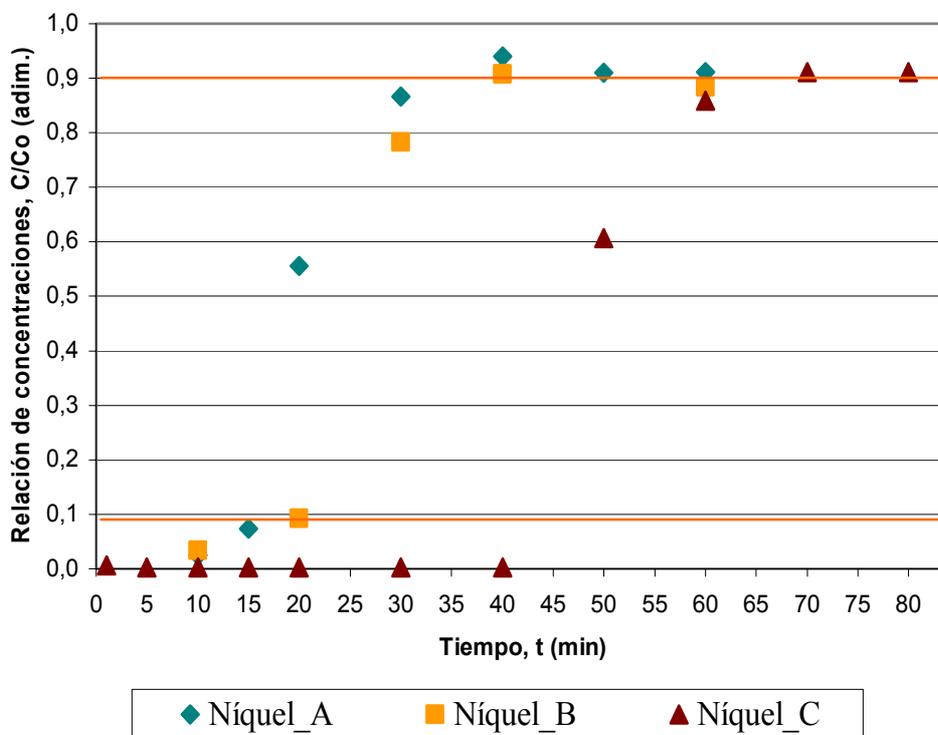


Figura N°23. Curvas de ruptura para el Níquel.

En la figura N°24 se muestra como varía la adsorción de metales en función de la longitud del lecho para experimentos con igual caudal de soluciones de Vanadio.

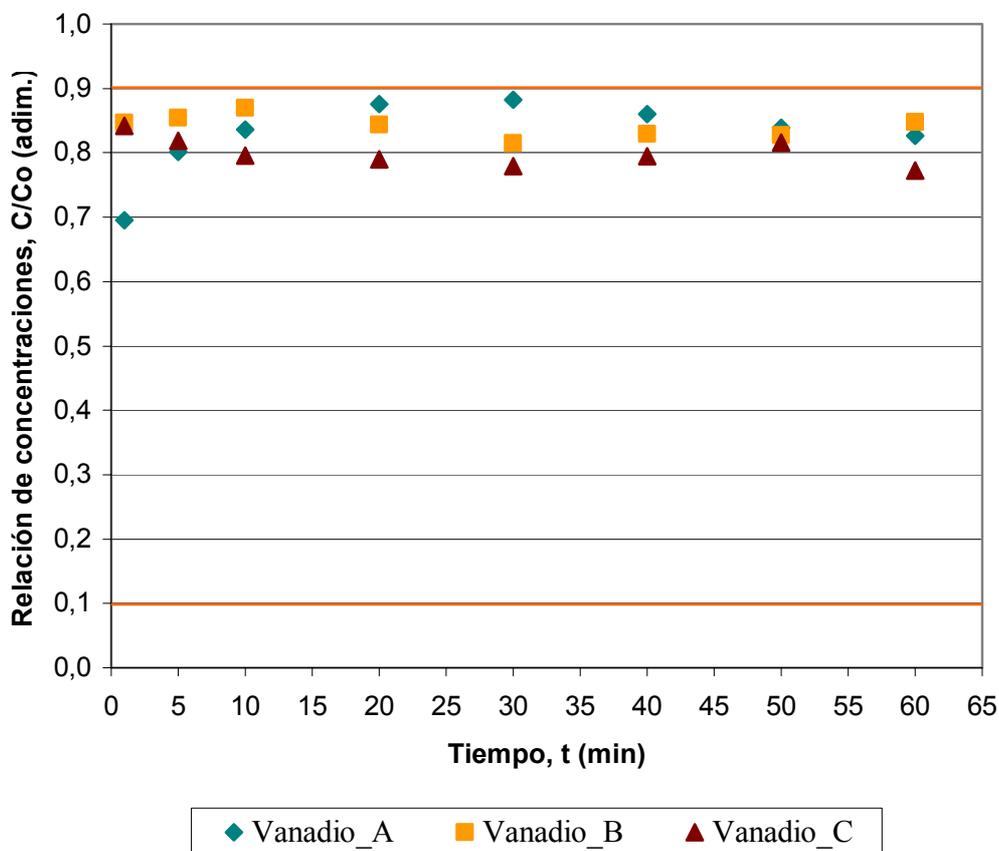


Figura N°24. Curvas de ruptura para el Vanadio.

La diferencia de tiempos finales considerados para la toma de muestras en la construcción de las curvas de ruptura, se debe a que para una menor altura se obtiene información suficiente en un menor periodo de tiempo. Mientras mayor sea la altura de lecho evaluada para las condiciones del sistema estudiado, mayor será el tiempo requerido para obtener información satisfactoria sobre el proceso.

La diferencia entre los tiempos iniciales se debe a que la dilución y el arrastre de lignina ocasiona que algunas muestras tomadas al inicio del proceso de adsorción no cuenten con las condiciones para ser sometidas a una prueba de adsorción atómica, puesto que las partículas de lignina podría descomponer el equipo, es por ello que

durante la experimentación se toman las muestras pero no es posible obtener el contenido de metales en ellas.

En cuanto al tiempo establecido para llevar a cabo la experimentación del proceso de adsorción, se tiene que con aproximadamente 80min es suficiente para apreciar, según los resultados experimentales mostrados en las figuras N°23 y 24, el comportamiento y la tendencia clara de las curvas de ruptura. Al cabo de este tiempo, los lechos estudiados indican que la lignina ha dejado de adsorber y la concentración a la salida de la solución tratada tiende a ser igual a la concentración inicial de la solución, es por ello que la relación C/C_0 es próxima a 1.

Al observar la figura N°23 se aprecia como los resultados obtenidos experimentalmente concuerdan con la tendencia esperada según las bases teóricas para un proceso de adsorción de lecho fijo, ya que la forma de las curvas es sigmoideal lo que demuestra como se agotó la lignina a medida que el tiempo transcurría. Esta figura muestra claramente cuál es la zona de transferencia de masa, así como los puntos de ruptura y agotamiento para cada una de las alturas de lecho, que como se indicó en la sección II.2.6., están representados por 0,1 y 0,9 C/C_0 respectivamente.

Describiendo lo que sucede en la figura N°23, se tiene que al llevarse a cabo el proceso de adsorción más allá del punto de ruptura, la concentración a la salida de las columnas aumentaría de forma brusca hasta aproximadamente 0,8 C/C_0 , esto se debe a que el lecho, al inicio del proceso cuenta con toda la altura disponible para la transferencia de masa; después de esto se acerca más lentamente hasta 1 C/C_0 ya que a medida que transcurre el tiempo, la adsorción se va haciendo menos eficiente porque en el lecho de lignina ya existen zonas que están saturadas.

Al comparar las curvas de rupturas de la figura N°23 se evidencia que los lechos de menor longitud se saturan más rápidamente al compararse con el de mayor altura, tal como era de esperarse, siempre y cuando no exista compactación del lecho. Este

comportamiento del incremento de las cantidades de metal adsorbido para cada lecho se debe al aumento del área de superficie del adsorbente que proporciona mayores sitios de adsorción (Mc Cabe, 1991).

En cuanto a la figura N°24, no se observa un comportamiento claro de los puntos experimentales obtenidos. Los puntos no representan la tendencia esperada de las curvas de ruptura, por lo tanto, para el caso del Vanadio no es posible establecer los puntos de ruptura ni agotamiento. Sin embargo, la información presentada en la figura N°24 permite identificar los puntos de máxima adsorción a las condiciones evaluadas y aunque no se lleva a cabo el proceso de adsorción de forma satisfactoria, los resultados ofrecen información valiosa sobre el comportamiento del Vanadio en un proceso semicontinuo de adsorción.

Por otra parte, una forma más clara de evaluar lo que sucede en los procesos de adsorción en lecho fijo llevados a cabo en el laboratorio es mediante la tabla N°12.

Tabla N°12. Tiempos de ruptura y agotamiento para el Níquel.

Experiencia	Tiempo de ruptura (min)	Tiempo de agotamiento (min)
Níquel_A	15,5	32,0
Níquel_B	20,0	38,0
Níquel_C	42,0	64,5

De la tabla N°12 puede apreciarse que la diferencia entre los tiempos de ruptura de los lechos A y B utilizados para Níquel es de 4,5min, en cambio la diferencia entre B y C es de 22,0. En cuanto a los tiempos de agotamiento se tiene que la diferencia entre los lechos A y B utilizados para Níquel es de 6,0min y entre B y C la diferencia

es de 26,5min; de lo cual se puede decir que la altura de lecho conveniente para realizar el escalamiento es la que proporciona un mayor tiempo de ruptura sin incrementar de forma crítica la cantidad de lignina necesaria para lograrlo.

La altura de lecho seleccionada según los datos de Níquel para realizar el escalamiento es de 0,20m ya que con ésta se tiene un significativo tiempo de ruptura, 2,7 veces más grande al obtenido por el lecho de 0,10m, aun cuando la diferencia de alturas es sólo 2 veces mayor, garantizándose con esta altura un mayor tiempo de actividad del adsorbente.

VII.3. Análisis del escalamiento

Con la finalidad de llevar un proceso de adsorción en lecho fijo de una escala de laboratorio a una escala de planta piloto, tal como se mencionó en capítulos anteriores, se debió aplicar la teoría de la semejanza y el modelo BDST, para ello se requirió de la realización de un análisis previo que permitió evaluar las variables y las limitaciones para la aplicación de estos métodos.

VII.3.1. Aplicación de la teoría de la semejanza

Para la aplicación de la teoría de la semejanza se requirió de la obtención de los módulos adimensionales que caracterizan el proceso de adsorción estudiado. Para ello se aplicó el método presentado en la sección II.2.5.1. el cual está constituido por un procedimiento simple y directo mediante el cual se agrupan variables en números adimensionales. El procedimiento seguido fue el siguiente:

- Se estableció como variable de mayor interés el coeficiente de transferencia de materia (kc) por ser éste el que determina la velocidad del proceso de adsorción.
- Se establecieron el resto de las variables que intervienen en el proceso, tales como: la viscosidad (μ), el diámetro de partícula (Dp), la densidad (ρ), la difusividad en la fase móvil (Dab) y la velocidad del fluido (V). La velocidad del

fluido se expresa como la velocidad másica de desplazamiento del fluido (G) la cual se define como la relación entre el caudal másico (m) y la sección transversal de la columna (S).

- Se expresó la variable de interés como una función potencial de las demás variables y de la constante dimensional (C) correspondiente al sistema de unidades elegido, que se elevaron a los exponentes a determinar, obteniéndose:

$$kc = CDp^{a1} \mu^{a2} \rho^{a3} Dab^{a4} G^{a5} \quad (19)$$

- Al ser elegido como sistema de unidades el Sistema Internacional, y puesto que para este caso se trata de un sistema que puede estudiarse sólo con las dimensiones fundamentales tales son longitud (L), masa (M) y tiempo (t), se obtuvo que las dimensiones de las variables que intervienen en el fenómeno son las presentadas en la tabla N°13.

Tabla N°13. Magnitudes para el análisis dimensional.

Variable	Kc	Dp	μ	ρ	Dab	G
Dimensión	Lt^{-1}	L	$ML^{-1}t^{-1}$	ML^{-3}	L^2T^{-1}	$ML^{-2}t^{-1}$

- Sustituyendo las dimensiones de la tabla N°13 en la ecuación (19) se obtiene:

$$Lt^{-1} = L^{a1} (ML^{-1}t^{-1})^{a2} (ML^{-3})^{a3} (L^2t^{-1})^{a4} (ML^{-2}t^{-1})^{a5} \quad (20)$$

- Se establecieron las ecuaciones de homogeneidad. Se debe cumplir que el exponente al que está elevada cada una de las dimensiones fundamentales en el primer miembro de la ecuación ha de ser igual a la suma de los exponentes a los que se encuentra elevada esa misma dimensión en el segundo miembro de la ecuación. Dando como resultado el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\sum M : 0 = a2 + a3 + a5 \quad (21)$$

$$\sum L : 1 = a1 - a2 - 3a3 + 2a4 - 2a5 \quad (22)$$

$$\sum t : -1 = -a2 - a4 - a5 \quad (23)$$

- Luego se determinó el número de ai que se va a utilizar, para ello se procede de la siguiente manera:

- Siendo n el número de variables a considerar, el número de incógnitas será $n-1$, es decir, el número de incógnitas es 5 para este caso.
- El número de ecuaciones independientes p es igual a 3 (ecuaciones 21, 22 y 23), así es necesario fijar $n-p-1=2$ incógnitas para que el sistema pueda ser resuelto, es decir, se pueden fijar 2 de cualquiera de los 5 exponentes. Para este caso se seleccionaron a_2 y a_5 por ser los exponentes más convenientes para simplificar los cálculos asociados a este procedimiento, obteniéndose:

$$a_1 = -1 + a_5 \quad (24)$$

$$a_3 = -a_2 - a_5 \quad (25)$$

$$a_4 = 1 - a_2 - a_5 \quad (26)$$

- Sustituyendo (24), (25) y (26) en la ecuación (19) se obtiene:

$$kc = CDp^{(-1+a_5)} \mu^{(a_2)} \rho^{(-a_2-a_5)} Dab^{(1-a_2-a_5)} G^{a_5} \quad (27)$$

Al reordenar esta expresión, agrupando las variables se obtuvo la ecuación (28).

$$\left(\frac{kcDp}{Dab} \right) = C \left(\frac{\mu}{\rho Dab} \right)^{a_2} \left(\frac{GDp}{\rho Dab} \right)^{a_5} \quad (28)$$

- Los módulos adimensionales resultantes son el número de Sherwood (Sh), el número de Schmidt (Sc) y el número de Reynolds (Re), donde éste último se obtuvo con la relación de los dos anteriores, tal como se muestra en las ecuaciones (29), (30) y (31).

$$Sh = \left(\frac{kcDp}{Dab} \right) \quad (29)$$

$$Sc = \left(\frac{\mu}{\rho Dab} \right) \quad (30)$$

$$Re = \left(\frac{GDp}{\mu} \right) \quad (31)$$

- En base a los módulos adimensionales obtenidos se aplicó la teoría de la semejanza como se señaló en la sección II.2.5. Para ello se igualaron los módulos correspondientes a los números de Sherwood, Schmidt y Reynolds a la escala

laboratorio y la piloto. Además de esto, se obtienen que como los números de Sherwood y Schmidt contiene sólo propiedades físicas del fluido, éstos serán constantes para sistemas homólogos al estudiado sin importar la escala considerada. Sin embargo, bajo las condiciones del sistema en estudio y manteniendo geometrías semejantes, el criterio de semejanza se reduce a mantener constante el número de Reynolds, aplicándose así el principio de la semejanza mecánica, representado por la ecuación (32).

$$Re' = Re \quad (32)$$

Donde:

Re: número de Reynolds a escala laboratorio (adim.).

Re': número de Reynolds a escala piloto (adim.).

Considerando que el número de Reynolds se define como se muestra en la ecuación (33).

$$Re = \frac{GDp}{\mu} \quad (33)$$

Donde:

G : velocidad másica de desplazamiento ($\text{kg}/\text{m}^2\text{h}$).

Dp : diámetro de partícula (m).

μ : viscosidad (kg/ms).

Aplicando la igualdad de la ecuación (32), se llega a la ecuación (34) al sustituir los números de Reynolds para cada una de las escalas.

$$\left(\frac{G'Dp'}{\mu'} \right) = \left(\frac{GDp}{\mu} \right) \quad (34)$$

Donde:

G : velocidad másica de desplazamiento a escala laboratorio ($\text{kg}/\text{m}^2\text{h}$).

Dp : diámetro de partícula a escala laboratorio (m).

μ : viscosidad a escala laboratorio (kg/ms).

G' : velocidad másica de desplazamiento a escala piloto ($\text{kg}/\text{m}^2\text{h}$).

Dp' : diámetro de partícula a escala piloto (m).

μ' : viscosidad a escala piloto (kg/ms).

De la expresión (34) se puede decir que al comparar el diámetro de partícula y la viscosidad de ambas escalas, éstas permanecen constantes. Por otra parte, como la velocidad másica de desplazamiento depende del flujo másico y del área transversal, aunque la relación entre ellas se mantiene constante, esta relación presenta diferencias para cada escala, por tal motivo se obtuvo la ecuación (35).

$$G' = G \quad (35)$$

Al sustituir las velocidades de desplazamiento por sus respectivas relaciones, se obtuvo la ecuación (36).

$$\frac{m'}{S'} = \frac{m}{S} \quad (36)$$

Donde:

m : flujo másico a escala laboratorio (kg/h).

S : área transversal de la columna a escala laboratorio (m^2).

m' : flujo másico a escala piloto (kg/h).

S' : área transversal de la columna a escala piloto (m^2).

Asumiendo que los parámetros a escala laboratorio se encuentran definidos, con la relación (36) y fijando el flujo másico de la escala piloto, se puede obtener el área de la sección transversal necesaria para la nueva columna.

Para definir completamente las dimensiones del nuevo sistema se requirió la aplicación del principio de semejanza geométrica, que tal como indica Calleja (1999) se define con la relación presentada en la ecuación (37) para un proceso de adsorción.

$$\frac{L'}{D'} = \frac{L}{D} \quad (37)$$

Donde:

L : altura de la columna a escala laboratorio (m).

L' : altura de la columna a escala piloto (m).

D : diámetro interno de la columna a escala laboratorio (m).

D' : diámetro interno de la columna a escala piloto (m).

La semejanza geométrica, además de permitir el escalamiento de las dimensiones de la columna tal como se presentó en la ecuación (37), también permite establecer una relación de semejanza para escalar la longitud de lecho muerto, tal como se presenta en la ecuación (38).

$$\frac{Lm'}{D'} = \frac{Lm}{D} \quad (38)$$

Donde:

Lm : longitud de lecho muerto de la columna a escala laboratorio (m).

Lm' : longitud de lecho muerto de la columna a escala piloto (m).

Una vez establecidas las relaciones aplicables al proceso según la teoría de la semejanza y con los datos del sistema a escala laboratorio es posible obtener los resultados para la escala piloto.

VII.3.2. Resultados de la aplicación de la teoría de la semejanza

Tal como se mencionó en la sección anterior, una vez aplicadas las relaciones correspondientes a la teoría de la semejanza, se obtienen los resultados que permitieron determinar las dimensiones del sistema de adsorción de lecho fijo a una escala mayor que la escala laboratorio. Para esto fue necesario conocer en primer lugar, las dimensiones de los equipos con los que se trabajó a nivel experimental en el laboratorio, así como las propiedades del fluido y las condiciones a las cuales se realizó la experiencia tal como se muestra en la tabla N°14; para luego, exponer los

resultados de las nuevas condiciones que corresponden a una escala piloto, con la finalidad de identificar las nuevas dimensiones del proceso.

Tabla N°14. Variables de diseño para la columna a escala laboratorio.

Propiedad	Valor
Densidad del fluido (kg/L)	0,995
Flujo volumétrico (L/h)	0,6
Flujo másico (kg/h)	0,597
Diámetro interno de la columna (m)	$1,08 \times 10^{-2}$
Altura de lecho (m)	0,2
Masa de lignina (kg)	0,008
Área transversal (m ²)	$9,10 \times 10^{-5}$
Longitud de lecho muerto (m)	0,151

Ya conocidos los valores presentados en la tabla N°14 y mediante la aplicación de la teoría de la semejanza, se pueden establecer las dimensiones de la columna a escala de planta piloto, para esto es de suma importancia tener en cuenta que la misma debe ser capaz de manejar eficientemente la capacidad de 5L/h establecida en el capítulo VI, ya que ésta es la definida como capacidad de diseño y será el valor de caudal que se manejará en el sistema a mayor escala.

Una vez aplicada la teoría de la semejanza con los valores conocidos a partir de la planta a escala laboratorio tal como se presentan en la sección A.2. correspondiente a los anexos, se obtuvo como resultado la tabla N°15, en la cual se muestran las condiciones de operación estimadas de la columna para que el proceso de adsorción se lleve a cabo de forma eficiente.

Tabla N°15. Variables de diseño para la columna a escala piloto.

Propiedad	Valor
Densidad del fluido (kg/L)	0,995
Flujo volumétrico (L/h)	5
Flujo másico (kg/h)	4,979
Diámetro interno de la columna (m)	0,031
Altura de lecho (m)	0,577
Masa de lignina (kg)	0,183
Área transversal (m ²)	0,001
Longitud de lecho muerto (m)	0,419

Al establecer la comparación entre las condiciones reportadas en las tablas N°14 y 15 se observa que el flujo volumétrico a tratar en la planta piloto es de 5L/h tal como se señaló en el capítulo VI, esto quiere decir que el flujo que se espera procesar es 8,33 veces más grande que el tratado a escala laboratorio; en base a esto se calculó el resto de las propiedades y se obtuvo que en cuanto al diámetro interno de la columna se tiene que el de la planta piloto es sólo 2,87 veces mayor al de la escala laboratorio y se obtuvo la misma relación para la altura de lecho.

Cabe destacar que los resultados del escalamiento demuestran que las dimensiones del lecho no aumentan en la misma proporción que lo hace el flujo volumétrico. Sin embargo, según los cálculos realizados éstas nuevas dimensiones estimadas son suficientes para que el proceso se lleve a cabo de forma eficiente.

Por otro lado, la cantidad de adsorbente estimado para la escala de planta piloto si es considerablemente mayor, ésta es 22,87 veces la cantidad requerida por el lecho a escala laboratorio, esto se debe a que el diámetro de partícula de la lignina (10µm)

permanece constante para ambas escalas, por ello se necesita mucha más cantidad de adsorbente para ocupar la nueva altura y diámetro de lecho en el proceso a escala piloto.

A partir de la curva de ruptura de la columna seleccionada como la más adecuada para realizar el escalamiento, fue posible obtener la cantidad de lecho muerto de la columna a escala laboratorio. Con los valores experimentales se obtuvo que para la columna de 0,20m utilizando una solución de Níquel como solución tratada, la altura de lecho muerto estimada es de 0,151m aproximadamente, lo que representa un 75,6% de lecho no utilizado; este valor se debe a que dentro del lecho, el fluido tratado tiende a formar canales preferenciales debido al bajo tamaño de partícula del adsorbente (10 μ m), lo cual se puede mejorar con un buen diseño de la columna de adsorción que disminuya el efecto de canalización.

Considerando la teoría de la semejanza se tiene que el porcentaje de lecho no utilizado de la columna a escala piloto es el mismo que para la escala laboratorio, ya que entre ambas escala existe variación de diámetro y altura de lecho. Al establecer comparación entre las alturas de lecho muerto mostradas en las tablas N°14 y 15 se tiene que la altura de lecho muerto de la escala piloto es 2,88 veces mayor a la estimada para la escala laboratorio.

Todos los valores obtenidos con la aplicación de la teoría de la semejanza proporcionan una información valiosa para el posterior diseño definitivo de los equipos y de la planta piloto de adsorción de metales pesados sobre lignina que es el objetivo principal de este trabajo. De igual manera es preciso conocer las variables asociadas al fenómeno fisicoquímico a partir del estudio de la zona de transferencia de masa, la constante de adsorción, la capacidad de adsorción de la lignina y la altura mínima de lecho necesaria para producir una concentración de salida deseada; mediante la aplicación del modelo BDST.

VII.3.3. Análisis y resultados del modelo BDST

Una vez que se tiene la información experimental necesaria para la aplicación del modelo BDST, es decir, una vez que se conocen las curvas de ruptura, presentadas en la sección VII.2., para el Níquel y para el Vanadio, se procedió a la construcción de las rectas correspondientes, tal como se señaló en la sección II.2.6. Con las rectas BDST es posible obtener la zona de transferencia de masa (MTZ), la constante de adsorción (Ka), la capacidad de adsorción de la lignina (No) y la altura mínima de lecho necesaria para producir una concentración de salida deseada. Todo esto se logra considerando los puntos de ruptura y de agotamiento de cada una de las tres altura de lecho, como se muestra en la figura N°17 para el Níquel.

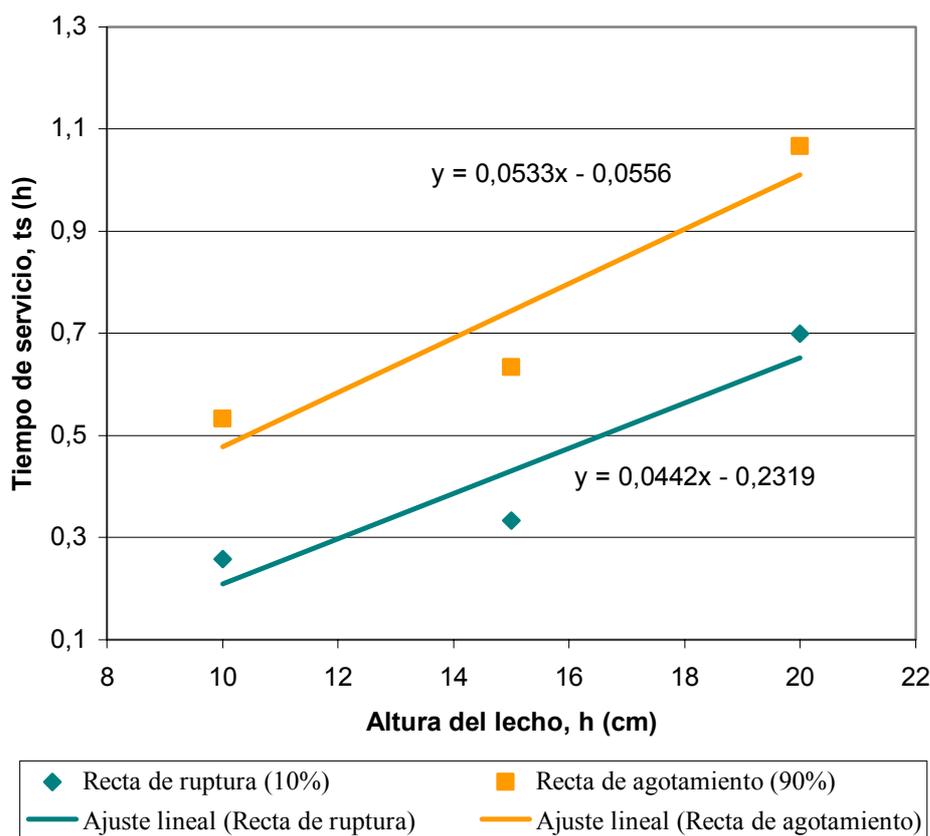


Figura N°25. Rectas BDST para Níquel.

Las rectas BDST para el Vanadio a las condiciones del proceso estudiado no se construyeron puesto que el comportamiento obtenido experimentalmente para las curvas de ruptura no proporciona suficiente información para la aplicación del método BDST.

En cuanto al Níquel, la figura N°25 muestra la relación entre el tiempo de servicio y la altura de lecho que se obtiene graficando para cada una de las columnas los puntos correspondientes a 0,1 y 0,9 de la relación C/Co. Cada conjunto de puntos pueden ser ajustados a una recta, la cual se representa mediante las ecuaciones mostradas en la figura.

Los valores con los cuales se construyeron las rectas BDST de las figuras N°25 provienen de datos experimentales y presentan una variabilidad máxima de 0,9 porque los datos obtenidos fueron considerados representativos del proceso para la aplicación del método BDST, estimándose los correspondientes ajustes a la ecuación de una recta.

Debido a que la zona de adsorción se define como la capa de adsorbente en donde la relación C/Co varía entre 0,1 y 0,9; gráficamente se puede decir que mediante el método BDST, esta distancia se determina como la distancia horizontal entre las dos rectas BDST de cada metal, el resultado de dicho cálculo se muestra en la tabla N°16. Como se observa en la figura N°25, las pendientes de ambas rectas para el Níquel no son iguales, por lo tanto, la distancia considerada como zona de transferencia de masa es la distancia obtenida para un tiempo intermedio, la cual representa una distancia promedio entre las posibles.

De la recta construida para los puntos correspondientes al agotamiento de la adsorción de Níquel, se toman los valores de la pendiente y la intersección que corresponden a los términos a y b respectivamente de la ecuación (3) y (4) obteniéndose los resultados que se muestran en la tabla N°16.

Tabla N°16. Resultados a escala de planta piloto según BDST.

Parámetro	Adsorción de Níquel
Pendiente de la recta de agotamiento, a (h/cm)	0,044
Intersección de la recta de agotamiento, b (h)	0,232
Constante de adsorción, Ka (L/mgh)	0,474
Capacidad de adsorción de la lignina, No (mg /L)	5,79
Altura mínima de lecho, Xo (m)	0,053
Zona de transferencia de masa, MTZ (m)	0,061

Los valores de la constante de adsorción y de la capacidad de adsorción de la lignina mostrados en la tabla N°16 indican que la lignina es un adsorbente eficiente para la remoción de Níquel en las corrientes tratadas, ya que la constante de adsorción evidencia que se requiere poca cantidad de fluido por masa de metal alimentado cada hora para que ocurra la adsorción. Por su parte, la eficiencia de la lignina o capacidad de adsorción de la lignina es aceptable en vista que se adsorben una cantidad considerable de metal por volumen de lignina en el lecho, estas comparaciones se establecen a partir de resultados similares obtenidos para otros sistemas de adsorción a condiciones similares (Kumar y Bandyopadhyay, 2006; Zulfadhly y otros, 2000; Adak y otros, 2006).

En cuanto a la zona de transferencia de masa se tiene que ésta es la longitud del lecho que se encuentra entre la lignina agotada y la lignina virgen, es decir, el valor presentado en la tabla N°16, señala que para un lecho de 0,20m se tiene que sólo 0,061m de sólido pasa de no contener prácticamente nada de adsorbato a estar prácticamente saturado, es decir, esta zona equivale a una longitud que se encuentra a

media saturación y se va trasladando a través de la columna a medida que se lleva a cabo el fenómeno de adsorción de Níquel.

La zona de transferencia de masa obtenida está estrechamente vinculada con factores como el tipo de adsorbente, el tamaño de partícula del adsorbente, la profundidad de lecho adsorbente, la temperatura del adsorbente, la velocidad y temperatura de solución tratada y la concentración de los contaminantes a remover entre otros. Sin embargo, se puede decir que la zona de transferencia de masa estimada para el proceso de adsorción de Níquel mediante la utilización de lignina es similar a valores presentados por la bibliografía en estudios a escala laboratorio (Kumar y Bandyopadhyay, 2006; Zulfadhly y otros, 2000; Adak y otros, 2006).

CAPÍTULO VIII***INGENIERÍA BÁSICA***

Una vez establecidas las bases y criterios de diseño, la capacidad de la planta y la ubicación de la misma, se procedió a desarrollar los productos de la Ingeniería Básica. Este capítulo tiene como objetivo suministrar los documentos capaces de aportar la información necesaria para una posterior etapa de Ingeniería de Detalle con la cual se logrará la construcción de la planta de adsorción de metales pesados sobre lignina a escala piloto. Así mismo, en este capítulo se provee de la información necesaria para estimar los costos de inversión y la factibilidad técnica del proyecto.

Se muestra en primer lugar un diagrama de bloque del proceso, luego los productos de la Ingeniería Básica, es decir, se presenta el diagrama de flujo del proceso, el balance de masa, la descripción del proceso, la descripción del diseño de los equipos, la lista de equipos y tuberías, las hojas de especificaciones de los equipos, la lista de controladores, el diagrama de tuberías e instrumentación y la cuantificación de los requerimientos de servicios industriales.

VIII.1. Diagrama de bloque del proceso

Una vez que se tiene una visualización general del proceso, tal como se encuentra descrito en el capítulo V, se realiza el diagrama de bloque, el cual no es más que una representación primaria, en donde se exponen las corrientes que entran y salen del sistema con sus respectivas cantidades y condiciones más importantes. El diagrama de bloque permite presentar de forma sencilla las etapas que conforman el proceso, así como la secuencia requerida para lograr los objetivos, tal como se muestra en la figura N°26.

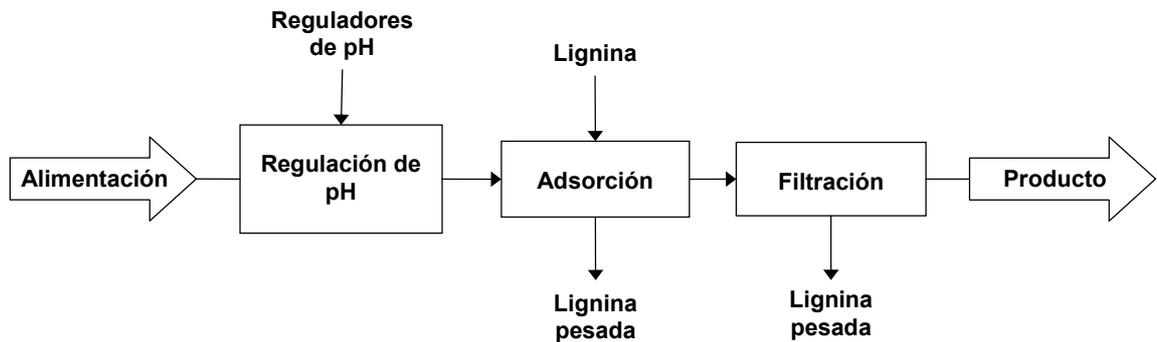


Figura N°26. Diagrama de bloque del proceso.

Cada una de las etapas de la figura N°26 cumplen un objetivo específico e involucran un conjunto de equipos. Por su parte, la etapa de regulación de pH de la materia prima tiene como función ajustar el valor de pH del LIM a las condiciones necesarias para que se lleve a cabo la adsorción de forma eficiente. En cuanto a la etapa de adsorción, se tiene que gracias a ella es posible disminuir la cantidad de metales existentes en la corriente de licor tratada mediante la utilización de lignina como adsorbente. Por último, se tiene la etapa de filtrado, esta se hace con la finalidad de obtener como producto final una corriente con la menor cantidad de partículas en suspensión posible, disminuyendo así la contaminación de la corriente resultante del proceso.

VIII.2. Diagrama de flujo del proceso

Una vez conocidos los equipos involucrados en cada una de las etapas del proceso y definido el balance de masa, se realiza el cálculo de las dimensiones de los equipos. Esta información se presenta de forma resumida mediante el diagrama de flujo de proceso (DFP) el cual muestra a cada equipo involucrado con su respectivo nombre, condición de operación normal y característica principal. Además se muestra el tipo de instrumentación y control requerido según el análisis de las variables de operación que se requieren controlar durante el proceso. El DFP se puede observar en la figura N°27.

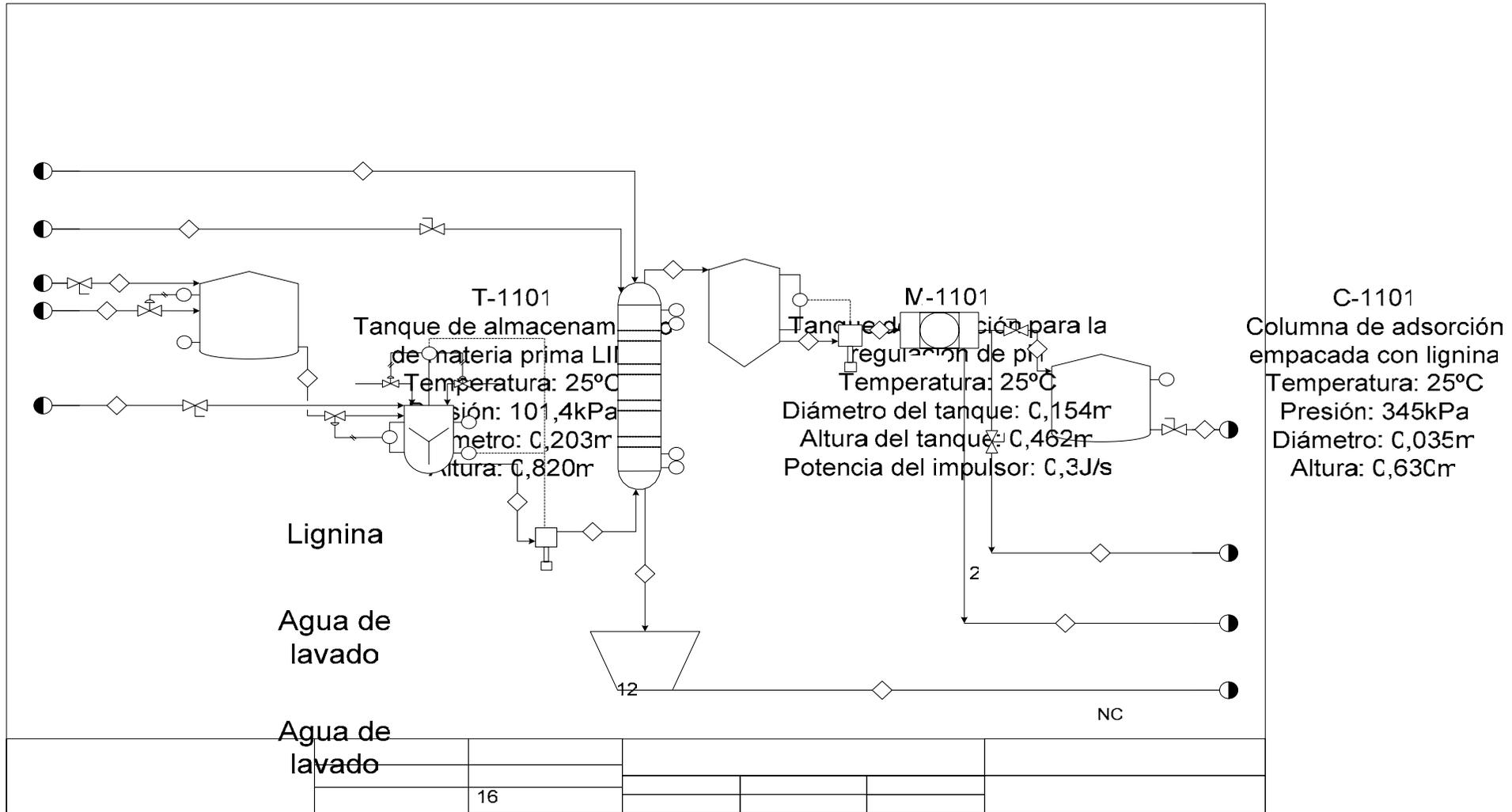


Figura N°27. Diagrama de flujo del proceso.

C-1101

Licor ácido

L

AC

122

T-1101

3

Ácido sulfúricc

Amoníaco

VIII.3. Balance de masa del proceso

El balance de masa realizado para el proceso de adsorción de Níquel y Vanadio sobre lignina a escala piloto muestra los flujos máscicos de todas las corrientes involucradas y los de cada componente, así como las condiciones de presión y temperatura. Para el caso particular de la etapa de regulación de pH de la materia prima, el balance de masa se muestra en la tabla N°17.

Tabla N°17. Balance de masa para la regulación de pH de la materia prima del proceso.

Corriente	1	2	3	4
Temperatura (C°)	25	25	25	25
Presión (kPa)	101,4	101,4	101,4	137,9
Fracción de vapor	0	0	0	0
Flujo total (kg/h)	4,970	$8,59 \times 10^{-1}$	4,970	4,970
Flujo de los componentes (kg/h)				
Vanadio	$1,00 \times 10^{-4}$	0,00	$1,00 \times 10^{-4}$	$1,00 \times 10^{-4}$
Níquel	$1,13 \times 10^{-5}$	0,00	$1,13 \times 10^{-5}$	$1,13 \times 10^{-5}$
Ácido clorhídrico	$8,81 \times 10^{-2}$	0,00	$8,81 \times 10^{-2}$	$8,81 \times 10^{-2}$
Agua	4,88	0,00	4,88	4,88
Lignina	0,00	$8,59 \times 10^{-1}$	0,00	0,00

En la tabla N°18 se muestra el balance de masa para la etapa de adsorción y filtración del proceso, indicándose claramente los respectivos flujos con sus condiciones de presión y temperatura.

Tabla N°18. Balance de masa para la adsorción y filtración del proceso.

Corriente	5	6	7	8	9
Temperatura (C°)	25	25	25	25	25
Presión (kPa)	413,7	137,9	137,9	344,7	101,4
Fracción de vapor	0	0	0	0	0
Flujo total (kg/h)	4,970	4,973	4,973	4,973	4,970
Flujo de los componentes (kg/h)					
Vanadio	$1,00 \times 10^{-4}$	$8,00 \times 10^{-5}$	$8,00 \times 10^{-5}$	$8,00 \times 10^{-5}$	$8,00 \times 10^{-5}$
Níquel	$1,13 \times 10^{-5}$	$3,37 \times 10^{-7}$	$3,37 \times 10^{-7}$	$3,37 \times 10^{-7}$	$3,37 \times 10^{-7}$
Ácido clorhídrico	$8,81 \times 10^{-2}$				
Agua	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88
Lignina	0,00	$3,00 \times 10^{-3}$	$3,00 \times 10^{-3}$	$3,00 \times 10^{-3}$	0,00

Continuando con el balance de masa del proceso, en la tabla N°19 se presentan las corrientes referentes a la salida del licor limpio desde el tanque de almacenamiento, el desalajo de la lignina y el lavado de la columna de adsorción con sus respectivos flujos y condiciones de presión y temperatura.

Tabla N°19. Balance de masa para el desalajo de licor limpio, lignina pesada y lavado de la columna de adsorción.

Corriente	10	11	12	13	14
Temperatura (C°)	25	25	25	25	25
Presión (kPa)	101,4	101,4	413,7	101,4	101,4
Fracción de vapor	0	0	0	0	0
Flujo total (kg/h)	4,970	0,003	0,628	0,859	0,859
Flujo de los componentes (kg/h)					
Vanadio	$8,00 \times 10^{-5}$	0,00	0,00	$2,00 \times 10^{-5}$	$2,00 \times 10^{-5}$
Níquel	$3,37 \times 10^{-7}$	0,00	0,00	$1,09 \times 10^{-5}$	$1,09 \times 10^{-5}$
Ácido clorhídrico	$8,81 \times 10^{-2}$	0,00	0,00	0,00	0,00
Agua	4,88	0,00	$6,28 \times 10^{-1}$	$6,28 \times 10^{-1}$	$6,28 \times 10^{-1}$
Lignina	0,00	$3,00 \times 10^{-3}$	0,00	$2,31 \times 10^{-1}$	$2,31 \times 10^{-1}$

Por último, en la tabla N°20 se muestra el balance de masa para el lavado general y parcial del sistema de adsorción, indicándose claramente los respectivos flujos con sus condiciones de presión y temperatura.

Tabla N°20. Balance de masa para el lavado general y parcial del sistema.

Corriente	15	16	17
Temperatura (C°)	25	25	25
Presión (kPa)	101,4	101,4	101,4
Fracción de vapor	0	0	0
Flujo total (kg/h)	7,500	15,000	22,500
Flujo de los componentes (kg/h)			
Vanadio	0,00	0,00	0,00
Níquel	0,00	0,00	0,00
Ácido clorhídrico	0,00	0,00	0,00
Agua	7,50	15,00	22,50
Lignina	0,00	0,00	0,00

VIII.4. Descripción del proceso

En esta sección se describe de forma detallada el proceso a llevarse a cabo para alcanzar las especificaciones de los productos finales en la planta de adsorción de metales pesados sobre lignina a escala piloto; para ello se consideran algunos documentos de Ingeniería por ser de gran utilidad, tal como el diagrama de bloque mostrado en la figura N°26 que representa las etapas del proceso; además, se consideran los equipos involucrados en éstas, cuyos nombres se presentan en el diagrama de flujo del proceso (figura N°27).

Básicamente, el proceso a llevar a cabo en la planta piloto de adsorción de metales pesados sobre lignina cuenta con tres etapas enlazadas de forma cíclica. Por una parte, se tiene la correspondiente a la adsorción de metales pesados, mediante la cual

se disminuye la concentración de éstos en una corriente de LIM; al culminar la adsorción, en el interior de la columna queda retenida la lignina pesada, por ello se continua con la etapa correspondiente al desalojo de la lignina pesada ya saturada. Al finalizar el desalojo de la lignina pesada, se procede a una etapa de lavado mediante la cual se eliminan residuos que podrían afectar los resultados de la siguiente etapa de adsorción de metales.

VIII.4.1. Etapa de adsorción de la planta piloto

La planta, tal como se observó anteriormente en el diagrama de bloque (figura N°26), está conformada por tres etapas en cuanto a la adsorción, éstas son:

- Regulación de pH de la materia prima.
- Adsorción.
- Filtración.

Antes de llevarse a cabo cada una de estas tres etapas se debe agregar la lignina en el interior de la columna C-1101, este procedimiento se realiza manualmente y se logra al separar el tope de la columna del resto del equipo; esto se consigue al extraer de la periferia de la columna un conjunto de tornillos de seguridad que permiten dejar el tope libre para agregar la cantidad de lignina necesaria para el proceso. Una vez que este procedimiento se ha realizado, se conecta nuevamente el tope de la columna con el resto del equipo asegurándose mediante los tornillos de seguridad.

A continuación se describen con mayor detalle cada una de estas etapas.

VIII.4.1.1. Regulación de pH de la materia prima

La etapa de regulación de pH tiene como objetivo ajustar las condiciones de la corriente de alimentación a la columna de adsorción; es decir, en esta etapa se regula el valor de pH a un valor adecuado para la siguiente etapa. La regulación de pH de la

materia prima involucra el tanque de almacenamiento T-1101, un tanque de agitación M-1101 y el sistema de bombeo P-1101A/B.

El tratamiento que recibe la corriente de proceso comienza en el T-1101, éste se encarga de contener en su interior la materia prima (LIM) proveniente de un proceso aguas arriba. El tanque T-1101 se desaloja por gravedad a través de una boquilla ubicada en el fondo del tanque y conectada al tanque de agitación M-1101 por medio de una tubería que lo alimenta por el tope. Entre el tanque T-1101 y el M-1101 se tiene conectada una válvula que se cerrará una vez que en el M-1101 se alcance la altura máxima, es decir, una vez que se alcance la altura necesaria para llevar a cabo el proceso de adsorción.

En el tanque de agitación M-1101 se mide el pH de la solución proveniente del tanque T-1101 con un medidor de pH instalado. Éste determinará el grado de acidez de la solución, que debe ser de aproximadamente 4. El valor de pH requerido se establece por ser el óptimo para que se lleve a cabo el fenómeno de adsorción tal como lo proponen Pérez⁽²⁾ y otros (2006).

Si en el M-1101, el pH de la solución es mayor a 4 se agrega en su interior una solución ácida, específicamente ácido sulfúrico (al 30% p/p); pero en caso de ser menor a 4, se agrega una solución básica que será amoníaco (al 25% p/p); este procedimiento se realiza automáticamente por la acción de un lazo de control. Una vez puestas en contacto alguna de las soluciones reguladoras con el interior del M-1101, se agregará la cantidad que sea necesaria para obtener el valor de pH adecuado, esto se hará de forma simultánea con la agitación para homogenizar la solución mientras se realiza la lectura del pH de la solución.

Una vez regulado el pH de la solución (LIM), el sistema de bombeo P-1101 se encarga de impulsar el LIM desde el fondo del M-1101 hasta el fondo de la torre de

adsorción C-1101, además, este sistema de bombeo ofrece toda la energía cinética requerida para que el fluido sea tratado por la siguiente etapa del proceso.

VIII.4.1.2. Adsorción de metales

Esta es la etapa más importante del proceso ya que aquí ocurre la adsorción de los metales pesados (Níquel y Vanadio) presentes en el LIM y se lleva a cabo mediante la utilización de lignina como adsorbente. La etapa de adsorción involucra el equipo más importante del proceso: la torre o columna de adsorción C-1101, que se caracteriza por ser de lecho fijo. Además, la etapa comprende el sistema de bombeo P-1101 y el tanque estabilizador T-1102.

La adsorción se lleva a cabo cuando el fluido proveniente de la etapa de regulación de pH es alimentado por el extremo inferior de la columna de adsorción C-1101, la cual está rellena con lignina, que es el adsorbente empleado. Mientras el fluido tratado recorre toda la columna manteniéndose en contacto directo con la lignina, los metales son adsorbidos por ella y una vez que el LIM atraviesa toda la columna sale por el extremo superior de la misma y se dice que este licor resultante es un licor limpio, ya que en la C-1101 se remueve el 97% p/p del Níquel y el 20% p/p del Vanadio contenido en la corriente alimentada.

Luego de procesada la corriente de LIM por la C-1101, el licor limpio cae al tanque T-1102 el cual tiene la función de almacenar este fluido resultante hasta un 80% de su capacidad. Mientras el nivel de líquido en el interior del tanque aumenta, se van precipitando partículas de adsorbentes arrastradas por la corriente de proceso, es por ello que se dice que este tanque es estabilizador.

VIII.4.1.3. Filtración de impurezas

El filtrado es la última etapa del proceso de adsorción de metales pesados sobre lignina a escala piloto, se realiza con la finalidad de obtener un producto final en mejores condiciones, ya que el licor limpio que se encuentra en el tanque T-1102 puede contener algunas partículas sólidas de adsorbente u otro tipo de impurezas disueltas. La etapa cuenta con el sistema de bombeo P-1102, un filtro F-1101 y un tanque de almacenamiento T-1103.

El sistema de bombeo P-1102 se encarga de impulsar el contenido del tanque de estabilización T-1102 con la energía cinética suficiente como para que la corriente esté en la capacidad de atravesar el F-1101, el cual está conectado en línea con la tubería y posee un medio poroso capaz de retirar las partículas sólidas disueltas en el licor limpio, obteniendo así un producto con la mínima cantidad de impurezas y como consecuencia se disminuye la posibilidad de error en los resultados por muestreo del licor producido durante el proceso. La importancia de esta planta se debe, a que tal como se mencionó anteriormente, la planta se pondrán en funcionamiento exclusivamente para fines investigativos.

Para finalizar el tratamiento de la corriente de proceso, se tiene que el producto resultante del filtro en línea F-1101 es alimentado al tanque de almacenamiento T-1103. Éste contendrá el licor limpio libre de partículas sólidas para un posterior análisis químico o para una recirculación al proceso aguas arriba de la adsorción (Digestión Acida Vía Microondas).

Una vez obtenido el licor limpio como producto de la planta, es necesario extraer la lignina pesada retenida en el interior de la columna de adsorción. El procedimiento a seguir se describe a continuación.

VIII.4.2. Desalojo de la lignina pesada de la planta piloto

De la planta de adsorción de metales pesados sobre lignina, además de obtener como producto el licor limpio, se obtiene lignina pesada que es el resultado de la adsorción una vez que ha finalizado cada corrida del proceso y se agota por retener sobre su superficie la mayor cantidad de metales posibles. Por lo tanto, esta etapa tiene como objetivo desalojar la lignina pesada retenida en el interior de la columna de adsorción C-1101 y para ello cuenta con la tolva B-1101.

Durante la etapa de adsorción, la corriente de proceso atraviesa la columna C-1101 desde el fondo al tope de la misma, una vez que ha finalizado la corrida, es decir, una vez que se ha alcanzado la capacidad de la planta y se ha consumido el volumen existente inicialmente en el M-1101, la lignina que contiene el interior de la columna C-1101 es una lignina pesada ya saturada. En vista de que éste es un producto de la planta y además deja de ser útil para una posterior adsorción, se procede a su desalojo.

Para desalojar la lignina pesada del interior de la columna se debe separar el fondo de la C-1101 del resto de la columna, para ello se cuenta con un sistema de seguridad basado en un conjunto de tornillos, los cuales se extraen quedando libre el fondo de la columna para que caiga a la tolva B-1101 la lignina pesada de su interior, esto se logra con la ayuda de una corriente de agua de lavado que es alimentada a la columna por el tope mediante una tubería que cuenta con una válvula de paso manual. El interior de la tolva B-1101 se desocupa manualmente.

Al finalizar el desalojo de la lignina pesada de la columna, de deben conectar nuevamente los tornillos de seguridad de la C-1101 uniendo así nuevamente el fondo de ésta con el resto del equipo, una vez que se ha acoplado nuevamente el sistema, se procede a la etapa de lavado.

VIII.4.3. Lavado de la planta piloto

La etapa de lavado del sistema no es más que un procedimiento mediante el cual se logra arrastrar, con agua de lavado, residuos del proceso de adsorción al hacer pasar a través del sistema una corriente de agua que desplaza el fluido de proceso retenido en algún punto del mismo. Esto se hace con la finalidad de disminuir la posibilidad de que el fluido de proceso utilizado contamine la corriente de una posterior etapa de adsorción.

Dependiendo de las necesidades de la planta, el lavado del sistema puede realizarse de forma parcial o general. En el lavado parcial se involucran todos los equipos de la planta menos los tanque T-1101 y T-1103, considerándose un procedimiento habitual porque se realizaría al finalizar cada proceso de adsorción. En cuanto al lavado general, éste se lleva a cabo en caso de requerir el lavado de todos los equipos de la planta menos el del tanque T-1103, esta modalidad se realizará al hacer un cambio de materia prima.

Para cumplir con el lavado parcial de la planta piloto se debe cerrar la válvula que se encuentra entre el filtro F-1101 y el tanque T-1103 y abrir la válvula que da paso hacia el drenaje cerrado, luego se abre la válvula que da paso al agua de lavado hacia el M-1101. A partir de este equipo comienza el proceso de lavado. El agua atraviesa todos los equipos correspondientes a la etapa de adsorción desde el M-1101 hasta el F-1101, ya que la salida de este equipo no alimenta al T-1103 sino que pasa hacia el drenaje cerrado, arrastrándose así los residuos fuera del sistema.

En caso de ser necesario el lavado general de la planta, se debe cerrar la válvula que se encuentra entre el filtro F-1101 y el tanque T-1103 y abrir la válvula que da paso hacia el drenaje cerrado, luego se abre la válvula que da paso al agua de lavado hacia el T-1101. El agua atraviesa todos los equipos correspondientes a la etapa de

adsorción desde el T-1101 hasta el F-1101 enviando la corriente producida al drenaje cerrado, arrastrándose así los residuos fuera del sistema.

Con la etapa de lavado finaliza el proceso de adsorción de metales pesados sobre lignina, ya que después de esto, el sistema está preparado para comenzar de nuevo a procesar una nueva solución de LIM o una nueva materia prima, dependiendo del caso.

Además de considerar cada una de las descripciones presentadas para el proceso, es necesario a la hora de poner en marcha la planta, tomar en cuenta las medidas de seguridad presentadas en los anexos A.1. correspondientes al manejo de los reactivos, ya que la forma de manipular la materia prima y los reactivos de la planta influyen significativamente en los resultados y en el funcionamiento satisfactorio de la planta diseñada. En cuanto a las medidas de seguridad para el funcionamiento de la planta, no son distintas a las normalmente consideradas para trabajar en los laboratorios de la Universidad Simón Bolívar, puesto que la operación se realiza a presiones cercanas a 101,4kPa y a 27°C de temperatura.

VIII.5. Descripción del diseño de los equipos

En esta sección se explican los procedimientos empleados para el diseño de los equipos requeridos en la planta de adsorción de metales pesados sobre lignina a escala piloto; además, se presentan algunas consideraciones a tomar en cuenta para cada uno de los equipos involucrados. Los cálculos rigurosos pertinentes para el diseño de los equipos son mostrados en el anexo A.3. correspondiente a los cálculos tipos de los equipos.

VIII.5.1. Tuberías

Los fluidos se transportan generalmente por el interior de tuberías de sección circular que existen en una amplia variedad de tamaño, espesor de pared y materiales de construcción. El tamaño óptimo de tubería, para un caso determinado depende de los costos relativos de instalación, de la potencia, mantenimiento de las tuberías y accesorios de repuesto (McCabe, 1991).

Para la selección de las tuberías, en primer lugar se debe elegir el tipo de material de construcción, en base a esto se debe considerar que el fluido más desfavorable que circulará por las tuberías de la planta es el LIM, que es un ácido y además contiene metales pesados (Ni y V), lo cual lo hace corrosivo.

El material seleccionado para las tuberías de la planta es el acero inoxidable 316 (SS 316) que se caracteriza por ser una aleación de Acero, Cromo y Níquel. El acero inoxidable es un material que cumple con los rangos de temperatura, presión y diámetros necesarios en procesos químicos y otras aplicaciones industriales, ofrece durabilidad, bajo peso en comparación con el acero al carbono, resistencia al fuego, capacidad de soportar golpes y una excepcional resistencia a la corrosión; además, no contamina el líquido al contacto.

Por todo esto, se evidencia una clara ventaja económica al valorar la vida útil de la estructura, con una reducción de costos de mantenimiento muy importante y una reducción del impacto ambiental, a pesar de su alto costo de inversión. Estos son los motivos que fundamentan la selección y uso de este material para las tuberías de la planta.

Las tuberías serán de cédula 40, ya que proporcionar el espesor necesario para soportar las presiones no muy elevadas del fluido de proceso (413,7kPa como máximo) y mantener una vida útil adecuada. El diámetro seleccionado de la tubería

debe lograr que la velocidad y la caída de presión del fluido que circula a través de ella se encuentren dentro del rango recomendado. Sin embargo, en condiciones especiales, pueden requerirse velocidades que están fuera de los intervalos propuestos.

La planta piloto diseñada se caracteriza por no cumplir con el rango de velocidad lineal establecido como criterio, esto se debe a que maneja flujos menores a los estudiados por la bibliografía recomendada (Walas, 1990). A pesar de esto, se puede garantizar un adecuado funcionamiento del flujo del fluido a través de las tuberías diseñadas ya que a la escala laboratorio se evidencia el correcto funcionamiento del sistema y además, las tuberías seleccionada proporciona una caída de presión adecuada.

Al aplicar los criterios mostrados en la sección V.3.1. del capítulo de visualización del proceso se tiene que el modelo de cálculo para las tuberías es el siguiente:

1. Seleccionar un diámetro comercial y fijar el diámetro interno de la tubería.
2. Con el valor del diámetro interno, determinar el área de flujo.
3. Determinar la velocidad lineal.
4. Calcular el número de Reynolds y el factor de Darcy.
5. Determinar la caída de presión.
6. Finalmente, verificar si los valores de velocidad lineal y caída de presión se encuentran en los rangos establecidos, de no ser así, se selecciona otro diámetro comercial mayor al seleccionado inicialmente.

Con este procedimiento de cálculo se logran diseñar todas las tuberías del la planta de adsorción de metales pesados sobre lignina.

VIII.5.2. Bombas

La planta de adsorción diseñada requiere de dos sistemas de bombeo para impulsar el fluido de proceso (P-1101 y P-1102). El sistema de bombeo P-1101 se encarga de impulsar el fluido que se alimenta a la columna de adsorción, proporcionándole la energía cinética necesaria para atravesar el lecho de lignina y vencer la caída de presión. De la misma forma actúa el sistema P-1102, pero éste se encarga de alimentar al filtro con la solución resultante de la adsorción, la cual contiene partículas de lignina en suspensión.

Estos equipos únicamente fueron especificados ya que al ser diseñados se estaría limitando de forma considerable la adquisición de los mismos y se incrementarían los costos de inversión en caso de requerir su construcción. Por tal motivo, sólo se establecen las condiciones que deben cumplir y en base a esa información se realiza la comparación con lo que ofrece el mercado, seleccionando así la que mejor se ajuste a los requerimientos de la planta.

Con la finalidad de seleccionar la bomba, entre las opciones que ofrece el mercado, se deben tomar en cuenta lo siguiente:

1. Deben trabajar a temperatura ambiente, esto disminuye la posibilidad de fallas del equipo por manejar flujos a temperaturas extremas.
2. El fluido no transporta partículas para la P-1101 pero para la P-1102 la solución contiene partículas disueltas de 10 μ m de diámetro.
3. Se requiere de precisión en cuanto a la salida del fluido.
4. Deben trabajar con viscosidades de aproximadamente 0,9cP.
5. Deben trabajar con un caudal de 5L/h (capacidad de la planta).
6. Deben ser capaces de poder funcionar con una desviación del 50% de su capacidad para garantizar la flexibilidad de la planta cuando se desee manipular el flujo, este punto solamente puede ser llevado a cabo satisfactoriamente por las bombas de diafragma o las de pistón, las cuales

pueden ser ajustadas antes de iniciar el proceso para operar a un caudal requerido (preestablecido).

7. Deben proporcionar un aumento de presión en condiciones normales de por lo menos 50psi para dar flexibilidad a la planta.

Considerando los puntos anteriormente mencionados y que la plata piloto diseñada es con fines investigativos; se tiene que es recomendable que el tipo de bomba a utilizar en la planta sean de diafragma o pistón. Las bombas de diafragma se caracterizan por impulsar el fluido a través de pulsaciones de uno o dos diafragmas flexibles que desplazan el líquido en la dirección del flujo. Entre este tipo de bomba, se seleccionó la de cabezal simple porque la estructura y la forma de operación incrementan el tiempo de vida del diafragma, protegen al equipo de la sobrecarga y del recalentamiento. Asimismo, protegen la estructura del motor siempre y cuando se encuentre permanentemente lubricado.

VIII.5.3. Tanques de almacenamiento

Para la planta de adsorción diseñada se requiere únicamente de tres tanques de almacenamiento, estos son T-1101, T-1102 y T-1103 los cuales son empleados para contener la materia prima requerida por el proceso, la corriente de licor obtenida por la torre de adsorción y el licor resultante de la planta, respectivamente.

Para el diseño se consideraron los criterios presentados en la sección V.3.3. del capítulo de visualización del proceso y el procedimiento es el siguiente:

1. Calcular la capacidad del recipiente.
2. Establecer una relación Largo/Diámetro según los criterios de diseño.
3. Calcular el diámetro mínimo del tanque.
4. Ajustar el diámetro mínimo al siguiente diámetro comercial mayor.
5. Calcular la altura mínima del tanque considerando la capacidad del recipiente y el diámetro comercial.

6. Ajustar la altura mínima a la siguiente altura mayor reproducible.
7. Calcular la relación Largo/Diámetro comercial.
8. Verificar la relación Largo/Diámetro comercial con el rango permitido (sobre todo cuando se establecen los extremos del rango), si está dentro del rango ir al punto 8.2 en caso contrario ir al 8.3.
 - 8.2. Calcular la capacidad comercial del tanque.
 - 8.3. Establecer una nueva relación Largo/Diámetro y regresar al paso 3.
9. Establecer la capacidad comercial como la capacidad del recipiente.
10. Finalmente, determinar la altura de la base sobre la que se apoyará el equipo, para ello se considera la forma geométrica del fondo y 0,10m de exceso.

Particularmente, para los tanques de almacenamiento requeridos por la planta piloto diseñada no se necesitan de accesorios, por lo tanto no se requiere la consideración de ellos durante el diseño de los mismos.

Para el diseño de los tanques de almacenamiento, además de considerar los criterios, es necesario conocer ciertas características convenientes para este tipo de equipos. Por una parte, el equipo debe estar en la capacidad de permitir un drenaje libre y completo; igualmente, se debe evitar la existencia de hendiduras o soldaduras en puntos propensos a la acumulación de sedimentos, todo esto con la finalidad de mejorar la resistencia a la corrosión. Asimismo, es conveniente considerar tanques con fondos cóncavos soportados en la base ya que estos son superiores a los tanques con fondos planos, no sólo desde el punto de vista de la resistencia a la corrosión, sino también a la fatiga (Walas, 1990), la selección del fondo depende de la aplicación del tanque.

Particularmente, se tiene que para los tanques T-1101 y T-1103 se consideran fondos semiesféricos por favorecer el almacenaje de sustancia corrosiva, estos tanques cuentan con una boquilla de alimentación ubicada en el tope y una de descarga en el fondo. En cuanto al tanque T-1102 el fondo es cónico debido a que se considera

como un tanque estabilizador y este tipo de fondo favorece la disposición en el fondo de partículas sólidas que precipitan durante el proceso. Además, estos equipos de almacenamiento cuentan con un sistema de drenaje y en el caso de T-1101 tiene una boquilla para alimentar agua de lavado.

En cuanto a la relación Largo/Diámetro a establecer para cada uno de los equipos, tal como señalan los criterios de diseño, se debe considerar que la impulsión y convección del fluido dependen de la geometría del tanque (Walas, 1990), mientras menor sea la relación entre el largo y el diámetro, mayor será el fenómeno de impulsión pero por el contrario mientras mayor sea la relación entre el largo y el diámetro, más agua trabajará en la modalidad de convección, la elección de la relación depende de las necesidades del sistema según el tanque diseñado.

Los tanques de almacenamiento necesarios para la planta de adsorción de metales pesados sobre lignina contendrán en su interior básicamente una solución de ácido clorhídrico con Níquel o Vanadio disuelto en menor o mayor cantidad, por tal motivo es recomendable la existencia de una tapa en el tope de estos equipos para minimizar la contaminación de la solución almacenada y al mismo tiempo evitar la contaminación del medio ambiente por los vapores generados, debido a esto, los equipos de almacenamiento cuentan con una válvula de venteo y una de seguridad que se encargan de regular la presión en el interior del equipo.

En cuanto al sobrediseño, además de ser establecido a partir de las necesidades de los equipos aguas abajo, también se tomó en cuenta el desplazamiento oscilatorio de la solución almacenada, para mitigar este tipo de daño se proporciona una mayor altura entre el nivel de agua y el borde del tanque. A parte de la capacidad establecida a partir del sobrediseño se tiene que la capacidad real del equipo es mayor, esto se debe a la relación Largo/Diámetro comercial, que para el caso de la plata diseñada se establece a partir de las dimensiones disponibles para el acero inoxidable 316.

Por otra parte, el acero inoxidable 316 ofrece durabilidad, bajo peso en comparación con el acero al carbono, resistencia al fuego, capacidad de soportar golpes y una excepcional resistencia a la corrosión; además, no contamina el líquido el contacto con él. Al tomar en cuenta estas consideraciones es posible diseñar los tanques de almacenamiento T-1101, T-1102 y T-1103 requeridos por el proceso.

VIII.5.4. Tanque de agitación

La planta a escala piloto de adsorción de metales pesados sobre lignina requiere de un tanque de agitación M-1101 el cual forma parte de la etapa de regulación de pH.

Generalmente, los líquidos se agitan en un recipiente cilíndrico que puede estar cerrado o abierto. La altura del líquido debe equivaler en forma aproximada al diámetro del tanque y un motor eléctrico impulsa al agitador, que se encuentra montado en un eje (Geankoplis, 1998).

Los fluidos contenidos en el M-1101 involucran principalmente LIM, al cual se le medirá el pH a través de un sistema de control que se explicará más adelante en la sección VIII.8. Dependiendo de la medida de pH, se agregará en el interior del equipo una solución básica o ácida con la finalidad de regularlo a un valor deseado, una vez puestas éstas en contacto con el LIM se deben mezclar hasta obtener el valor de pH adecuado en una solución homogénea.

Para el diseño de este equipo, que en principio cuenta con un tanque, se aplicaron los mismos criterios empleados para el diseño de los tanques T-1101, T-1102 y T-1103, al igual que el procedimiento para calcular las dimensiones de los mismos, mostrado en la sección VIII.5.3. Además, se deben considerar los criterios de diseño mostrados en la sección V.3.4. del capítulo de visualización del proceso, así como los siguientes datos:

1. Diámetro interno del tanque, éste se determina para una cantidad almacenada por ciclo y con un 30% de exceso o sobrediseño, y una relación Largo/Diámetro entre 3 y 5 (Walas, 1990).
2. Las propiedades físicas del fluido tales como la densidad y la viscosidad del LIM.
3. La potencia que es un factor importante en el diseño de un recipiente de agitación ya que es la potencia necesaria para mover el impulsor. La potencia se definió en un rango de 0,2 y 0,5 J/s (Walas, 1990).

Por las características del proceso se escogió un agitador tipo turbina con aspas planas, ya que es el agitador más usado en las industrias de proceso, y para diseñar un sistema de agitación ordinario, generalmente se usa este tipo de agitador. Además, se utilizan para procesar líquidos con amplia diversidad de viscosidades.

Por otro lado, para lograr una agitación vigorosa con este agitador vertical, se acostumbra la utilización de deflectores para reducir el tamaño del remolino y mejorar así la eficiencia del mezclado. Walas (1998), señala que un método sencillo y eficaz de destruir estos remolinos, se consigue instalando placas verticales perpendiculares a la pared del tanque. Los agitadores tipo turbinas de placas planas producen un buen flujo radial en el plano del rodete, dividiendo el flujo hacia la pared para formar dos modelos distintos de circulación, la acción radial produce algún movimiento axial por causa de los deflectores en las paredes del tanque. Los deflectores contribuyen a la turbulencia previniendo remolinos y la eliminación de vórtices.

El procedimiento de cálculo empleado fue el siguiente:

1. Calcular el diámetro del impulsor, que se establece como 30% del diámetro interno del tanque (Geankoplis, 1998).

2. Calcular el número de Reynolds, que depende de la velocidad del impulsor y queda expresado en función de ésta.
3. Con la potencia seleccionada, calcular el número de potencia que es un factor que al igual que el número de Reynolds, queda expresado en función de la velocidad del impulsor.
4. Aplicar el siguiente proceso iterativo para determinar la velocidad del impulsor:
 - 4.1. Suponer una velocidad para el impulsor en un rango recomendado de 400 a 1750 revoluciones por minuto (Geankoplis, 1998).
 - 4.2. Calcular el número de Reynolds para la velocidad supuesta.
 - 4.3. Calcular el número de Potencia, tal como se señala en la sección A.3. de los anexos.
 - 4.4. Con el número de Potencia, calcular el valor de la velocidad del impulsor.
 - 4.5. Finalmente, comparar el valor de la velocidad del impulsor calculado, con el supuesto, si su diferencia es menor a 1 revolución por segundo, entonces debe detener el proceso iterativo ya que ha finalizado. En caso contrario, se supone un nuevo valor de la velocidad del impulsor y se repite el procedimiento.
5. Una vez cerrado el proceso iterativo, verificar que la velocidad del impulsor determinada se encuentre en el rango seleccionado, si es así, ya se tienen calculados los números de Reynolds y de Potencia y si no, se regresa al punto 4.1. suponiendo una velocidad para el impulsor mayor a la inicial.
6. Calcular la amplitud o ancho de los deflectores, que es una doceava parte del diámetro interno del tanque y se suponen dos deflectores ya que se estima que con esta cantidad es suficiente.
7. Determinar la distancia a la cual los deflectores están de las paredes del tanque (Walas, 1990).
8. Finalmente, determinar el tiempo de mezclado con el valor del número de Reynolds tal como se señala en la sección A.3. de los anexos.

Una vez concluido con el procedimiento descrito anteriormente, se habrá finalizado con el diseño del tanque de agitación M-1101 de la planta de adsorción de metales pesados sobre lignina a escala piloto.

VIII.5.5. Columna de adsorción

La unidad principal a utilizar en la planta de adsorción de metales pesados sobre lignina a escala piloto es la columna de adsorción C-1101. Ésta se caracteriza por ser una columna de lecho fijo que se alimenta por el extremo inferior y se obtiene la corriente tratada por el extremo superior. El lecho de este equipo está conformado por lignina y el fenómeno se lleva a cabo una vez que se pone en contacto directo el fluido con el adsorbente.

Las columnas de adsorción van desde las más sencillas hasta las más complejas. Particularmente, el equipo de adsorción a diseñar puede ser considerado como un recipiente a presión en forma de columna cilíndrica, con una boquilla para la alimentación y otra para la descarga.

Además, la C-1101 requiere en su extremo inferior, de una placa perforada acompañada por una pequeña cantidad de fibra de vidrio para ayudar a la mejor dispersión del líquido y así disminuir la canalización en el interior de la columna; de igual forma, en el extremo superior se debe colocar una placa perforada que será acompañada por una porción de fibra de vidrio para disminuir el paso de lignina por arrastre a la corriente de salida.

Por otra parte, la columna cuenta con un conjunto de tornillos de seguridad que mantienen los extremos del fondo y del tope unidos a la columna, esto se tiene debido a la necesidad de separar los extremos al momento de alimentar la columna con lignina o desalojar la lignina pesada de su interior. En la línea de unión entre de los extremos removibles y el resto de la columna, se ubican cada una de las placas

perforadas. La columna también cuenta con una boquilla de alimentación de fluido de proceso por el fondo, de descarga por el tope y una de alimentación de agua de lavado por el tope.

En cuanto al material de construcción se tiene que el fluido de proceso es corrosivo, por lo tanto, el material seleccionado para la columna C-1101 es el acero inoxidable 316 de cédula 40 ya que cumple los requerimientos del equipo.

Para el diseño del equipo principal de la planta de adsorción, se cuenta con información valiosa sobre las dimensiones del lecho, información que se obtuvo a partir de un procedimiento de escalamiento llevado a cabo al utilizar un conjunto de resultados alcanzados para una planta de adsorción de metales pesados sobre lignina a escala laboratorio, tal como se explica en el capítulo VII. Asimismo, para el diseño de este equipo se consideran los criterios de la columna de adsorción presentados en la sección V.3.5. correspondiente al capítulo de visualización del proceso.

Además de los criterios de diseño correspondientes a este equipo y de la información obtenida por experimentación y por la aplicación del proceso de escalamiento, se consideraron lo siguientes puntos:

1. El diámetro de partícula de la lignina.
2. La presión y temperatura de operación de la columna, 1atm y 25°C.
3. Las propiedades físicas del fluido tales como la densidad y la viscosidad que corresponden al LIM.
4. Se establece como sobrediseño un 12% sobre la longitud estimada para el lecho según el proceso de escalamiento. Con este porcentaje se obtiene una columna de longitud adecuada para llevar a cabo la adsorción.
5. Se supone que el diámetro de lecho calculado para la planta a escala piloto, por el proceso de escalamiento, es igual al diámetro interno de la columna de adsorción.

6. Es recomendable que el relleno de la columna se fraccione para disminuir las caídas de presión en el interior de la torre.
7. La presión de la corriente de alimentación al equipo debe ser mayor a 30psig con la finalidad de vencer la caída de presión ocasionada por el lecho de lignina y cumplir así con el objetivo de la columna.

Con la información antes expuesta se procedió a diseñar la columna con el siguiente procedimiento de cálculo:

1. Ajustar el diámetro interno de la columna al siguiente diámetro de tubería comercial mayor según el acero inoxidable.
2. Calcular la longitud mínima para la columna, esto se logra al considerar tanto el 10% de sobrediseño como el valor estimado a partir del proceso de escalamiento para la altura de lecho.
3. Ajustar la longitud mínima a la siguiente longitud mayor reproducible.
4. Se determina la capacidad de la columna.
5. Estimar las longitudes de las fracciones de lecho a partir del fraccionamiento aplicado en la columna a escala laboratorio.
6. Dimensionar los extremos removibles de la columna.
7. Dimensionar las placas perforadas más convenientes para evitar la canalización del fluido en el interior de la torre y el arrastre de partículas.
8. Dimensionar el sistema de seguridad necesario para fijar los extremos al resto de la columna.

Una vez finalizado el procedimiento descrito anteriormente, se ha concluido con el diseño de la columna C-1101 de la planta de adsorción de metales pesados sobre lignina a escala piloto.

Adicionalmente, para el diseño de la columna se estableció que la corriente de alimentación al sistema tiene una presión de aproximadamente 30psig, por tal motivo, las conexiones del equipo deben ser lo suficientemente seguras como para evitar las

fugas de fluido de proceso y garantizar así la seguridad del sistema. Por lo tanto, el material seleccionado para la construcción de la columna debe estar en la capacidad de permitir que las tuberías enrosquen, sellando así los posibles puntos de fuga.

VIII.5.6. Filtro

La planta de adsorción de metales pesados sobre lignina a escala piloto requiere sólo de un equipo de filtración, el F-1101 y se encarga de eliminar las partículas de adsorbente que se encuentren en suspensión después de adsorbidos los metales, ya que la lignina empleada cuenta con un diámetro de partícula muy pequeño y puede ser arrastrada a la corriente de producto. Como el objetivo de la planta diseñada es para ponerla en marcha con fines investigativos, el producto del proceso no debe contener sólidos en suspensión ya que podría afectar los resultados de las muestras tomadas a lo largo del estudio.

El filtro requerido por el proceso únicamente fue especificado, ya que para el diseño del mismo se requiere de información más detallada sobre el fenómeno de la que se cuenta en base a las experiencias a escala de laboratorio; además, se incrementarían los costos de inversión en caso de requerir su construcción. Para la especificación del filtro sólo se establecieron las condiciones que debe cumplir y en base a esa información se realizó la comparación con lo que ofrece el mercado, seleccionando así el que mejor se ajuste a los requerimientos de la planta.

Con la finalidad de seleccionar el filtro adecuado se toma en cuenta lo siguiente:

1. La solución a filtrar es básicamente ácida (medianamente corrosiva), esto limita el material tanto del recipiente del filtro como el del medio filtrante.
2. Debe funcionar eficientemente a 25°C.
3. El fluido transporta partículas de aproximadamente 10µm de diámetro.
4. La viscosidad del fluido es aproximadamente de 0,9cP.
5. Debe trabajar a bajos caudales (5L/h).

6. El área superficial del filtro debe ser capaz de funcionar con un flujo 50% mayor o menor al de diseño para garantizar la flexibilidad de la planta.
7. La caída de presión del fluido en el equipo debe ser menor a 35psi.

Los criterios para la selección del filtro se presentaron en la sección V.3.6. del capítulo de visualización del proceso, allí se indica que el filtro adecuado para el sistema es uno con tambor rotatorio, pero en vista que un filtro en línea tipo cápsula es capaz de remover las partículas de lignina de la corriente de proceso, éste es el seleccionado entre los que proporciona el mercado.

Tomando en cuenta las consideraciones señaladas, se tiene que el filtro comercial recomendable para la planta de adsorción es uno de cápsula con membrana de teflón que ofrece una alta eficiencia y cuenta con un prefiltro para prolongar la vida de la membrana. La cápsula del filtro es gruesa y sellada sin ningún tipo de pegamento para no contaminar el líquido filtrado, incluye un respiradero en uno de los extremos de la cápsula para garantizar que no se pierda área de filtración, dejando que el aire se escape y el líquido se distribuya uniformemente dentro del equipo.

VIII.5.7. Tolva

La planta de adsorción diseñada requiere únicamente de una tolva que es la B-1101, ésta es empleada para contener en su interior la lignina pesada retirada de la columna de adsorción C-1101 una vez finalizado el proceso, es decir, en su interior se almacena la lignina agotada conjuntamente con el agua de lavado utilizada para su remoción.

La tolva B-1101 se considera como un recipiente de almacenamiento abierto a la atmósfera en forma de pirámide truncada invertida, y cuya capacidad depende directamente de la capacidad de la columna C-1101 y del volumen necesario de agua de lavado para desalojar el lecho de lignina saturada.

Para el diseño se consideraron los criterios presentados en la sección V.3.7. correspondiente al capítulo de visualización del proceso y el procedimiento de cálculo es el siguiente:

1. Establecer el porcentaje de sobrediseño.
2. Calcular la capacidad de la tolva en base al volumen de la columna y a la cantidad de agua de lavado utilizada para el desalojo de la lignina.
3. Establecer el ángulo de inclinación de las paredes de la tolva.
4. Establecer la altura de la tolva.
5. Determinar las longitudes de la base y alimentación de la tolva.
 - 5.1. Suponer una longitud para la base de la tolva.
 - 5.2. Calcular la longitud de la alimentación de la tolva.
 - 5.3. Calcular la capacidad de la tolva considerando las longitudes de la base y de la alimentación. Si ésta capacidad es igual a la calculada en el punto 2. el proceso iterativo a finalizado y si no es así, regresar al punto 5.1. suponiendo una longitud mayor.

Por otra parte, este equipo no requiere de accesorios, solo cuenta con una boquilla de drenaje para ser utilizada en caso de ser necesario el lavado del equipo. En cuanto al desalojo del contenido de la B-1101, después de culminado el proceso de la planta de adsorción de metales, se realizará manualmente.

El material de construcción es el acero inoxidable 316 por ser resistente al ácido y los metales que quedan retenidos en la lignina una vez finalizada la adsorción.

VIII.6. Hojas de especificación de los equipos principales

Una vez culminado el diseño de los equipos de la planta de adsorción de metales pesados sobre lignina, se procedió al desarrollo de los documentos que resumen la información de los mismos; es decir, se llevó a cabo la realización de las hojas de

especificaciones de los equipos correspondientes a la planta de procesos, en la cuales se presenta información valiosa para su posterior construcción y operación. Las hojas de especificación de los equipos principales se muestran en las figuras N°28, 29, 30, 31, 32, 33, 34 y 35.

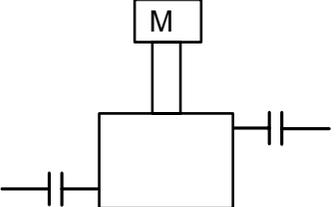
UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA				HOJA DE ESPECIFICACIÓN DE PROCESO BOMBAS									HOJA N°: 1 de 1
IDENTIFICACIÓN	SERVICIO	TIPO	FLUIDO	CONDICIONES DE DISEÑO			POTENCIA SUMINISTRADA (HP)	TEMPERATURA (°C)	DENSIDAD a P.T. (Kg/m³)	PRESIÓN DE VAPOR (kPa)	VISCOSIDAD (cP)	POTENCIA DISPONIBLE (HP)	
				FLUJO (L/h)	PRESIÓN (psia)								
					SUCCION	DESCARGA							DIF.
P-1101	Proceso	Diafragma	Proceso	5,0	20	60	40	0,0005	25	993,0	3,17	0,9	0,0286
P-1102	Proceso	Diafragma	Proceso	5,0	20	50	30	0,0004	25	993,0	3,16	0,9	0,0286
OBSERVACIONES: Las bombas requeridas por el sistema son de diafragma y manejan el mismo flujo volumétrico (5L/h).													
PLANOS DE REFERENCIA			PROYECTO: PLANTA PILOTO DE ADSORCIÓN DE METALES PESADOS SOBRE LIGNINA										
			REALIZADO POR: FONTAINE D.	FECHA: sep-06									
			REVISADO POR: ROJAS M.	FECHA: sep-06									
			APROBADO POR: PÉREZ N.	FECHA: sep-06									

Figura N°28. Hoja de especificación de las bombas.

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA		HOJA DE ESPECIFICACIÓN DE PROCESO TANQUE DE ALMACENAMIENTO		HOJA N°: 1 de 3
GENERAL		DETALLES MECANICOS		
Identificación	T-1101	Boquillas:		
N° de unidades	1	Identif.	Tamaño, plg	Servicio
Planta	Piloto de adsorción	A	3/4	Entrada de LIM
Servicio	Almacén de la alimentación	B	1/2	Salida de LIM
Fluido	LIM a tratar	C	1/2	Entrada de H ₂ O Lav
Diámetro interno, m	0,203	D	3/4	Drenaje
Altura, m	0,820	E	-	-
Capacidad, m ³	0,028	Válvula de Seguridad		1/2"
Nivel líquido, máx./mín., m	0,62/0,10	Venteo		3/8"
Tipo/Geometría	Vertical/Cilíndrica	Boca de Visita, plg		No tiene
Fondo y Tope	Semiesférico	Tope del tanque		Cerrado
CONDICIONES DE PROCESO		DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN		
Presión de Operación, kPa	101,4	Presión de Diseño, kPa	131,8	
Temperatura de Operación, °C	25	Temperatura de Diseño, °C	27,5	
Viscosidad a T. de operación, cP	0,89	Material de Construcción	SS 316	
G.E a T. de operación, adim.	0,993	Aislamiento/espesor, m	No	
Presión de Vapor a T. de oper., kPa	3,17	Espesor de la Pared, m	0,016	
OBSERVACIONES:				
El T-1101 es un tanque elevado sobre una base de 0,20m de altura. El material de construcción es Acero Inoxidable (SS).				
PLANOS DE REFERENCIA		PROYECTO:		
		PLANTA PILOTO DE ADSORCIÓN DE METALES PESADOS SOBRE LIGNINA		
		REALIZADO POR: ROJAS M.	FECHA:	Sep-06
		REVISADO POR: FONTAINE D.	FECHA:	Sep-06
		APROBADO POR: MEZA A.	FECHA:	Oct-06

Figura N°29. Hoja de especificación del tanque de almacenamiento T-1101.

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA		HOJA DE ESPECIFICACIÓN DE PROCESO TANQUE DE ALMACENAMIENTO			HOJA Nº: 2 de 3
GENERAL		DETALLES MECANICOS			
Identificación	T-1102	Boquillas:			
Nº de unidades	1	Identif.	Tamaño, plg	Servicio	
Planta	Piloto de adsorción	A	3/4	Entrada de licor tratado	
Servicio	Almacén de licor tratado	B	3/8	Salida de licor o H ₂ O	
Fluido	Licor tratado	C	3/4	Drenaje	
Diámetro, m	0,154	D	-	-	
Altura, m	0,620	E	-	-	
Capacidad, m ³	0,015	Válvula de Seguridad		1/2"	
Nivel líquido, max/min, m	0,35/0,10	Venteo		3/8"	
Tipo/Geometría	Vertical/Cilíndrica	Boca de Visita, plg		No tiene	
Fondo y Tope	Semiesférico	Tope del tanque		Cerrado	
CONDICIONES DE PROCESO		DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN			
Presión de Operación, kPa	101,4	Presión de Diseño, kPa	131,8		
Temperatura de Operación, °C	25	Temperatura de Diseño, °C	27,5		
Viscosidad a T. de operación, cP	0,89	Material de Construcción	SS 316		
G.E a T. de operación, adim.	0,993	Aislamiento/espesor, m	No		
Presión de Vapor a T. de oper., kPa	3,17	Espesor de la Pared, m	0,014		
OBSERVACIONES:					
El T-1101 es un tanque elevado sobre una base de 0,18m de altura. El material de construcción es Acero Inoxidable (SS).					
PLANOS DE REFERENCIA		PROYECTO:			
		PLANTA PILOTO DE ADSORCIÓN DE METALES PESADOS SOBRE LIGNINA			
		REALIZADO POR: ROJAS M.	FECHA:	Sep-06	
		REVISADO POR: FONTAINE D.	FECHA:	Sep-06	
		APROBADO POR: MEZA A.	FECHA:	Oct-06	

Figura N°30. Hoja de especificación del tanque de almacenamiento y estabilización T-1102.

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA		HOJA DE ESPECIFICACIÓN DE PROCESO TANQUE DE ALMACENAMIENTO		HOJA Nº: 3 de 3
GENERAL		DETALLES MECANICOS		
Identificación	T-1103	Boquillas:		
Nº de unidades	1	Identif.	Tamaño, plg	Servicio
Planta	Piloto de adsorción	A	3/4	Entrada de licor producido
Servicio	Almacén de licor producido	B	1/2	Salida de licor o H ₂ O
Fluido	Licor producido	C	3/4	Drenaje
Diámetro interno, m	0,203	D	-	-
Altura, m	0,820	E	-	-
Capacidad, m ³	0,028	Válvula de Seguridad		1/2"
Nivel líquido, máx./mín., m	0,62/0,10	Venteo		3/8"
Tipo/Geometría	Vertical/Cilíndrica	Boca de Visita, plg		No tiene
Fondo y Tope	Semiesférico	Tope del tanque		Cerrado
CONDICIONES DE PROCESO		DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN		
Presión de Operación, kPa	101,4	Presión de Diseño, kPa	131,8	
Temperatura de Operación, °C	25	Temperatura de Diseño, °C	27,5	
Viscosidad a T. de operación, cP	0,89	Material de Construcción	SS 316	
G.E a T. de operación, adim.	0,993	Aislamiento/espesor, m	No	
Presión de Vapor a T. de oper., kPa	3,17	Espesor de la Pared, m	0,0164	
OBSERVACIONES:				
El T-1101 es un tanque elevado sobre una base de 0,20m de altura. El material de construcción es Acero Inoxidable (SS).				
PLANOS DE REFERENCIA		PROYECTO:		
		PLANTA PILOTO DE ADSORCIÓN DE METALES PESADOS SOBRE LIGNINA		
		REALIZADO POR: ROJAS M.	FECHA:	Sep-06
		REVISADO POR: FONTAINE D.	FECHA:	Sep-06
		APROBADO POR: MEZA A.	FECHA:	Oct-06

Figura N°31. Hoja de especificación del tanque de almacenamiento T-1103.

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA		HOJA DE ESPECIFICACIÓN DE PROCESO TANQUE DE AGITACIÓN		HOJA N°: 1 de 1	
DATOS DEL PROCESO			DATOS DEL TANQUE		
Identificación:	M-1101		Geometría	Cilíndrico	
Número de unidades	1		Fondo	Elíptico	
Planta	Piloto de adsorción		Tope	Cerrado	
Servicio	Agitación de la alimentación		Deflectores	SI	
Fluido	Proceso		Diámetro, m	0,154	
Tipo de Mezclador	Tanque mezclador/agitador		Altura, m	0,462	
Volumen del tanque, m ³	0,010		Material	SS 316	
Tiempo de mezclado requerido, s	5		Espesor, m	0,020	
CONDICIONES DE LA CORRIENTE			DATOS DEL AGITADOR		
Corriente:	Tipo	Temp. (°C)	Visc. (cP)	Diámetro interno, m	0,04
LIM	Entrada	25	0,89	Cantidad de deflectores	2
Acido sulfúrico	Entrada	25	0,89	Amplitud del deflector, m	0,013
Amoniaco	Entrada	25	0,89	Distancia entre el deflector y la pared, m	0,002
Agitación final	95%			Material	SS
Presión del sistema, psia	14,7			DATOS MECANICOS/SERVICIO	
Sólidos en suspensión	No			Velocidad del agitador, rpm	540
Agitación durante el llenado	No			Potencia disponible, J/s	0,3
Presión de diseño, psia	16,17			Aislado	No
			Boquillas:		
			Identif.	Tamaño, plg	
			A	3/4	Entrada de LIM
			B	3/8	Salida de LIM
			C	1/2	Entrada de H ₂ O
			D	1/8	Alimentación de Ácido sulfúrico
			E	1/8	Alimentación de Amoniaco
			Válvulas de Seguridad		1/2"
			Venteo		1/2"
			Boca de Visita, plg		No tiene
Drenajes, plg		3/4			
OBSERVACIONES:					
El tanque del M-1101 está elevado sobre una base de 0,18m de altura. El material de construcción del tanque y del agitador es Acero Inoxidable (SS).					
PLANOS DE REFERENCIA			PROYECTO:		
			PLANTA PILOTO DE ADSORCIÓN DE METALES PESADOS SOBRE LIGNINA		
REALIZADO POR:		FONTAINE D.	FECHA:		sep-06
REVISADO POR:		ROJAS M.	FECHA:		sep-06
APROBADO POR:		PÉREZ N.	FECHA:		sep-06

Figura N°32. Hoja de especificación del tanque de agitación M-1101.

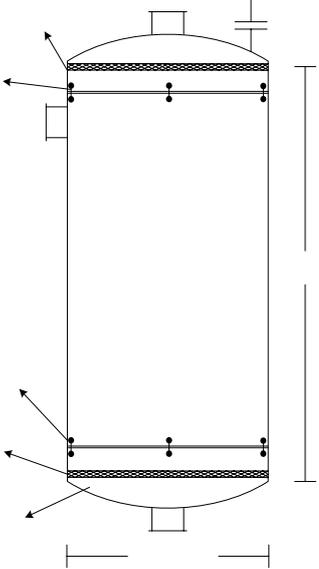
UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA		HOJA DE ESPECIFICACIÓN DE PROCESO COLUMNA DE ADSORCIÓN			HOJA N°: 1 de 1			
GENERAL			DETALLES MECANICOS					
Identificación	C-1101		Boquillas:					
N° de unidades	1		Identif.	Tamaño, plg	Servicio			
Planta	Piloto de adsorción		A	3/8	Entrada de LIM			
Servicio	Adsorción de metales		B	3/4	Salida de LIM o H ₂ O			
Fluido	LIM		C	3/4	Entrada de agua de lavado			
Diámetro interno, m	0,035		Válvula de Seguridad		1/2"			
Altura, m	0,630		Venteo		No			
Capacidad, m ³	6,061x10 ⁻⁴		Accesorios		Placas perforadas			
Tipo	Vertical		Ajuste del fondo		Con tornillos de seguridad			
Geometría	Cilíndrica		Ajuste del tope		Con tornillos de seguridad			
Fondo	Semiesférico y removible		Tornillos de seguridad		4 en cada extremo			
Tope	Semiesférico y removible		Diámetro/Tornillos		0,003m			
CONDICIONES DE PROCESO			DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN					
Presión de Operación, kPa	413,69		Presión de Diseño, kPa	537,8				
Temperatura de Operación, °C	25		Temperatura de Diseño, °C	27,5				
Viscosidad a T. de operación, cP	0,89		Material de Construcción	SS 316				
G.E a T. de operación, adim.	0,993		Espesor de la Pared, m	0,007				
Presión de Vapor a T. de oper., kPa	3,17		Placas perforadas					
						Función		
			Superior	Retiene el lecho				
			Inferior	Canaliza y retiene el lecho				
			Placa superior			Diámetro/perforación		
						0,001m		
						Diámetro, m		
						0,040		
						Ubicación		
						Fija en la sección removible del tope		
						Altura de la ubicación		
			0,629m					
			Espesor, m					
			0,001					
			Material					
			Acero inoxidable 316					
Placa inferior			Diámetro/perforación					
			0,1cm					
			Diámetro, m					
			0,040					
			Ubicación					
			Fija en la sección removible del fondo					
			Altura de la ubicación					
			0,000m					
			Espesor, m					
			0,001					
			Material					
			Acero inoxidable 316					
			Material de los tornillos					
			Acero					
OBSERVACIONES: El material de construcción es Acero Inoxidable (SS). La C-1101 es una columna de lecho fijo alimentada por el fondo y descargada por el tope. La C-1101 tiene un fondo y un tope removible para cargar y descargar la lignina de su interior.								
PLANOS DE REFERENCIA			PROYECTO: PLANTA PILOTO DE ADSORCIÓN DE METALES PESADOS SOBRE LIGNINA					
			REALIZADO POR: ROJAS M.	FECHA: sep-06				
			REVISADO POR: FONTAINE D.	FECHA: sep-06				
			APROBADO POR: MEZA A.	FECHA: oct-06				

Figura N°33. Hoja de especificación de la columna de adsorción C-1101.

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA		HOJA DE ESPECIFICACIÓN DE PROCESO FILTRO		HOJA N°: 1 de 1
GENERAL		CAPSULA		
Identificación	F-1101	Tipo de cápsula	Sellada	
Nº de unidades	1	Material	Polipropileno	
Planta	Piloto de adsorción	Boquillas:		
Servicio	Filtrado del licor tratado	Identif.	Tamaño, plg	Servicio
Fluido	Licor tratado	A	3/8	Entrada de licor tratado
Tipo de filtro	Cápsula	B	3/8	Salida de licor tratado
Geometría	Cilíndrica	Válvula de Seguridad		1/8"
Fondo y Tope	Semiesférico	Venteo		No
CONDICIONES DE PROCESO		MEDIO FILTRANTE		
Presión de Operación, kPa	344.69	Tipo	Membrana	
Temperatura de Operación, °C	25	Material	Teflón	
Viscosidad a T. de operación, cP	0.89	Área efectiva de filtrado, cm	500	
G.E a T. de operación	0.993	Díametro de poro, µm	1	
Presión de Vapor a T. de oper., kPa	3.17	Caída de presión Máx. psi	30	
Díametro de partícula, µm	10	Medio esterilizado	No	
OBSERVACIONES: El F-1101 es un filtro en línea y no fue diseñado sino especificado, esto con la finalidad de obtener uno similar entre los que ofrece el mercado.				
PLANOS DE REFERENCIA		PROYECTO: PLANTA PILOTO DE ADSORCIÓN DE METALES PESADOS SOBRE LIGNINA		
		REALIZADO POR: ROJAS M.	FECHA:	Sep-06
		REVISADO POR: FONTAINE D.	FECHA:	Sep-06
		APROBADO POR: MEZA A.	FECHA:	Oct-06

Figura N°34. Hoja de especificación del filtro F-1101.

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA		HOJA DE ESPECIFICACIÓN DE PROCESO TOLVA DE ALMACENAMIENTO			HOJA Nº: 1 de 1
GENERAL			DETALLES MECANICOS		
Identificación	B-1101		Boquillas:		
Nº de unidades	1		Identif.	Tamaño, plg	Servicio
Planta	Piloto de adsorción		A	3/4	Drenaje
Servicio	Almacén de lignina pesada		B	-	-
Corriente	Lignina pesada con H2O		Válvula de Seguridad		No tiene
Longitud de la alimentación, m	0,190		Venteo		No tiene
Longitud de la base, m	0,119		Boca de Visita, plg		No tiene
Altura, m	0,200		Tope de la tolva		Abierto
Capacidad, m ³	3,500x10 ⁻³		DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN		
Geometría	Pirámide truncada		Presión de Diseño, kPa	101,4	
Fondo	Plano		Temperatura de Diseño, °C	25	
CONDICIONES DE PROCESO			Material de Construcción	SS 316	
Presión de Operación, kPa	101,4		Angulo de inclinación de las paredes	10°	
Temperatura de Operación, °C	25				
OBSERVACIONES: El B-1101 es una tolva de almacenamiento que se vacia manualmente. El material de construcción es Acero Inoxidable (SS).					
PLANOS DE REFERENCIA			PROYECTO: PLANTA PILOTO DE ADSORCIÓN DE METALES PESADOS SOBRE LIGNINA		
			REALIZADO POR: ROJAS M.	FECHA: Sep-06	
			REVISADO POR: FONTAINE D.	FECHA: Sep-06	
			APROBADO POR: MEZA A.	FECHA: Oct-06	

Figura N°35. Hoja de especificación de la tolva de almacenamiento de lignina pesada B-1103.

VIII.7. Filosofía y estrategias de control

En esta sección se presentan las diferentes estrategias de control empleadas en el diseño de la planta, los tipos de señales en los lazos de control y su transmisión en los distintos equipos, con el fin de proporcionar seguridad a la planta, al medio ambiente, al personal a cargo y garantizar el funcionamiento de los diferentes equipos que la conforman.

La mayoría de las estrategias de control aplicadas al proceso son sistemas automáticos del tipo proporcional (P) para el control de nivel y proporcional integral derivativo (PID) para controlar el pH en una etapa del proceso. Entre las diferentes configuraciones de estrategias de control, se empleó el control feedback para mantener el nivel en los tanques, un control de rango dividido para regular el pH de la solución contenida en el mezclador, un control en cascada para dar paso a otra etapa del proceso. Finalmente se consideraron medidores de presión y temperatura a lo largo de la columna de adsorción.

Adicionalmente, la planta cuenta con medidores de alto y bajo nivel para alertar a técnicos y operadores de las novedades que puedan presentarse en algunos de los equipos que poseen estos instrumentos. En cuanto a la transmisión de las señales, se utilizaron de tipo eléctricas en un rango de 4-20mA para la relación entre los instrumentos de medición y los controladores, señales neumáticas en un rango de 3-15psi para la relación entre los controladores y los elementos finales de control. Para la transformación entre las diferentes señales se consideraron los transductores de tipo I/P, relacionando señales neumáticas con las eléctricas.

Por último, se especificaron válvulas de alivio y seguridad en todos los equipos de la planta. Las válvulas de control en caso de fallas en el proceso, actúan bajo la premisa de mantener seguro a los equipos y al personal, ya que éstas fallan cerrándose o abriéndose según sea el caso.

Una vez conocidos todos los aspectos generales sobre la filosofía y estrategias de control, a continuación se presentan las empleadas para cada equipo del proceso de adsorción de metales pesados sobre lignina.

VIII.7.1. Estrategia de control del tanque de almacenamiento de la materia prima T-1101

Este tanque tiene la capacidad de recibir toda la cantidad de materia prima con que opera la planta, proveniente de un proceso aguas arriba. En el T-1101 es necesario controlar el nivel alto del líquido dentro del recipiente para que no se desborde, manipulando el flujo de entrada de LIM a la planta, mediante un sistema de control feedback.

El nivel se mide con un sensor y pasa a través de un transmisor (LT-101) que genera una señal eléctrica al controlador (LIC-101), donde se compara el nivel del líquido que llega al mismo con el establecido en el punto de control (SP), si éste alcanza un valor por encima del establecido, el sistema actúa cerrando la válvula de alimentación al tanque; de igual forma el tanque T-1101 cuenta con un indicador de nivel bajo. Adicionalmente, se controla la presión en el tanque mediante un venteo con la finalidad de desalojar los vapores y posibles inertes de su interior.

Con respecto a la válvula de control que alimenta al tanque (LCV-101), por razones de seguridad, ésta presenta la característica de falla cerrada (FC) aire para abrir (AA), asegurando que en caso de una emergencia ningún flujo llegue al ciclo, por lo tanto, la acción del controlador (LIC-101) es inversa.

VIII.7.2. Estrategia de control del tanque estabilizador T-1102

El tanque T-1102 actúa como un acumulador del licor limpio que proviene de la columna C-1101, en éste se controla el nivel de líquido para evitar el desbordamiento

del mismo, garantizar una cantidad de líquido suficiente para continuar con el proceso y no ocasionar daños a equipos aguas abajo. Para ello se emplea un sistema de control feedback con el transmisor (LT- 104) que envía una señal al controlador (LIC-104) y éste toma la acción de encender la bomba P-1102, que se encuentra después del tanque, hasta que el T-1102 llegue al nivel de líquido establecido, de lo contrario la bomba P-1102 estará apagada.

La bomba P-1102, se encargará de impulsar el líquido proveniente del tanque T-1102 a la etapa de filtrado y se encuentra graduada para que funcione con un flujo de descarga de 5L/h. La acción del controlador (LIC-104) es directa. En el tanque T-1102 de igual manera se controla la presión con fines de seguridad, manipulando una válvula de venteo con la finalidad de desalojar los vapores y posibles inertes de su interior.

VIII.7.3. Estrategia de control del tanque de agitación M-1101

El tanque de mezclado M-1101 posee, en principio, un control feedback para el nivel de líquido en el tanque que actúa cerrando la válvula de alimentación al tanque (LCV-102), cuando alcanza el nivel de líquido necesario para la operación de la planta. La válvula de control es de falla cerrada por medidas de seguridad y el controlador es de acción inversa.

Una vez que se controla el nivel de LIM dentro del tanque, se debe controlar el pH y para ello se cuenta con el transmisor de pH (AT-101) que envía una señal al controlador (AIC-101) donde se comparan el valor de pH del transmisor con el valor en el punto de control (SP), si este valor se encuentra por debajo del mismo, se abre la válvula que da paso a una solución de amoníaco (ACV-101A), en caso contrario se abre la válvula que contiene una solución de ácido sulfúrico (ACV-101B); estas válvulas poseen una abertura determinada, la cual permite un flujo establecido de ácido sulfúrico y amoníaco suficiente para la regulación del pH que se requiere. Por

razones de seguridad las válvulas ACV-101A/B fallan de manera cerrada (FC) aire para abrir (AA).

En el momento que se obtiene el valor de pH requerido para el proceso, un sistema de control en cascada adicional se pone en funcionamiento; donde el transmisor de pH (AT-101) envía una señal al controlador (ACV-101), el cual toma la acción de poner en funcionamiento la bomba P-1101 sólo cuando el pH es el establecido en el punto de control (SP). Por otro lado, un medidor de nivel bajo (LT-103) envía una señal al controlador LIC-103, el cual toma la acción de apagar la bomba P-1101 cuando se llegue al nivel mínimo de líquido en el tanque.

La bomba P-1101 está ubicada después del tanque de mezclado M-1101 y se encarga de llevar el líquido a la etapa de adsorción con un flujo de salida regulado de 5L/h.

VIII.7.4. Estrategia de control del tanque de almacenamiento de producto T-1103

El tanque de almacenamiento de producto recibe el licor limpio proveniente de la etapa de filtrado, en el T-1103 por las mismas razones que en el T-1101 y T-1102 se controla el nivel de líquido mediante un medidor de alto nivel para que el operador de la planta actúe en caso de ser necesario y se controla la presión del interior del tanque manipulando una válvula de venteo.

VIII.7.5. Estrategia de control de la columna de adsorción C-1101

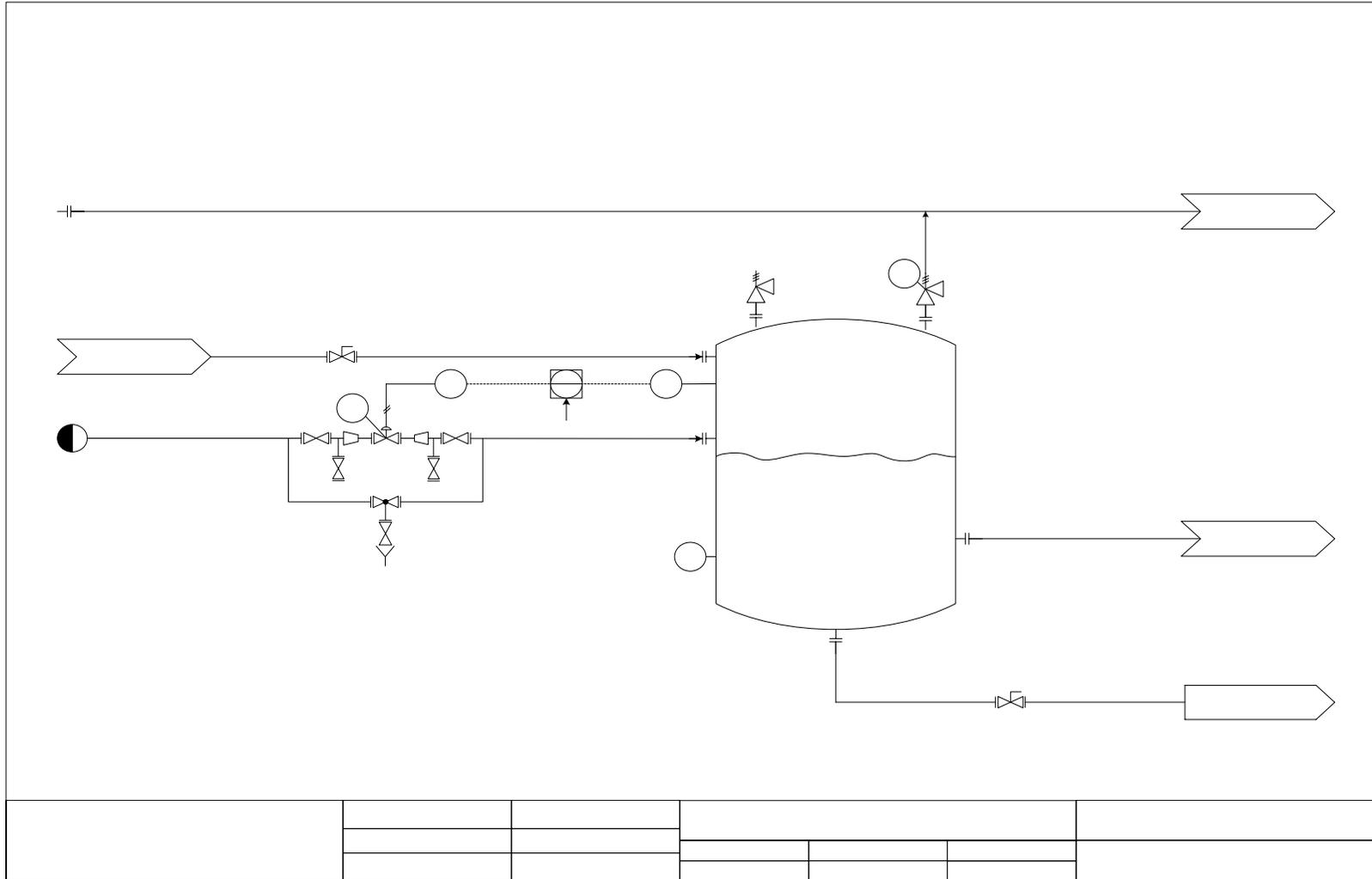
La columna cuenta con medidores de presión y temperatura ubicados al comienzo y al final de la misma, existen con la finalidad de observar el comportamiento de estas dos variables a lo largo de la etapa de adsorción que es cuando el fluido de proceso (LIM) recorre la columna C-1101.

Por la experiencia realizada en el laboratorio y con el conocimiento de que la reacción que ocurre dentro de la columna de adsorción es levemente exotérmica (Pérez⁽³⁾, 2006), no se esperan cambios bruscos o significativos en la temperatura a lo largo del equipo; razón por la cual sólo se consideran medidores en los extremos y no se aisló la columna C-1101.

La intención del sistema de control considerado en la planta es controlar el proceso y optimizar el nivel de energía requerido. Una vez discutida la aplicación de las estrategias de control necesarias para la planta de adsorción, es posible mostrar los diagramas de tuberías e instrumentación en donde se presentan de forma gráfica los equipos involucrados en el proceso con sus respectivos lazos de control.

VIII.8. Diagramas de tuberías e instrumentación

Una vez especificados y diseñados los equipos necesarios para el proceso de adsorción de metales pesados sobre lignina a escala piloto, se procedió a generar los diagramas de tuberías e instrumentación. Estos diagramas contienen la información de los equipos, tuberías, válvulas y lazos de control del proceso principal y se muestran en las figuras N°36, 37, 38, 39, y 40.



T-
 Tanque de al
 materia
 Temper
 Presión
 Diámet
 Altura
 Capacida
 Material: a

Figura N°36. Diagrama de tuberías e instrumentación N°1.

Agua de lavado

NC

1/2"-S-1100'-SS

LY
 10'

163 LC
 10'

LT
 10'

LCV
 10'

3/4"-F-11001-SS

SF 0 62m

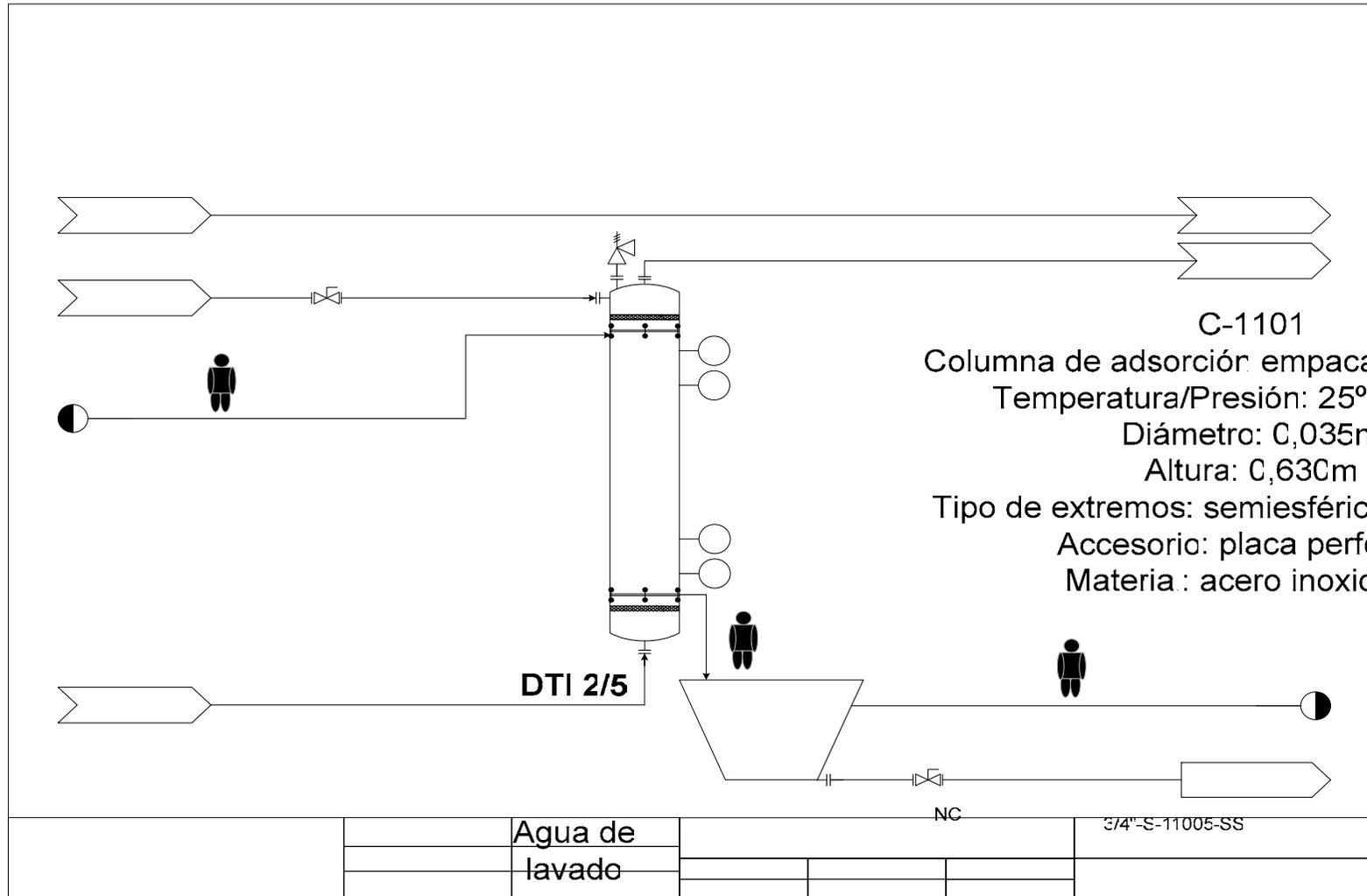
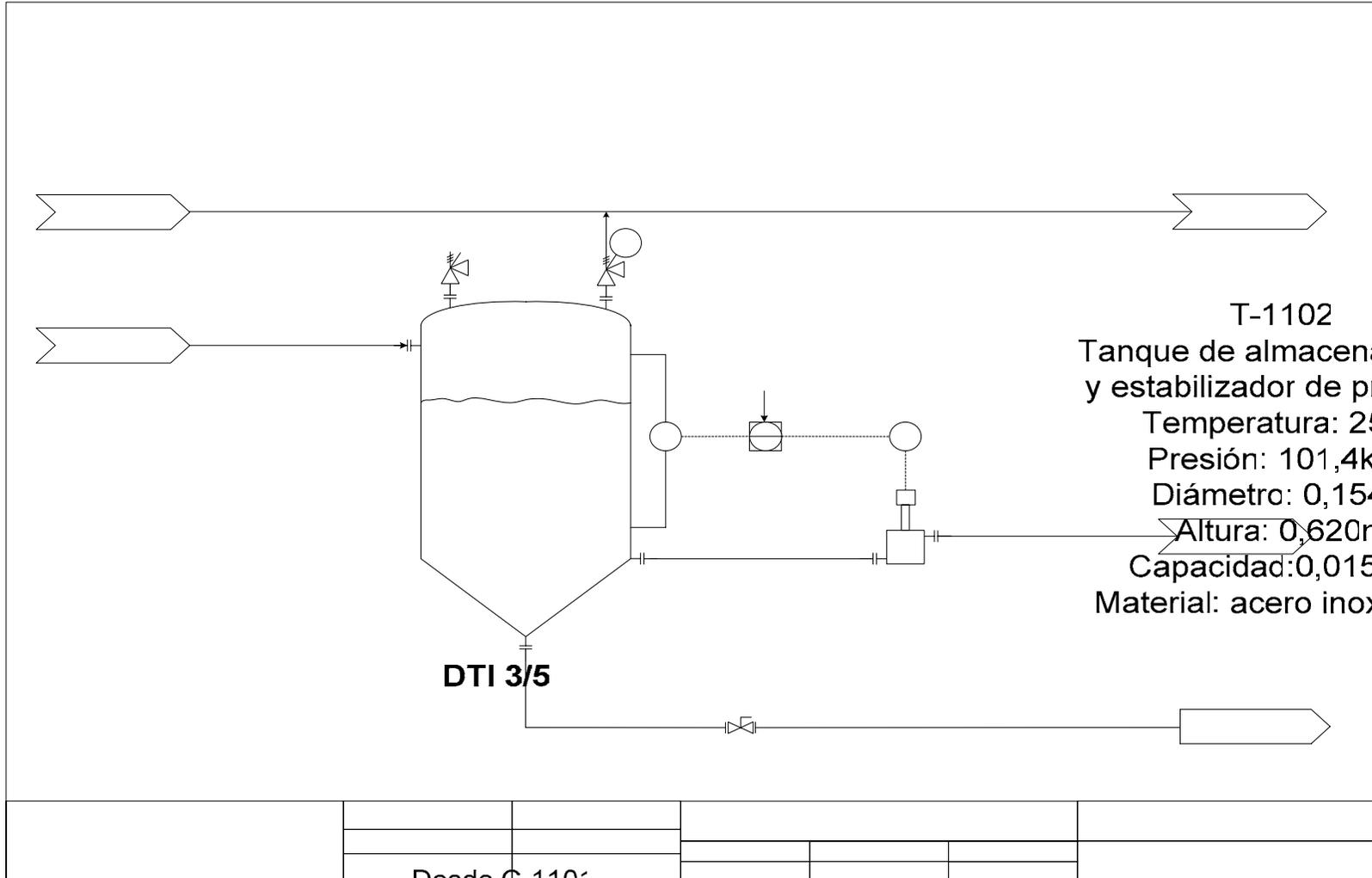


Figura N°38. Diagrama de tuberías e instrumentación N°3.
 Nota 1



Desde C-110'
 Figura N°39. Diagrama de tuberías e instrumentación N°4.
 DTI 3/5

3/4-F-11005-SS

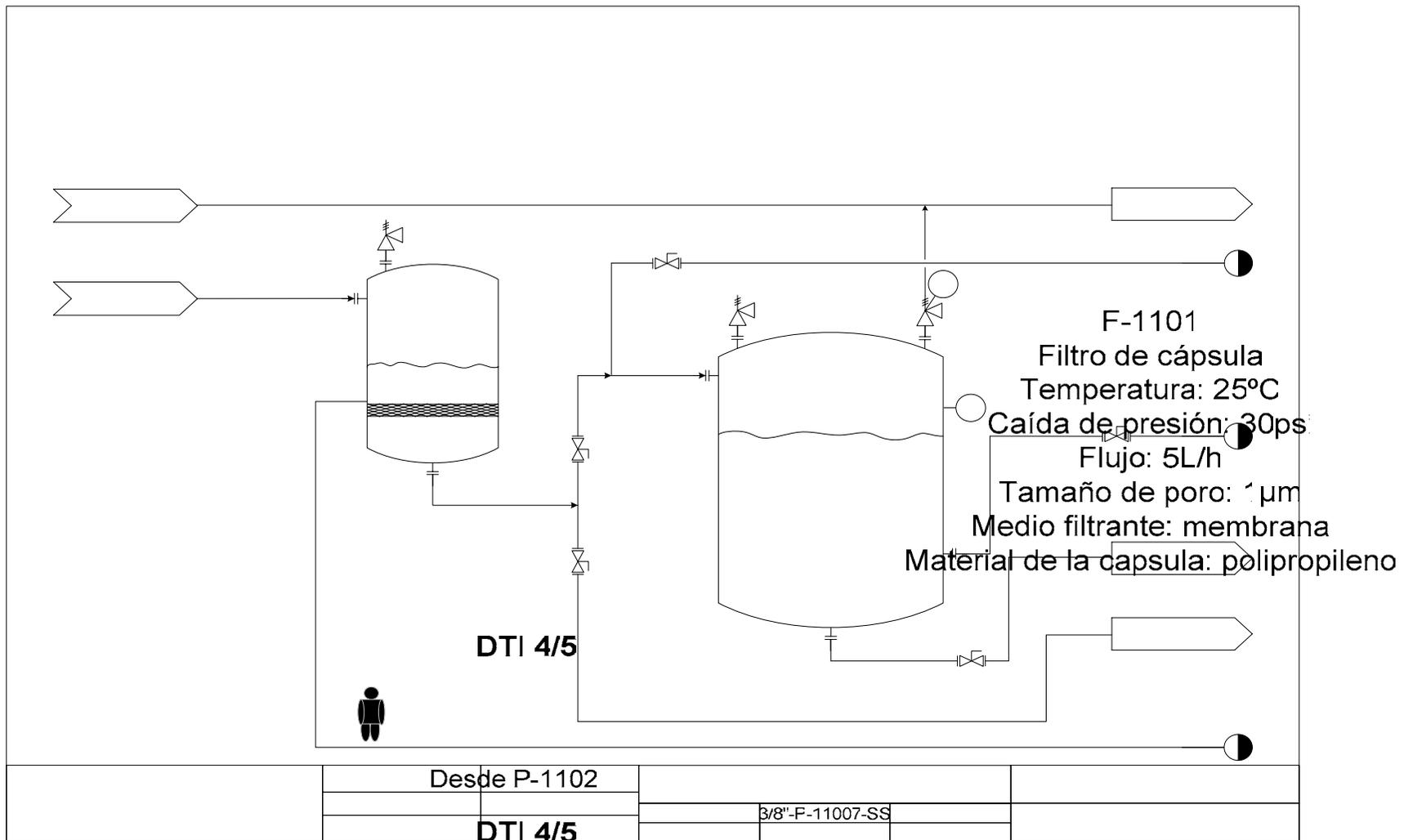


Figura N°40. Diagrama de tuberías e instrumentación N°5.

VIII.9. Listas de equipos de proceso

Se elaboró una lista de equipos principales del proceso, los cuales se mencionan de acuerdo a su ubicación en los diagramas de tuberías e instrumentación (DTI), y cuenta con la identificación del equipo y descripción. Esta información se muestra en la tabla N°21.

Tabla N°21. Lista de equipos de proceso.

LISTA DE EQUIPOS DE PROCESO			
Nombre	Descripción	Cantidad	DTI
T-1101	Tanque de almacenamiento de materia prima	1	1/5
M-1101	Tanque de agitación para la regulación de pH	1	2/5
P-1101	Bomba de diafragma	1	2/5
C-1101	Columna de adsorción empacada con lignina	1	3/5
B-1101	Tolva de almacenamiento de lignina pesada	1	3/5
T-1102	Tanque de almacenamiento y estabilizador de producto	1	4/5
P-1102	Bomba de diafragma	1	4/5
F-1101	Filtro de cápsula	1	5/5
T-1103	Tanque de almacenamiento de licor limpio	1	5/5

VIII.10. Lista de tuberías

Esta lista contiene la información básica sobre las redes de tuberías de la planta. Entre las características de las tuberías que presenta esta lista, se tiene el número de la misma, diámetro nominal, origen, destino y finalmente la fase del fluido que maneja. La lista de tuberías se muestra en la tabla N°22.

Tabla N°22. Lista de tuberías requeridas.

LISTA DE TUBERÍAS									Pág.1/1
DTI	TUBERÍA			Vap./Liq.	SERVICIO	DESCRIPCIÓN		PRESIÓN (psia)	TEMP. (°C)
N°	N°	CLASE	D(plg)			DESDE	HASTA		
1/5	1	SS	3/4	Liq.	P	Alimentación	T-1101	14,7	25
1/5	2	SS	3/4	Liq.	P	T-1101	M-1101	14,7	25
1/5	1	SS	1/2	Liq.	S	Toma de agua	T-1101	14,7	25
1/5	2	SS	3/4	Liq.	S	T-1101	Drenaje cerrado	14,7	25
2/5	3	SS	3/8	Liq.	P	M-1101	P-1101	14,7	25
2/5	4	SS	3/8	Liq.	P	P-1101	C-1101	50,0	25
2/5	1	SS	1/8	Liq.	AL	Toma de ácido	M-1101	14,7	25
2/5	1	SS	1/8	Liq.	BL	Toma de amoníaco	M-1101	14,7	25
2/5	3	SS	1/2	Liq.	S	Toma de agua	Drenaje cerrado	14,7	25
2/5	4	SS	3/4	Liq.	S	M-1101	Drenaje cerrado	14,7	25
3/5	5	SS	3/4	Liq.	P	C-1101	T-1102	14,7	25
3/5	5	SS	3/4	Liq.	S	Toma de agua	C-1101	14,7	25
3/5	6	SS	3/4	Liq.	S	B-1101	Drenaje cerrado	14,7	25
45	6	SS	3/8	Liq.	P	T-1102	P-1102	14,7	25
4/5	7	SS	3/8	Liq.	P	P-1102	F-1101	30,0	25
4/5	7	SS	3/4	Liq.	S	T-1102	Drenaje cerrado	14,7	25
5/5	8	SS	3/8	Liq.	P	F-1101	División	14,7	25
5/5	9	SS	3/4	Liq.	P	División	T-1103	14,7	25
5/5	10	SS	1/2	Liq.	P	T-1103	Licor limpio	14,7	25
5/5	11	SS	1/4	Liq.	P	11009	Licor limpio	14,7	25

VIII.11. Listas de instrumentos

En esta sección, se presentan tres tipos de lista de instrumentos. La primera de ellas, es la lista de controladores y se muestra en la tabla N°23, en donde se especifica el plano o DTI en que se encuentra, la variable manipulada, variable controlada, tipo de controlador, acción y punto de control. La segunda lista contiene las válvulas, tipo de falla, ubicación, variable manipulada y se muestra en la tabla N°24. Por último la lista de indicadores en la tabla N°25 donde se señala la variable medida y el plano o DTI en que se encuentra.

Tabla N°23. Lista de controladores.

LISTA DE CONTROLADORES						
Nombre	DTI	Variable controlada	Variable manipulada	Set point	Tipo	Acción
LIC-101	1/5	Nivel en el tanque T-1101	Flujo de entrada al tanque T-1101	0,62m	P	Inversa
LIC-102	2/5	Nivel en el tanque de agitación M-1101	Flujo de entrada al tanque de agitación M-1101	0,38m	P	Inversa
LIC-103	2/5	Nivel bajo en el tanque de agitación M-1101	Potencia del motor de la bomba P-1101	0,1m	P	Inversa
LIC-104	4/5	Nivel en el tanque T-1102	Potencia del motor de la bomba P-1102A/B	0,35m	P	Directa
AIC-101	2/5	pH en la solución del tanque de mezclado M-1101	Potencia del motor de la bomba P-1101A/B	4pH	PID	Inversa
AIC-101	2/5	pH en la solución del tanque de mezclado M-1101	Flujo de ácido sulfúrico y flujo de amoníaco	4pH	PID	Inversa

A continuación se muestra la lista de válvulas, en la cual se encuentran las válvulas de control, alivio y otras necesarias a lo largo del proceso.

Tabla N°24. Lista de válvulas.

LISTA DE VÁLVULAS			
Nombre	DTI	Variable manipulada	Falla
LCV-101	1/5	Flujo de LIM a la entrada de T-1101	Cerrada
LCV-102	2/5	Flujo de LIM a la entrada de M-1101	Cerrada
ACV-101A	2/5	Flujo de Amoníaco	Cerrada
ACV-101B	2/5	Flujo de Ácido Sulfúrico	Cerrada
PSV-101	1/5	Alivio de presión en T-1101	Abierta
PSV-102	2/5	Alivio de presión en M-1101	Abierta
PSV-103	3/5	Alivio de presión en C-1101	Abierta
PSV-104	4/5	Alivio de presión en T-1102	Abierta
PSV-105	4/5	Alivio de presión en F-1101	Abierta
PSV-106	5/5	Alivio de presión en T-1103	Abierta

Finalmente, se presenta la lista de indicadores tales como: indicadores de temperatura, presión y nivel; que se encuentran instalados en algunos equipos de la planta.

Tabla N°25. Lista de indicadores.

LISTA DE INDICADORES		
Nombre	DTI	Variable medida
LI-101	1/5	Nivel en T-1101
LI-102	2/5	Nivel en M-1101
PI-101	3/5	Presión en C-1101
TI-101	3/5	Temperatura en C-1101
PI-102	3/5	Presión en C-1101
TI-102	3/5	Temperatura en C-1101
LI-103	5/5	Nivel en T-1103

VIII.12. Estimación de costos de la planta

En esta etapa del diseño se realizó una estimación de costos para la instalación de la planta piloto, con el objetivo de evaluar la factibilidad técnica, económica y financiera del proyecto.

La estimación de costos cuenta con una clasificación que está directamente relacionada con los alcances del proyecto. Se realizó una estimación de estudio que requirió del previo diseño de los equipos, de toda la información referente a las bombas e instrumentos de control, con la finalidad de incluir en la estimación un aproximado del costo de los equipos a partir de la cantidad y de las dimensiones de estos.

Los costos presentados en este capítulo provienen de una evaluación de distintos presupuestos proporcionados por proveedores nacionales, a los cuales se les

facilitaron las dimensiones y especificaciones de cada equipo. Como resultado de la investigación de costos se obtuvieron los valores mostrados en la tabla N°26.

Tabla N°26. Costos de los equipos de la planta piloto.

Equipo	Cantidad	Costo (\$)
Tanque de almacenamiento de materia prima T-1101	1	280
Tanque de almacenamiento y estabilizador T-1102	1	233
Tanque de almacenamiento de materia prima T-1103	1	280
Tanque de agitación M-1101	1	756
Columna de adsorción de lecho fijo C-1101	1	200
Filtro tipo cápsula	1	114
Bomba de diafragma	2	612
Válvulas	6	560
Sensor de nivel	4	576
Sensor de pH	1	160
Indicador de nivel	3	240
Indicador de presión	2	64
Indicador de temperatura	2	48
Válvula actuadora (de control)	2	1440
Válvula dosificadora (de control)	2	480
Controladores y transmisores	10	1395
	Total	7438

En la tabla N°26 se muestran los resultados del procedimiento de investigación para el costo de los equipos, éste se llevó a cabo porque la naturaleza de los quipos requeridos en una planta piloto no permiten la aplicación de teorías de costos, en vista que estas teorías se aplican a plantas industriales.

Las teorías de costos involucran correlaciones que dependen de constantes para cada tipo de equipo y éstas a su vez tienen rangos de aplicación, es por ello que no es posible emplear las teorías a la planta piloto, ya que en caso de hacerlo se obtienen costos excesivamente grandes y los costos de los equipos de una planta piloto son mucho menores que los de una planta industrial porque se requiere de menos cantidad de material y de menos horas de dedicación de mano de obra para su construcción (Turton, 1998).

La estimación de costos de los equipos es un factor importante en la estimación de capital y para ello se consideraron los diagramas de tuberías e instrumentación y las hojas de especificación de los equipos, en donde se presentan las dimensiones de forma precisa.

Por otra parte, los costos de la tabla N°26 ya contienen el porcentaje asociado a los impuestos correspondientes y se muestran en dólares de EEUU, esto se debe a que la mayoría de los equipos y de los instrumentos considerados para la planta de adsorción son importados y además, la moneda considerada permite que los datos mostrados sean menos afectados por el cambio de valor del dinero en el tiempo y puedan ser empleados en un futuro.

En los costos mostrados en la tabla N°26 se observa como los instrumentos y elementos de control representan una fuerte inversión en comparación con los costos del resto de los equipos de la planta, esto se debe a que los equipos principales tienen un costo significativamente menor para la planta piloto en comparación con una industrial. Por su parte, los sistemas de control no disminuyen su precio al disminuir

la capacidad de la planta, simplemente se realiza la elección en función de los requerimientos establecidos para el sistema.

En definitiva, se observa que la planta tendrá un costo de inversión de 7.438\$ según la estimación de estudio realizada, esta inversión en la moneda venezolana se cuantifica en 15.991.700Bs considerando el cambio oficial. Si se compara este costo con el costo inicial propuesto por el grupo TECall, se puede decir que la inversión de la planta se encuentra dentro de los rangos previstos.

Cabe destacar que en la estimación de costo no se ha tomado en cuenta el cableado ni las tuberías, accesorios e instalación de los equipos requeridos para poner en funcionamiento la planta, esto se debe a que la ingeniería básica no cubre el detalle de las tuberías, longitudes ni ubicación en el espacio. Sin embargo, la estimación realizada proporciona una información importante ya que representa un alto porcentaje de la inversión requerida porque se consideran los equipos y los sistemas de control que son lo más costoso de la inversión para la planta piloto diseñada.

CONCLUSIONES

Luego de cumplir todos los objetivos relacionados con el diseño a nivel básico de una planta de adsorción de metales pesados sobre lignina a escala piloto, a continuación se presentan las conclusiones obtenidas en este estudio:

- La instalación de la planta piloto es factible técnicamente en el Laboratorio de Química Ambiental de la Universidad Simón Bolívar.
- La capacidad de la planta de adsorción de metales pesados sobre lignina será de 5L/h de licor ácido (LIM) cada vez que opere la planta, capacidad que es suficiente para satisfacer los requerimientos de las distintas pruebas de laboratorio que deben realizarse al licor limpio, así como para que exista suficiente cantidad de fluidos en las tuberías que evite el taponamiento e involucre tamaños manejables de equipos.
- El proceso debe llevarse a cabo de forma semicontinua y la planta estará en operación dos horas diarias, seis veces al trimestre, el resto del tiempo la planta no estará en funcionamiento dando un factor de servicio de 0,017.
- La materia prima se obtendrá de un proceso de desmetalización por vía microonda del coque de petróleo, que se realizará aguas arriba de la planta.
- Con el montaje realizado a escala laboratorio, fue posible llevar a cabo el proceso semicontinuo de adsorción de metales pesados sobre lignina en una columna de lecho fijo a escala laboratorio.
- El pH del licor ácido debe ser controlado antes de alimentarse a la columna para garantizar que la adsorción ocurra a un pH óptimo de 4.

- Las pruebas realizadas a escala laboratorio con la solución de Níquel dieron resultados que concuerdan con la tendencia esperada según las bases teóricas para un proceso de adsorción de lecho fijo y arrojan las curvas de ruptura que demuestra como se agotó la lignina a medida que trascurría el tiempo.
- En relación al Vanadio, las pruebas realizadas a escala laboratorio no generaron las curvas de ruptura esperadas y no se observó una tendencia definida para el proceso de adsorción de lecho fijo.
- La lignina es un adsorbente efectivo para la adsorción de Níquel presente en el licor ácido, removiendo un 97% de este metal de la solución tratada, pero no así para el caso del Vanadio ya que remueve sólo un 20%.
- Con los resultados a escala laboratorio para la adsorción de Níquel, se pudo aplicar el modelo BDST del cual se obtuvo que la constante de adsorción de la solución es de 0,47L/mgh, la capacidad de adsorción del adsorbente es de 5,79mg/L, la zona de transferencia de masa es de 0,061m de altura y la altura mínima necesaria de lecho para obtener la concentración deseada de salida en el tiempo cero es de 0,053m.
- Los valores de la constante de adsorción y de la capacidad de adsorción de la lignina indican que ésta es un adsorbente eficiente para la remoción de Níquel en las corrientes tratadas, mas no así para el Vanadio.
- El escalamiento de la planta de escala laboratorio a piloto, se realizó de manera eficaz aplicando la teoría de la semejanza mecánica en donde se relacionan los números de Reynolds; y la geométrica en donde se relacionan el diámetro y la altura del lecho, proporcionando de esta manera relaciones que permitieron obtener los nuevos valores de diámetro y altura de lecho para la capacidad de la planta a escala piloto.

- Los resultados del escalamiento demuestran que las dimensiones del lecho no aumentan en la misma proporción que lo hace el flujo volumétrico. Sin embargo, según los cálculos realizados éstas nuevas dimensiones estimadas son suficientes para que el proceso se lleve a cabo de forma eficiente.
- El lecho de lignina se satura en un tiempo de aproximadamente 60min y debe sustituirse para cumplir así de nuevo con las especificaciones de composición del licor limpio.
- El producto de la torre de adsorción debe ser alimentado a un filtro con la finalidad de eliminar todas las partículas de adsorbente que se hayan arrastrado durante el proceso.
- Los extremos de la columna requieren la utilización de placas perforadas o tamices para disminuir la canalización del fluido y el paso de lignina a la corriente de salida.
- La planta piloto diseñada presenta versatilidad en cuanto a las condiciones de proceso. Es lo suficientemente flexible en lo que respecta a variables como presión y alimentación permitiendo condiciones de operación diferentes.
- El proceso requiere de la aplicación de dos bombas de diafragma para impulsar el fluido a lo largo de la planta, dos tanques de almacenamiento tanto de materia prima como de producto, un tanque estabilizador de producto, una tolva de almacenamiento de lignina pesada, un filtro y una columna de adsorción.
- Para la regulación de pH se debe contar con un tanque de agitación con un agitador de turbina con aspas planas, y un motor de 540rpm.

- La estimación de costo realizada proporciona un valor que se encuentra dentro de los esperados para las plantas piloto y la mayor inversión la representan los elementos del sistema de control.
- La planta tendrá un costo de inversión de 15.991.700Bs considerando únicamente los equipos y los sistemas de control necesarios.

RECOMENDACIONES

- Se sugiere realizar un estudio más a fondo relacionado con la adsorción de Vanadio sobre lignina en semicontinuo, implementando un sistema de calentamiento o aumentando el tiempo de contacto de la solución con el adsorbente, de manera de encontrar una forma más eficaz para el proceso.
- Para poder construir la planta diseñada a nivel básico en este trabajo, se debe llevar a cabo la ingeniería en detalle de la misma, la cual depende de un trabajo multidisciplinario que involucre a ingenieros químicos, mecánicos y eléctricos.
- Al momento de construir la planta de adsorción se debe verificar el comportamiento de las curvas de calibración proporcionadas por el fabricante para las bombas de diafragma.
- Durante la puesta en marcha y operación de la planta se recomienda tener presente las medidas de seguridad pertinentes para la manipulación de reactivos y materia prima, las cuales se encuentran en los anexos de este informe.

BIBLIOGRAFÍA

- Adak A., Bandyopadhyay M. y Pal A. (2006) Fixed bed column study for the removal of crystal violet (C.I. Basic Violet 3) dye from aquatic environment by surfactant modified alumina. *Dyes and Pigments*, 69:245-251 p.
- Barrow G. (1964) *Fisicoquímica*. México: Editorial Reverte. 733-756 p.
- Basso M., Cerrella E. y Cukierman A. (2002) Lignocellulosic materials as potencial biosorbents of trace toxic metals from wastewater. *Industrial Engineering Chemistry*, 41:3580-3585 p.
- Calleja G., García F., de Lucas A., Prats D y Rodríguez J. (1999) *Introducción de la ingeniería química*. España: Síntesis. 96-102
- Camacaro J., Fernández J., Ribeiro E. y Pérez N. (2006) Modificación de la lignina y determinación de los parámetros de la cinética de la reacción de adsorción. *Miniproyecto de Ingeniería Química*. Universidad Simón Bolívar, Sartenejas.
- Corripio A. y Smith C. (2004) *Control automático de procesos. Teoría y práctica*. México: Limusa, S.A. 17-26 p.
- Dupont L. y Guillon E. (2003) Removal of hexavalent chromium with a lignocellulosic substrate extracted from wheat Bran. *Environmental Science and Technology*, 37:4235-4221 p.
- Fonseca D. y Delgado A. (2001) *Producción de adsorbentes a nivel de laboratorio a partir de cáscara de arroz para el blanqueo de aceite de maíz*. Trabajo especial de grado. Inédito. Universidad de Carabobo, Valencia.
- Geankoplis C. (1998) *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. México: Compañía Editorial Continental, S.A. 161-174 p.
- Goel J., Kadirvelu K, Rajagopal C. y Garg V. (2005) Removal of lead(II) by adsorption using treated granular activated carbon: Batch and column studies. *Journal of Hazardous Materials*, 125:211-220 p.
- González N. (2005) *Estudio de adsorción de Níquel y Vanadio por ligninas*. Trabajo especial de grado. Inédito. Universidad Simón Bolívar, Sartenejas.

- Hutchins, R. (1973) New method simplifies design of activated carbon systems. *Chemical Engineering*, 80:133-138 p.
- Itriago D. y Pérez N. (2005) Determinación de la capacidad adsorptiva de la lignina sobre metales pesados contenidos en licores ácidos. Miniproyecto de Ingeniería Química. Universidad Simón Bolívar, Sartenejas.
- Jarmer D., Lengsfeld C. y Randolph T. (2006) Scale-up criteria for an injector with a confined mixing chamber during precipitation with a compressed-fluid antisolvent. *The Journal of Supercritical Fluids*, 37:242-253 p.
- Krauter, M. (1992) Estudio sobre la extracción de Níquel y Vanadio de coques de petróleo Venezolanos vía microondas. Trabajo de grado de Licenciatura en Química. Inédito. Universidad Simón Bolívar, Sartenejas.
- Kum H. (1996) Plantas piloto entre el laboratorio y la industria. Trabajo de ascenso. Inédito. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Kumar U. y Bandyopadhyay M. (2006) Fixed bed column study for Cd(II) removal from wastewater using treated rice husk. *Journal of Hazardous Materials*, 129:253-259 p.
- Laboratorio de Carbón y Residuales de Petróleo y Centro de Estadística y Software Matemático. (2005) Revalorización Conjunta de Desechos de la Industria Maderera y Petrolera Vía Desarrollo de Adsorbentes de Actividad Específica y Bajo Costo. Sartenejas: Universidad Simón Bolívar.
- Lalvami S., Hubeer A., Wiltowski T. y Murphy D. (2000) Chromium adsorption by lignin. *Energy Sources*, 22:45-56 p.
- Levine I. (1996) *Fisicoquímica*, 4ta ed, volumen I. México: McGraw-Hill. 430-439 p.
- McCabe W., Smith J. y Harriott P. (1991) *Operaciones unitarias en ingeniería química*. México: McGraw-Hill. 797-820 p.
- Medina D., Ribeiro A. Romero A. y Pérez N. (2006) Efecto de las variables operacionales: acidez inicial, tiempo de residencia y escalamiento sobre la adsorción con lignina de Níquel y Vanadio contenidos en licores ácidos. Miniproyecto de Ingeniería Química. Universidad Simón Bolívar, Sartenejas.

- Ojeda R. y Pérez N. (2005) Efecto de la temperatura sobre la adsorción con lignina de metales pesados contenidos en licores ácidos. Miniproyecto de Ingeniería Química. Universidad Simón Bolívar, Sartenejas.
- Palluzi R. (1992) Pilot plant desing, construction and operation. United States of America: McGraw-Hill. 1-22 p.
- Pearl I. (1967) The Chemistry of lignin. Marell Dekker, United States of America.
- Pérez⁽¹⁾ N., Sánchez M., Rincón G. y Delgado L. (2006) Study of the behavior of metal adsorption in acid solutions on lignin using a comparison of different adsorption isotherms. Latin American Applied Research. Aceptado para publicación, agosto 2006.
- Pérez⁽²⁾ N., Rincón G., Delgado L. y Gonzáles N. (2006) Use of biopolymers for the removal of heavy metals produced by the oil industry a feasibility study. Adsorption. Aceptado para publicación, septiembre 2006.
- Pérez⁽³⁾ N., Rincón G., Guerrero C., Delgado L. y Peña A. (2006) Equilibrium studies and isothermal parameters on adsorption of níkel onto lignin. Proceedings. EQUIFASE 2006, octubre 2006.
- Perry R. (1986) Biblioteca del ingeniero químico, 2da ed. Mexico: McGraw-Hill. 16-13-16-23 p.
- Ralph J., Lundquist K., Brunow G., Lu F., Kim H., Schatz P. Marita J., Hatfield R, Ralph S., Christensen J. y Boerjan W. (2004) Lignins: Natural polymers from oxidative coupling of 4-hidroxiphenylpropanoids. Phytochemistry Reviews, 3:29-60 p.
- Rouchi A. y Washington C. (2001) Only facts will end lignin war. Science and Technology, Vol 79, 14:52-56 p.
- Sarkanen K. y Ludwing C. (1971) Lignins ocurrence, formation, structure and reactions.
- Taty-Costodes V., Fauduet H., Porte C. y Yuh-Shan Ho. (2005) Removal of lead (II) ions from synthetic and real effluents using immobilized Pinus sylvestris sawdust: Adsorption on a fixed-bed column. Journal of Hazardous Materials, 123:135-144 p.

- Turton R., Bailie R., Whiting W. y Shaeiwitz J. (1998) Analysis, synthesis, and design of chemical processes. United States of America: Prentice Hall, Inc. 5-54 p.
- Treybal R. (1988) Operaciones de transferencia de masa, 2da ed. Mexico: McGraw-Hill.625-713 p.
- Walas S. (1990) Chemical process equipment selection and desing. United States of America: Butterworth-Heinemann 19-730 p.
- Zulfadhly Z., Mashitah M. y Bhatia S. (2001) Heavy metals removal in fixed bed column by the macro fungus *Pycnoporus sanguineus*. Environmental Pollution, 112:463-470 p.

ANEXOS

En esta sección se presenta información valiosa empleada para el diseño a nivel básico de la planta piloto de adsorción de metales pesados sobre lignina, considerando aspectos como: las medidas de seguridad de los reactivos, los cálculos del escalamiento, el cálculo tipo del diseño de los equipos, las gráficas y tablas necesarias para el diseño y los cálculos relacionados al costo de inversión para la planta.

A.1. Medidas de seguridad de los reactivos

Esta sección del informe presenta información resumida sobre las sustancias involucradas en la experimentación que de una u otra forma pueden ser peligrosas y causar efectos sobre la salud. Sin embargo, es importante considerar que los efectos de cualquier sustancia tóxica dependen de la dosis, de la duración y forma de exposición así como de la presencia de otras sustancias.

A.1.1. Medidas de seguridad de la lignina

La lignina considerada para la experimentación es una formulación purificada de la lignina Kraft que se encuentra completamente libre de los materiales celulósicos y es ideal para ser empleada en un amplio rango de aplicaciones poliméricas en donde se requiere de sólidos dispersantes o con propiedades de adsorción.

La lignina presenta potenciales riesgos a la salud con entradas al sistema a través de la ingestión, la inhalación y los ojos. Sin embargo, no existen hasta el momento documentos que demuestren una condición médica grave debido a la exposición.

En los ojos puede causar una irritación ligera con inflamación que debe desaparecer después de 48 horas como máximo. Al notar el enrojecimiento se debe lavar

inmediatamente los ojos con abundante agua durante aproximadamente 15 minutos y en caso de persistir la irritación conseguir asistencia médica de inmediato.

La piel en contacto con la lignina podría irritarse superficialmente, como medida de primeros auxilios es recomendable lavar la zona con agua y jabón y enjuagar completamente, de igual forma se recomienda quitarse cualquier prenda contaminada. En caso de desarrollarse la irritación se debe buscar atención médica.

En cuanto a la ingestión no existe ningún riesgo en el uso industrial normal, sin embargo en caso de ocurrir se recomienda beber abundante agua y consultar al médico. Por último, se tiene que para el caso de la inhalación del polvo puede ocurrir la irritación del sistema respiratorio pero sin ningún efecto adverso documentado; como medida de primeros auxilios se recomienda respirar aire fresco, administrar oxígeno en caso de ser necesario y consultar al médico.

La lignina en mezclas aéreas puede ser explosiva, por lo tanto, si el materia se quema, el fuego liberará de la combustión productos que pueden ser tóxicos (SO_2 , CO y CO_2 principalmente) esto implica que se debe evitar la generación y acumulación de polvo, para ello se recomienda el manejo y almacenamiento con condiciones de ventilación adecuadas. Este agente adsorbente debe ser almacenado en lugares frescos y secos, fuera de agentes oxidantes, calor, material combustible y fuentes de ignición.

A.1.2. Medidas de seguridad de las soluciones de Níquel

El Níquel es un elemento natural muy abundante en la naturaleza. Puro es un metal duro, blanco-plateado que puede combinarse con otros metales. Muchos compuestos de Níquel se disuelven fácilmente en agua y son de color verde, no tienen olor ni sabor característicos.

El efecto adverso más común de la exposición al Níquel en seres humanos es una reacción alérgica. Aproximadamente entre un 10 y 15% de la población es sensible a él, esto puede ocurrir cuando hay contacto directo prolongado con la piel. Una vez que una persona se ha sensibilizado al Níquel, el contacto adicional con el metal producirá una reacción, siendo la más común un salpullido en el área de contacto que también puede aparecer en un área lejos del sitio de contacto.

Con menor frecuencia, es posible que la sensibilidad al Níquel ocasione ataques de asma luego de la exposición. Está documentado que de igual forma ocasiona bronquitis crónica, alteraciones del pulmón, dolores de estómago, así como efectos adversos en la sangre y los riñones, siempre que se inhale cantidades de Níquel mucho más altas que los niveles normales ambientales.

El Níquel metálico es carcinogénico y sus compuestos son sustancias reconocidas como carcinogénicas, por lo tanto se recomienda que el agua potable contenga no más de 0,1 miligramos de Níquel por litro de agua (0,1mg/L) y se ha establecido un límite de 1 miligramo de Níquel por metro cúbico de aire (1mg/m³) para Níquel metálico y compuestos de Níquel.

A.1.3. Medidas de seguridad de las soluciones de Vanadio

El Vanadio es un metal blanco grisáceo, que se encuentra generalmente en forma de cristales. En estado puro no tiene olor, permanece largo tiempo en el aire, el agua o el suelo y no se disuelve muy bien en agua.

La exposición a altos niveles de Vanadio puede causar efectos perjudiciales para la salud. Los efectos principales de respirar altos niveles de Vanadio ocurren en los pulmones, la garganta y los ojos tales como: irritación de los pulmones, tos, respiración con resuello, dolor del pecho, secreción nasal y dolor de garganta.

Se recomienda notificar a los organismos competentes de descargas o derrames de Vanadio al medio ambiente. La Administración de Salud y Seguridad Ocupacional (OSHA) ha establecido un límite de exposición en el aire de trabajo de 0,05 miligramos por metro cúbico ($0,05\text{mg}/\text{m}^3$) para polvos de pentóxido de vanadio y de $0,1\text{mg}/\text{m}^3$ para vapores de pentóxido. Por otra parte, el Instituto Nacional de Salud y Seguridad Ocupacional (NIOSH) recomienda que un nivel de $35\text{mg}/\text{m}^3$ de Vanadio sea considerado como de peligro inmediato a la vida y la salud.

A.1.4. Medidas de seguridad del ácido sulfúrico

El ácido sulfúrico es una solución acuosa que presenta potenciales riesgos a la salud, tanto por ingestión, inhalación o contacto. Por tal motivo, es requerido considerar los primeros auxilios en su manipulación y evitar su manejo sin la protección pertinente.

Tras la inhalación es recomendable aire fresco, para el caso de contacto con la piel se recomienda limpiar con abundante agua corriente y despojarse de la ropa contaminada, en caso que se tenga contacto con los ojos se deben aclarar con abundante agua, manteniendo abiertos los párpados y consultar al médico inmediatamente. Si se ingiere ácido sulfúrico, se recomienda beber abundante agua y consultar al médico.

A.1.5. Medidas de seguridad del amoníaco

El amoníaco utilizado es una solución acuosa que representa potenciales riesgos a la salud tales como: sensación de quemazón, tos, dificultad respiratoria y quemaduras por ingestión, inhalación o contacto; es por ello que se requiere la consideración de los primeros auxilios para su manipulación y se recomienda evitar su manejo sin la protección pertinente.

Tras la inhalación se sugiere aire limpio, reposo y atención médica. Para el caso de contacto con la piel se debe aclarar con agua abundante, quitar la ropa contaminada y solicitar atención médica, en caso que se tenga contacto con los ojos se deben aclarar con abundante agua, manteniendo abiertos los párpados y consultar al médico inmediatamente.

Por todo lo anteriormente mencionado, en el manejo de los reactivos a utilizar se deben considerar ciertas medidas básicas de protección personal, en el caso de su manipulación se recomienda la utilización de gafas de seguridad, un delantal o bata que evite la piel expuesta, así como guantes y máscara de protección.

A.2. Aplicación de la teoría de la semejanza

Para el desarrollo de este trabajo se consideró la teoría de la semejanza que es un proceso de escalamiento que permitió transformar dimensiones y flujos desde la escala laboratorio a la escala piloto.

Antes de realizar los cálculos pertinentes para el escalamiento de la planta de adsorción, fue necesario especificar las dimensiones de la planta utilizada durante la experimentación, por tal motivo, se requirió efectuar el cálculo de lecho no utilizado a la escala laboratorio.

A.2.1. Longitud de lecho no utilizado

En esta sección se muestra de forma detallada el cálculo de la longitud de lecho no utilizado, es decir, mediante la utilización de las curvas de ruptura se realizaron los cálculos pertinentes para determinar la altura de lecho de lignina que no se utiliza (lecho muerto).

El cálculo se realizó para la altura de lecho de 0,20m por ser la seleccionada como la más conveniente para el escalamiento y utilizando una solución de Níquel como solución tratada, las curvas de ruptura correspondiente se pueden observar en la figura N°23 del capítulo VII.

El modelo de cálculo a seguir lo describe McCabe (1991) y en éste trabajo se encuentra desarrollado en la sección II.2.6 correspondiente al capítulo de revisión bibliográfica.

- Datos requeridos para el cálculo de la longitud de lecho no utilizado

Para la realización del cálculo de lecho no utilizado se requirió de la siguiente información:

- Velocidad de la zona de transferencia: 6,55cm/h.
- Concentración inicial de la solución: 20ppm.
- Peso molecular de Níquel: 58,693g/gmol.
- Densidad del lecho: 0,4165g/cm³.
- Masa del lecho: 7,631g.
- Altura del lecho: 20cm.
- Diámetro del lecho: 1,08cm.

Una vez que se tienen todos los datos necesarios, se procede a aplicar el modelo de cálculo que permite obtener la altura del lecho no utilizado.

- Velocidad de alimentación de soluto

$$F_A = uoCoM \quad (39)$$

Donde:

F_A : velocidad de alimentación del soluto (g/cm²h).

u_o : velocidad de la zona de transferencia (cm/h).

C_o : concentración inicial de soluto (mol/cm³).

M : peso molecular del soluto (g/gmol).

Sustituyendo en la ecuación se tiene:

$$F_A = (6,55 \text{ cm/h})(0,341 \text{ mol/cm}^3)(58,69 \text{ g/gmol})$$

$$F_A = 131 \text{ g/cm}^2\text{h}$$

- Tiempo ideal de adsorción

El tiempo ideal necesario para adsorber el soluto total viene dado por el área de la curva de ruptura seleccionada, dicha área se calcula a través de la integral evaluada desde el tiempo inicial de la adsorción hasta el tiempo final de ésta.

$$t = \int_a^b (1 - C/C_o) dt \quad (40)$$

Donde:

t : tiempo ideal de adsorción (min).

a : tiempo inicial del proceso de adsorción (min).

b : tiempo final del proceso de adsorción (min).

C/C_o : relación de concentraciones (adim.)

Para la curva de ruptura del lecho de 0,20 m, la relación C/C_o se obtiene mediante el ajuste de los puntos de la curva a un polinomio de grado seis por ser el mejor ajuste posible. Sustituyendo en la ecuación (2) se tiene:

$$t = \int_{0 \text{ min}}^{80 \text{ min}} \left(\begin{array}{l} 1 - (0,6 \times 10^{-9} t^6 - 0,144 \times 10^{-6} t^5 + 0,117 \times 10^{-4} t^4 - 0,416 \times 10^{-3} t^3 + 0,639 \times 10^{-2} t^2) \\ - 0,036 t + 0,0456 \end{array} \right) dt$$

$$t = 215,73 \text{ min}$$

$$t = 3,59h$$

- Cantidad de adsorbente por área de sección trasversal

$$A_T = L_L \rho_L \quad (41)$$

Donde:

A_T : masa de adsorbente por área de la sección transversal del lecho (g/cm^3).

L_T : altura del lecho (cm).

ρ_T : densidad del lecho de adsorbente (g/cm^3).

Sustituyendo se obtiene:

$$A_T = 0,20\text{cm}(0,4165\text{g} / \text{cm}^3)$$

$$A_T = 8,33\text{g} / \text{cm}^2$$

- Carga de adsorbato en el equilibrio

$$W_{sat} = \frac{F_A t}{A_T} \quad (42)$$

Donde:

W_{sat} : carga de adsorbato en el equilibrio (gsoluto/gsolvente).

Reemplazando los valores obtenidos anteriormente se tiene:

$$W_{sat} = \frac{131\text{g} / \text{cm}^2 h(3,59h)}{8,33\text{g} / \text{cm}^2}$$

$$W_{sat} = 56,54\text{gsoluto} / \text{gsolvente}$$

Una vez calculada la carga de adsorbato en el equilibrio se procede al cálculo de la carga de adsorbato en el punto de ruptura, realizando algunos cálculos previos.

- Tiempo de adsorción en el punto de ruptura

Se calcula el área bajo la curva de ruptura mediante la integral utilizando la ecuación (2) pero en este caso considerando como límite inferior el tiempo cero y como límite superior el tiempo correspondiente al punto de ruptura.

$$tb = \int_a^c (1 - C/Co) dt \quad (43)$$

Donde:

tb : tiempo de adsorción hasta el punto de ruptura (min).

c : tiempo correspondiente al punto de ruptura (min).

Como se trata de la misma curva la relación C/Co es igual a la aplicada anteriormente, de esta manera sustituyendo los valores se tiene:

$$t = \int_{0 \text{ min}}^{42 \text{ min}} \left(1 - (0,6 \times 10^{-9} t^6 - 0,144 \times 10^{-6} t^5 + 0,117 \times 10^{-4} t^4 - 0,416 \times 10^{-3} t^3 + 0,639 \times 10^{-2} t^2) \right. \\ \left. - 0,036t + 0,0456 \right) dt$$

$$t = 52,69 \text{ min}$$

$$t = 0,87h$$

- Carga de adsorbato en el punto de ruptura

La cantidad de adsorbato en el punto de ruptura se calcula mediante la ecuación que se muestra a continuación.

$$Wb = \frac{F_A t b}{A_T} \quad (44)$$

Donde:

Wb : cantidad de adsorbato en el punto de ruptura (gsoluto/gsolvente).

Sustituyendo se obtiene:

$$Wb = \frac{131g/cm^2 h(0,87h)}{8,33g/cm^2}$$

$$W_{sat} = 13,81g_{soluto} / g_{solvente}$$

- Fracción de lecho utilizado

Una vez calculada la cantidad de adsorbato tanto en el punto de ruptura como de equilibrio, la relación entre estas dos cantidades representa la fracción de la capacidad de lecho utilizado. Para obtener la fracción de lecho utilizado se aplica la siguiente ecuación:

$$Lu = \frac{Wb}{W_{sat}} \quad (45)$$

Donde:

Lu : fracción de lecho utilizado (adim.)

Sustituyendo se tiene:

$$Lu = \frac{13,18g_{soluto} / g_{solvente}}{56,54g_{soluto} / g_{solvente}}$$

$$Lu = 0,244a \text{ dim.}$$

Por consiguiente, se utiliza un 24,4% de la capacidad,

- Fracción de lecho muerto

La fracción de lecho no utilizado o lecho muerto, es 1 menos la fracción de lecho utilizada, tal como se muestra a continuación.

$$Lm = 1 - Lu \quad (46)$$

Donde:

Lm : fracción de lecho no utilizado (adim.).

Sustituyendo se tiene:

$$Lm = 1 - 0,244a \text{ dim}$$

$$Lm = 0,76a \text{ dim.}$$

Esto quiere decir, que no se utiliza el 76% del lecho, lo que representa una longitud de 15,1 cm. que se supone constante para cualquier otra altura de lecho.

A.2.2. Aplicación de la teoría de la semejanza para el diámetro de lecho a escala piloto

El cálculo del diámetro de lecho para la escala piloto se logra obtener mediante la aplicación de la semejanza mecánica tal como se presentó en la sección VII.3.1. del capítulo de análisis del proceso semicontinuo de adsorción a escala laboratorio y escalamiento.

- Datos requeridos para el cálculo del diámetro de lecho a escala laboratorio

Para la realización del cálculo se requirió de la siguiente información:

- Flujo volumétrico a escala laboratorio: $6 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{h}$.
- Densidad de la corriente de proceso: $995,753 \text{ kg/m}^3$.
- Diámetro de lecho a escala laboratorio: $0,0108 \text{ m}$
- Flujo volumétrico a escala piloto: $0,005 \text{ m}^3/\text{h}$.

- Flujo másico a escala laboratorio

$$m = \rho_{proc} F_v \quad (47)$$

Donde:

m : flujo másico de la corriente de proceso a escala laboratorio (kg/h).

ρ_{proc} : densidad de la corriente de proceso (kg/m³).

F_v : flujo volumétrico de la corriente de proceso a escala laboratorio (m³/h).

Sustituyendo se obtiene:

$$m = (995,753 \text{ kg} / \text{m}^3) (6 \times 10^{-4} \text{ m}^3 / \text{h})$$

$$m = 5,97 \times 10^{-1} \text{ kg} / \text{h}$$

- Área transversal de la columna a escala laboratorio

$$S = \pi \left(\frac{D_{lecho}^2}{4} \right) \quad (48)$$

Donde:

S : área transversal de la columna a escala laboratorio (m²).

D_{lecho} : diámetro de lecho a escala laboratorio (m).

Sustituyendo se obtiene:

$$S = \pi \left(\frac{(0,0108 \text{ m})^2}{4} \right)$$

$$S = 9,161 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

- Flujo másico a escala piloto

$$m' = \rho_{proc} Fv' \quad (49)$$

Donde:

m' : flujo másico a escala piloto (kg/h).

Fv' : flujo volumétrico a escala piloto (m^3/h).

Sustituyendo se tiene:

$$m' = (995,753 \text{ kg} / m^3) (0,005 m^3 / h)$$

$$m' = 4,979 \text{ kg} / h$$

- Área transversal de la columna a escala piloto

$$S' = m' \frac{S}{m} \quad (50)$$

Donde:

S' : área transversal de la columna a escala piloto (m^2).

Sustituyendo se tiene:

$$S' = (4,979 \text{ kg} / h) \frac{9,161 \times 10^{-5} m^2}{5,97 \times 10^{-1} \text{ kg} / h}$$

$$S' = 0,001 m^2$$

- Diámetro de lecho a escala piloto

$$D_{lecho}' = \sqrt{\frac{S'^4}{\pi}} \quad (51)$$

Donde:

D_{lecho}' : diámetro de lecho a escala piloto (m).

Sustituyendo se tiene que:

$$Dlecho' = \sqrt{\frac{(0,001m^2)A}{\pi}}$$

$$Dlecho' = 0,031m$$

A.2.3. Aplicación de la teoría de la semejanza para la altura de lecho a escala piloto

El cálculo de la altura de lecho para la planta a escala piloto se obtiene mediante la aplicación de la semejanza geométrica tal como se presentó en la sección VII.3.1. del capítulo de análisis del proceso semicontinuo de adsorción a escala laboratorio y escalamiento.

- Datos requeridos para el cálculo de la altura de lecho a escala laboratorio

Para la realización del cálculo se requirió de la siguiente información:

- Longitud de lecho a escala laboratorio: 0,20m.
- Diámetro de lecho a escala laboratorio: 0,0108m.
- Diámetro de lecho a escala piloto: 0,03m.
- Altura de lecho a escala laboratorio

$$L' = \frac{L}{Dlecho} Dlecho' \quad (52)$$

Donde:

L' : altura de lecho a escala piloto (m).

L : altura de lecho a escala laboratorio (m).

$Dlecho$: diámetro de lecho a escala laboratorio (m).

$Dlecho'$: diámetro de lecho a escala piloto (m).

Sustituyendo la ecuación se tiene:

$$L' = \frac{0,2m}{0,0108m} \cdot 0,03m$$

$$L' = 0,556m$$

A.2.4. Aplicación de la teoría de la semejanza para la altura de lecho muerto a escala piloto

El cálculo de la altura de lecho muerto para la planta a escala piloto se obtiene mediante la aplicación de la semejanza geométrica tal como se presentó en la sección VII.3.1. del capítulo de análisis del proceso semicontinuo de adsorción a escala laboratorio y escalamiento.

- Datos requeridos para el cálculo del diámetro de lecho a escala laboratorio

Para la realización del cálculo se requirió de la siguiente información:

- Longitud de lecho muerto a escala laboratorio: 0,20m.
 - Diámetro de lecho a escala laboratorio: 0,0108m.
 - Diámetro de lecho a escala piloto: 0,03m.
- Altura de lecho muerto a escala laboratorio

$$Lm' = \frac{Lm}{Dlecho} Dlecho' \quad (53)$$

Donde:

Lm' : altura de lecho muerto a escala piloto (m).

Lm : altura de lecho muerto a escala laboratorio (m).

$Dlecho$: diámetro de lecho a escala laboratorio (m).

$Dlecho'$: diámetro de lecho a escala piloto (m).

Sustituyendo la ecuación se tiene:

$$Lm' = \frac{0,151m}{0,0108m} 0,03m$$

$$Lm' = 0,419m$$

A.3. Cálculos tipo del diseño de los equipos de la planta piloto

En esta sección se presentan de forma detallada los cálculos tipo para el diseño de los equipos requeridos en la planta de adsorción de metales pesados sobre lignina a escala piloto, estos procedimientos involucran las bases y criterios de diseño expuestos en la sección V.3. correspondiente al capítulo de visualización del proceso.

A.3.1. Tuberías

El dimensionamiento de tuberías es un procedimiento que consiste en determinar el diámetro interno de tubería para lograr una velocidad y una caída de presión del fluido que circula a través de ella dentro de un rango recomendado. Sin embargo, en condiciones especiales, pueden requerirse de velocidades que están fuera de los intervalos propuestos por la bibliografía (Walas, 1990).

El cálculo para el dimensionamiento de la tubería de líquido, se realizó considerando la tubería P-11002-SS. Ésta se encarga de transportar el fluido de proceso desde el fondo del tanque de almacenamiento T-1101 al tanque de mezclado M-1101 a una temperatura de 25°C y una presión de 101,4kPa.

Antes de realizar los cálculos que permiten diseñar la tubería se requiere la consideración de la siguiente información sobre la corriente, así como de ciertos criterios mencionados en la sección V.3.1. correspondiente al capítulo de visualización del proceso.

- Datos requeridos para el diseño de la tubería P-11002-SS

A continuación se presenta la información necesaria para el dimensionamiento de tuberías.

- Fracción molar de Níquel: 0,0002adim.
 - Fracción molar de Vanadio: 0,0044adim.
 - Fracción molar de Ácido clorhídrico: 0,026adim.
 - Presión/ Temperatura: 25°C/1atm.
 - Flujo másico: 10,976lb/h.
 - Densidad/ Viscosidad: 62,163lb/ft³/0,8901cP.
 - Material de la tubería: acero inoxidable 316, cédula 40.
 - Caída de presión máxima: 0,6psi por cada 100 pie.
 - Velocidad: 4-6ft/s.
-
- Material de construcción de la tubería P-11002-SS

El material de construcción seleccionado es función de las condiciones de operación y de las características del fluido que circulará por el interior de la tubería. Al considerar que las condiciones de operación de la tubería P-11002-SS son de 27°C y 101,4kPa y además la solución que la atravesará es corrosiva, el material seleccionado es el acero inoxidable 316 de cédula 40, porque requiere de menores costos de mantenimiento en comparación con el acero al carbón y se desempeña satisfactoriamente para dicha aplicación tal como se señaló en la sección VIII.5.1. correspondiente al capítulo de ingeniería básica.

- Dimensiones de la tubería P-11002-SS

En esta sección se presentan los cálculos a seguir para dimensionar las tuberías del sistema (Turton, 1998).

- Diámetro de tubería P-11002-SS

El proceso de cálculo se inicia suponiendo el diámetro de la tubería, para el cual se tomará el valor solución de la tabla N°27 del anexo A.4. correspondiente a los diámetros comerciales para tuberías de acero, de esta tabla se selecciona un diámetro nominal para realizar los cálculos que permiten verificar si con el diámetro seleccionado se cumplen los criterios establecidos para la velocidad y la caída de presión.

- Diámetro interno de la tubería

El diámetro interno es el correspondiente para una tubería de 3/4" de diámetro nominal, de espesor cédula 40.

$$Di_{P-11002-SS} = 0,07\text{pie}$$

Donde:

$Di_{P-11002-SS}$: diámetro interno de la tubería (pie).

- Área de flujo en la tubería

$$Af_{P-11002-SS} = \frac{\pi(Di_{P-11002-SS})^2}{4} \quad (54)$$

Donde:

$Af_{P-11002-SS}$: área de flujo de la tubería (pie²).

Al sustituir se tiene:

$$Af_{P-11002-SS} = \frac{\pi(0,07\text{pie})^2}{4}$$

$$Af_{P-11002-SS} = 0,0038\text{pie}^2$$

- Velocidad lineal

$$U_{P-11002-SS} = \frac{m_{P-11002-SS}}{\rho_{P-11002-SS} Af_{P-11002-SS}} \quad (55)$$

Donde:

$U_{P-11002-SS}$: velocidad lineal (pie/s).

$m_{P-11002-SS}$: flujo másico a través de la tubería (lb/s).

$\rho_{P-11002-SS}$: densidad del líquido que circula a través de la tubería (lb/pie³).

Al sustituir se tiene:

$$U_{P-11002-SS} = \frac{10,97 \text{ lb} / \text{h}}{(62,16 \text{ lb} / \text{pie}^3)(0,0038 \text{ pie}^2)} \left(\frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \right)$$

$$U_{P-11002-SS} = 0,0127 \text{ pie} / \text{s}$$

- Número de Reynolds

$$\text{Re}_{P-11002-SS} = \frac{U_{P-11002-SS} \rho_{P-11002-SS} Di_{P-11002-SS}}{\mu_{P-11002-SS}} \quad (56)$$

Donde:

$\text{Re}_{P-11002-SS}$: número de Reynolds en la tubería (adim.).

$\mu_{P-11002-SS}$: viscosidad del líquido que circula a través de la tubería (lb/pie.s).

Al sustituir se tiene:

$$\text{Re}_{P-11002-SS} = \frac{(0,0127 \text{ pie} / \text{s})(62,16 \text{ lb} / \text{pie}^3)(0,07 \text{ pie})}{0,0006 \text{ lb} / \text{pie.s}}$$

$$\text{Re}_{P-11002-SS} = 92,72 \text{ a dim.}$$

- Factor de fricción de Darcy

El factor de fricción de Darcy se calcula por definición para régimen laminar, es decir, para números de Reynolds menor a 2000 de la siguiente manera:

$$fd_{P-11002-SS} = \frac{64}{\text{Re}_{P-11002-SS}} \quad (57)$$

Donde:

$fd_{P-11002-SS}$: factor de fricción de Darcy en la tubería (adim.).

Al sustituir se tiene:

$$fd_{P-11002-SS} = \frac{64}{92,72a \text{ dim.}}$$

$$fd_{P-11002-SS} = 0,0016a \text{ dim.}$$

- Caída de presión por cada 100 pie de tubería

La caída de presión por cada 100 pie de tubería para líquidos se determina a través de la ecuación de Bernoulli, en la cual se desprecia la cantidad de accesorios así como la diferencia de cotas, para esto se suponen tramos de tubería de 100 pie de longitud.

$$\frac{\Delta P_{P-11002-SS}}{100 \text{ pie}} = fd_{P-11002-SS} \left(\frac{100}{Di_{P-11002-SS}} \right) \frac{(U_{P-11002-SS})^2}{9273,6} \rho_{P-11002-SS} \quad (58)$$

Donde:

$\Delta P_{P-11002-SS} / 100 \text{ pie}$: caída de presión por cada 100 pie de tubería (psi).

Al sustituir se tiene:

$$\frac{\Delta P_{P-11002-SS}}{100 \text{ pie}} = (0,0016a \text{ dim.}) \left(\frac{100}{0,07 \text{ pie}} \right) \left(\frac{0,0127^2 \text{ pie} / \text{s}}{9273,6a \text{ dim.}} \right) 62,16 \text{ lb} / \text{pie}^3$$

$$\frac{\Delta P_{P-11002-SS}}{100 \text{ pie}} = 1,804 \text{ psi}$$

La recomendación general establece que la caída de presión por cada 100 pie de tubería debe ser menor a 4 psi, por lo tanto, los resultados demuestran que este criterio se cumple para la corriente P-11002-SS suponiendo un diámetro nominal de 3/4". Por otra parte, al comparar la velocidad con el criterio de diseño se observa que éste no se cumple, pero aún así se obtiene una tubería que no presenta taponamiento tal como lo demostró el montaje experimental realizado a escala laboratorio.

A.3.2. Bombas

Las bombas requeridas en la planta de adsorción de metales pesados sobre lignina no se diseñaron, únicamente se especificaron y para ello se requirió determinar el tipo de bomba conveniente para el proceso.

Tal como se presentó en la sección VIII.5.2. del capítulo de ingeniería básica, el tipo de bomba conveniente para el proceso es una de diafragma y el procedimiento aplicado para determinar la potencia suministrada de la misma se muestra a continuación al considerar la bomba P-1101.

- Datos requeridos para la especificación de la bomba P-1101

A continuación se presenta la información necesaria para la especificación de la bomba P-1101.

- Tipo de bomba: diafragma.
- Flujo volumétrico de la solución: 5L/h (0,022gpm).
- Diferencia de presión entre la carga y la descarga de la bomba: 40psi.
- Potencia disponible por la bomba seleccionada: 0,0286HP.

- Potencia suministrada de la bomba P-1101

$$P_{P-1101} = \frac{Q_{P-1101} \Delta P_{P-1101}}{Kcv} \quad (59)$$

Donde:

P_{P-1101} : potencia de bombeo (HP).

Q_{P-1101} : flujo volumétrico (gpm).

ΔP_{P-1101} : diferencia de presión entre la carga y la descarga de la bomba (psi).

Kcv : constante de conversión que para el sistema de unidades utilizado tiene un valor de 1.714 (gpm.psi/HP).

Sustituyendo se tiene:

$$P_{P-1101} = \frac{(0,022 \text{ gpm})(40 \text{ psi})}{1.714 \text{ gpm.psi / HP}}$$

$$P_{P-1101} = 0,0005 \text{ HP}$$

A.3.3. Tanques de almacenamiento

En este trabajo se diseñaron tres de estos equipos (T-1101, T-1102 y T-1103), estos son empleados para contener el LIM, el licor a ser sometido al proceso de filtración y el licor obtenido como producto de la etapa de filtración, respectivamente.

Para el diseño de los tanques de almacenamiento se requirió de los siguientes datos básicos:

- Cantidad a ser almacenada, la cual proviene del balance de masa del proceso.
- Relación Largo-Diámetro permitida, que se establece a partir de los criterios de diseño y de las necesidades del proceso.
- Diámetros y alturas comerciales.

Para explicar de forma detallada el procedimiento de cálculo de este tipo de equipo se seleccionó al tanque de almacenamiento T-1101.

- Datos requeridos para el diseño del tanque T-1101

Para el diseño de este recipiente se cuenta con la siguiente información:

- Cantidad almacenada: 5,0kg.
- Densidad del LIM: 722,34kg/m³.
- Relación L/D permitida: entre 3-5adim.

- Material de construcción del tanque de almacenamiento T-1101

El material de construcción es función de las condiciones de operación y de la solución que será almacenada en su interior. Para el caso particular del tanque de almacenamiento es recomendable considerar como material de construcción acero inoxidable 316 de cédula 40; tal como se propone en la sección VIII.5.3. del capítulo de ingeniería básica, porque además de requerir de menores costos de inversión en comparación con el acero al carbón, es más liviano y se desempeña satisfactoriamente para dicha aplicación.

- Dimensiones del tanque T-1101

En esta sección se presentan los cálculos a seguir para dimensionar los tanques de almacenamiento (Walas, 1990).

- Capacidad del tanque

La cantidad a almacenar en el tanque T-1101 se estima a partir de la cantidad de materia prima proporcionada por el proceso aguas arriba de la adsorción (Digestión Ácida Vía Microondas) y al considerar el porcentaje de sobrediseño como medida de

seguridad. Para este caso se estimó un 250% de sobrediseño con el propósito de obtener un tanque que esté en la capacidad de almacenar un poco más del doble de lo que produce el proceso aguas arriba de la adsorción. La capacidad de diseño se obtiene de la ecuación (1).

$$Capd_{T-1101} = Cap_{T-1101} \frac{(100 + Psd)}{100} \quad (60)$$

Donde:

$Capd_{T-1101}$: capacidad másica de diseño del tanque de alimentación (kg).

Cap_{T-1101} : capacidad másica tanque de alimentación (kg).

Psd : porcentaje de sobrediseño para el tanque de alimentación (%).

Sustituyendo se tiene:

$$Capd_{T-1101} = 5,0kg \frac{(100 + 250)}{100}$$

$$Capd_{T-1101} = 17,5kg$$

- Volumen del tanque

$$Vd_{T-1101} = \frac{Cap_{T-1101}}{\rho_{aliment.}} \quad (61)$$

Donde:

Vd_{T-1101} : volumen de diseño del tanque de alimentación (m^3)

$\rho_{aliment.}$: densidad de la alimentación (kg/m^3)

Sustituyendo se tiene:

$$Vd_{T-1101} = \frac{17,5kg}{995,75kg / m^3}$$

$$Vd_{T-1101} = 0,018m^3$$

- Relación Largo-Diámetro

La relación L/D se establece a partir del criterio que señala que ésta debería encontrarse entre 3 y 5, en función de esto, como el tanque de alimentación contendrá la solución que luego será alimentada al tanque de agitación es conveniente establecer una relación de 4.

- Diámetro del tanque

$$D_{T-1101} = \sqrt[3]{\frac{12(V_{T-1101})}{\pi(3(L/D)_{T-1101} + 1)}} \quad (62)$$

Donde:

D_{T-1101} : diámetro del tanque de almacenamiento de la alimentación (m).

$(L/D)_{T-1101}$: relación Largo-Diámetro del tanque de alimentación (adim.).

Sustituyendo se tiene:

$$D_{T-1101} = \sqrt[3]{\frac{12(0,018m^3)}{\pi(3(4)+1)}}$$

$$D_{T-1101} = 0,173m$$

Una vez calculado el diámetro se debe ajustar el resultado a un valor comercial, por lo tanto se aproxima el valor calculado al diámetro inmediatamente mayor que se encuentre dentro de los tamaños comerciales, esto se realiza mediante la utilización de la tabla N°27. Se obtiene que el diámetro comercial es de 8 pulgadas, es decir, el tambor contará con un diámetro interno de 0,203m y un diámetro externo de 0,219m.

- Altura del tanque

$$L_{T-1101} = (L/D)_{T-1101} D_{real_{T-1101}} \quad (63)$$

Donde:

L_{T-1101} : altura mínima del tanque de alimentación (m).

$D_{real_{T-1101}}$: diámetro comercial interno del tanque (m).

Sustituyendo queda:

$$L_{T-1101} = 4(0,203m)$$

$$L_{T-1101} = 0,811m$$

Una vez obtenida la altura mínima se debe ajustar a la siguiente mayor reproducible, por lo tanto se obtiene que la verdadera altura del recipiente es:

$$L_{real_{T-1101}} = 0,82m$$

- Relación Largo-Diámetro comercial

Una vez establecida la altura y el diámetro del tanque según las medidas comerciales se debe establecer la nueva relación para verificar que ésta continúe dentro del rango señalado en los criterios.

$$(L_{real} / D_{real})_{T-1101} = 4,0$$

- Capacidad volumétrica real

$$V_{real_{T-1101}} = \frac{\pi(D_{real_{T-1101}})^3}{12} \cdot (3(L_{real} / D_{real})_{T-1101} + 1) \quad (64)$$

Donde:

$V_{real_{T-1101}}$: capacidad real del tanque de alimentación (m³).

Sustituyendo se obtiene:

$$V_{real_{T-1101}} = \frac{\pi(0,203m)^3}{12} \cdot (3(4)+1)$$

$$V_{real_{T-1101}} = 0,028m^3$$

- Altura máxima de alimentación en el tanque

$$La\ lim_{T-1101} = \frac{4V_{d_{T-1101}}}{\pi(D_{real_{T-1101}})^2} \quad (65)$$

Donde:

$La\ lim_{T-1101}$: altura máxima de alimentación en el tanque (m).

Por lo que sustituyendo se obtiene:

$$La\ lim_{T-1101} = \frac{4(0,028m^3)}{\pi(0,203m)^2}$$

$$La\ lim_{T-1101} = 0,545m$$

Los tanques T-1101, T-1102 y T-1103 se caracterizan por ser simplemente tanques de almacenamiento y no requieren de accesorios.

- Altura de la base del tanque

$$Altbases_{T-1101} = \frac{D_{real_{T-1101}}}{2} + AltSg_{T-1101} \quad (66)$$

Donde:

$Altbases_{T-1101}$: altura de la base del tanque (m).

$AltSg_{T-1101}$: altura de sobrediseño para la altura del base (0,10m).

Sustituyendo se obtiene:

$$Altbases_{T-1101} = \frac{0,203}{2} + 0,10m$$

$$Altbases_{T-1101} = 0,202m$$

A.3.4. Tanques de agitación

Para la planta de adsorción de metales pesados sobre lignina a escala piloto se requiere únicamente un tanque de agitación, éste es el M-1101 el cual tiene la finalidad de mantener constante el pH de la solución que será alimentada a la columna de adsorción.

Geankoplis (1998) presenta las ecuaciones requeridas para el diseño de un tanque agitación. El modelo de cálculo empleado para este equipo es similar al presentado en la sección A.3.3. para el tanque de almacenamiento T-1101, en cuanto a dimensionamiento del tanque se refiere; a partir de esta información se diseñó el impulsor y los deflectores necesarios para cumplir con el objetivo del equipo.

- Datos requeridos para el diseño del tanque de agitación M-1101

Para el diseño de este equipo se cuenta con la siguiente información:

- Cantidad almacenada: 5,0kg.
 - Densidad de la mezcla: 995,75kg/m³.
 - Viscosidad de la mezcla: 8,9x10⁻⁴kg/m.s.
 - Flujo volumétrico: 2,0x10⁻⁷m³/s.
 - Relación L/D establecida: 3adim.
 - Potencia del impulsor: 0,3J/s.
- Dimensiones del tanque de agitación M-1101

Tal como se señaló anteriormente, el diseño de las dimensiones de este tanque de agitación se realiza de forma análoga a la descrita para el tanque T-1101 en la sección A.3.3., para una capacidad de almacenamiento de 5kg y un sobrediseño de 30%, por tal motivo se presentan a continuación los resultados correspondientes a volumen, diámetro interno y altura del tanque de agitación:

- Volumen del M-1101: $0,010\text{m}^3$.
- Diámetro interno: 0,154m
- Altura: 0,5m.

Considerando la descripción del diseño presentada en la sección VIII.5.4. del capítulo de ingeniería básica, se cuenta con la información necesaria para dar paso a los cálculos referentes al impulsor, los deflectores y el tiempo de mezclado.

- Diseño del impulsor y el deflector del tanque de agitación M-1101

Una vez conocidas las dimensiones del tanque de agitación, se procede al diseño del impulsor, de los deflectores y a la estimación del tiempo de mezclado requerido para que el equipo cumpla con las funciones establecidas.

- Diámetro del impulsor

Según indican los criterios de diseño, el diámetro del impulsor se encuentra entre un 30 y un 50% del diámetro del tanque de agitación. Al considerar que el equipo que se está diseñando es para una planta piloto y que además la viscosidad de la solución a agitar es similar a la del agua, se tiene que con un 30% es suficiente para calcular el diámetro del impulsor.

$$d_{M-1101} = 0,3D_{M-1101} \quad (67)$$

Donde:

d_{M-1101} : diámetro del impulsor (m).

D_{M-1101} : diámetro interno del tanque (m).

Sustituyendo se tiene:

$$d_{M-1101} = 0,3(0,154m)$$

$$d_{M-1101} = 0,039m$$

- Velocidad del impulsor

Las velocidades de los impulsores se encuentran en un rango de 400 a 1.750rpm (revoluciones por minuto) para líquidos de baja viscosidad. Para la determinación de la velocidad primero se debe calcular el número de Reynolds y el número de flujo como se muestra a continuación.

- Número de Reynolds

$$N Re_{M-1101} = \frac{d_{M-1101}^2 N_{M-1101} \rho_{M-1101}}{\mu_{M-1101}} \quad (68)$$

Donde:

$N Re_{M-1101}$: número de Reynolds (adim.).

N_{M-1101} : velocidad del impulsor (r/s).

ρ_{M-1101} : densidad de la mezcla en el M-1101 (kg/m^3).

μ_{M-1101} : viscosidad de la mezcla en el M-1101 (kg/ms).

Sustituyendo se tiene:

$$N Re_{M-1101} = \frac{(0,039m)(N_{M-1101})(995,75kg/m^3)}{8,9 \times 10^{-4} kg/ms}$$

$$NRe = (4363,4s/m^3)N_{M-1101}$$

- Número de potencia

$$NP_{M-1101} = \frac{P_{M-1101}}{\rho_{M-1101} N_{M-1101}^3 d_{M-1101}^5} \quad (69)$$

Donde:

NP_{M-1101} : número de potencia (adim.).

Sustituyendo se tiene:

$$NP_{M-1101} = \frac{0,3J/s}{(995,75kg/m^3)(N_{M-1101})^3(0,039m)^5}$$

$$NP_{M-1101} = \frac{3339,24J/kg.s.m^2}{N_{M-1101}^3}$$

Con las ecuaciones 68 y 69 y la figura N°41 se plantea el siguiente proceso iterativo para determinar la velocidad del impulsor:

- Se supone una velocidad para el impulsor.
- Se calcula el número de Reynolds para la velocidad supuesta.
- Empleando la figura N°41 se calcula el número de potencia.
- Con el número de potencia se calcula la velocidad del impulsor despejándola de la ecuación 69.
- Finalmente se compara el valor de la velocidad del impulsor calculado, con la supuesta, si su diferencia es menor a 1r/s (revolución por segundo), entonces se detiene el proceso iterativo, en caso contrario, se supone un nuevo valor y se repite el procedimiento.

Realizando el proceso descrito anteriormente, se obtiene el valor de la velocidad del impulsor en revoluciones por segundo, el número de Reynolds y el número de potencia:

$$N_{M-1101} = 9r / s$$

$$N Re_{M-1101} = 14933,6a \text{ dim.}$$

$$NP_{M-1101} = 5a \text{ dim.}$$

La velocidad del impulsor ayuda a determinar el número de flujo, ésta es la relación entre la velocidad volumétrica de flujo y el diámetro del impulsor y se expresa de la siguiente manera:

$$Nq_{M-1101} = \frac{Q_{M-1101}}{N_{M-1101} d_{M-1101}^3} \quad (70)$$

Donde:

Nq_{M-1101} : número de flujo (adim.).

Q_{M-1101} : flujo volumétrico (m^3/s).

Sustituyendo se tiene:

$$Nq_{M-1101} = \frac{2,0 \times 10^{-7} m^3 / s}{(9r / s)(0,039m)^3}$$

$$Nq_{M-1101} = 0,0004a \text{ dim.}$$

- Amplitud del deflector

La amplitud del deflector se calcula con una relación típica para este tipo de equipos.

$$J_{M-1101} = \frac{1}{12} D_{M-1101} \quad (71)$$

Donde:

J_{M-1101} : amplitud del deflector (m).

Al sustituir se tiene:

$$J_{M-1101} = \frac{1}{12} 0,154m$$

$$J_{M-1101} = 0,0128m$$

- Distancia entre el deflector y la pared

Esta brecha o claro entre los deflectores y la pared del tanque suele ser de 10 a 15% de la amplitud del deflector, para el caso del tanque de agitación M-1101 se considera que será de 15%, de lo cual se obtiene:

$$B_{M-1101} = 0,15J_{M-1101} \quad (72)$$

Donde:

B_{M-1101} : brecha o distancia entre el deflector y la pared (m).

Al sustituir se tiene:

$$B_{M-1101} = 0,15(0,0128m)$$

$$B_{M-1101} = 0,002m$$

- Tiempo de mezclado

Para el tiempo de mezclado se utilizó la figura N°42, para equipos de turbina con deflectores, en la cual con el número de Reynold se ubica el factor del tiempo de mezclado.

$$nt_{M-1101} = 45$$

Donde:

$nt_{M-1101} = 45$: factor de tiempo de mezclado (adim.)

Considerando el factor del tiempo de mezclado se tiene:

$$t_{M-1101} = \frac{nt_{M-1101}}{N_{M-1101}} \quad (73)$$

Donde:

t_{M-1101} : tiempo de mezclado del tanque de agitación M-1101 (s).

Sustituyendo se tiene:

$$t_{M-1101} = \frac{45a \text{ dim.}}{9r / s}$$

$$t_{M-1101} = 5s$$

A.3.5. Columna de adsorción

La columna de adsorción C-1101 es el equipo principal de la planta piloto y para su diseño se consideró como un recipiente a presión en forma de columna cilíndrica que es alimentado por el fondo con un flujo que viaja de forma ascendente a través del lecho fijo que se encuentra en su interior.

Para el diseño de este equipo se consideran los puntos mencionados en la sección VIII.5.5. correspondiente al capítulo de ingeniería básica. Además, para el dimensionamiento de la columna se cuenta con información valiosa obtenida a partir del escalamiento de la planta desde la escala laboratorio a la piloto.

- Datos requeridos para el diseño de la columna de adsorción C-1101

Para el diseño de este recipiente se cuenta con la siguiente información:

- Flujo volumétrico de la alimentación: 5L/h.
 - Diámetro del lecho: 0,031m.
 - Altura del lecho: 0,556m.
 - Diámetro de partícula del adsorbente: 10 μ m.
 - Porcentaje de sobrediseño: 10%.
- Material de construcción de la columna de adsorción C-1101

Para el diseño de los equipos el material de construcción es función de las condiciones de operación y de la solución que estará en contacto con él. Para la columna de adsorción es recomendable considerar como material de construcción el acero inoxidable 316 de cédula 40; tal como se presentó en la sección VIII.5.5. del capítulo de ingeniería básica.

- Dimensiones de la columna de adsorción C-1101

En esta sección se presentan los cálculos a seguir para dimensionar la columna de adsorción (Walas, 1990).

- Diámetro comercial de la columna

Mediante el proceso de escalamiento se determinó que el diámetro del lecho adecuado para la planta de adsorción a escala piloto es de 0,031m. Se considera que éste es el diámetro interno requerido para la columna de adsorción, pero una vez que se ha seleccionado el material, el diámetro debe ser ajustado al valor comercial de tubería que corresponde a una de 1 1/4" con un diámetro interno de 0,035m y uno externo de 0,042m.

$$D_{real_{C-1101}} = 0,035m$$

Donde:

$D_{real_{C-1101}}$: diámetro comercial del tanque (m).

- Altura mínima de la columna

La altura mínima de la columna se determina a partir de la información calculada por el proceso de escalamiento para la longitud del lecho de la planta piloto.

$$L_{C-1101} = L_{Lecho} + Sd_{C-1101} L_{Lecho} \quad (74)$$

Donde:

L_{C-1101} : altura mínima de la columna (m).

L_{Lecho} : altura del lecho (m).

Sd_{C-1101} : porcentaje de sobrediseño (12%).

Sustituyendo se obtiene:

$$L_{C-1101} = (0,556m) + 12\%(0,556m)$$

$$L_{C-1101} = 0,622m$$

Una vez obtenida la altura mínima se debe ajustar a la siguiente altura comercial mayor para obtener la verdadera altura de la columna.

$$L_{real_{C-1101}} = 0,63m$$

Donde:

$L_{real_{C-1101}}$: altura comercial de la columna (m).

- Capacidad de la columna

$$C_{C-1101} = \frac{\pi}{4}(D_{real_{C-1101}})^2 L_{real_{C-1101}} + \frac{1}{6}\pi(D_{real_{C-1101}})^3 \quad (75)$$

Donde:

C_{C-1101} : capacidad de la columna (m^3).

Al sustituir se obtiene:

$$C_{C-1101} = \frac{\pi}{4}(0,035m)^2(0,63m) + \frac{1}{12}\pi(0,035m)^3$$

$$C_{C-1101} = 6,3 \times 10^{-4} m^3$$

- Longitudes de las fracciones de lecho

Las longitudes de las fracciones de lecho se establecen a partir de las consideradas para la experimentación a escala laboratorio.

$$L_{fr_{C-1101}} = P_{fr_{C-1101}} L_{real_{C-1101}} \quad (76)$$

Donde:

$L_{fr_{C-1101}}$: longitud de las fracciones de lecho (m).

$P_{fr_{C-1101}}$: porcentaje de las fracciones de lecho (10%).

Sustituyendo se tiene:

$$L_{fr_{C-1101}} = 10\%(0,63m)$$

$$L_{fr_{C-1101}} = 0,06m$$

- Volumen de los extremos removibles

$$V_{ext_{C-1101}} = \frac{1}{12} \pi (D_{real_{C-1101}})^3 \quad (77)$$

Donde:

$V_{ext_{C-1101}}$: volumen de cada extremo removible (m^3).

Sustituyendo para cada uno de los extremos se obtiene lo siguiente:

$$V_{ext_{C-1101}} = \frac{1}{12} \pi (0,035m)^3$$

$$V_{ext_{C-1101}} = 1,12 \times 10^{-5} m^3$$

- Diámetro de la placa perforada

$$D_{placa_{C-1101}} = D_{real_{C-1101}} + S_{dplaca} D_{real_{C-1101}} \quad (78)$$

Donde:

$D_{placa_{C-1101}}$: diámetro de la placa perforada (m).

S_{dplaca} : sobrediseño para el diámetro de la placa perforada (10%).

Sustituyendo se tiene:

$$D_{placa_{C-1101}} = (0,035m) + 10\%(0,035m)$$

$$D_{placa_{C-1101}} = 0,04m$$

Las placas perforadas se ubican entre la columna y los extremos removibles, de tal forma que al momento de alimentar o desalojar la columna éstas se puedan ser retiradas. Para determinar el diámetro se selecciona un sobrediseño de 10% para asegurar que quede fija con el sistema de seguridad.

Considerando que durante la operación de la planta las placas perforadas estarán acompañadas con fibra de vidrio para garantizar su funcionamiento, bastará con placas que cuenten con un diámetro de perforación de aproximadamente 0,1cm y con tantas perforaciones como sea posible para no aumentar la caída de presión del equipo. Cabe destacar que la placa perforada podría ser sustituida por un juego de mallas de acero que estuvieran en la capacidad de ofrecer el mismo servicio.

En cuanto al sistema de seguridad se seleccionaron 4 tornillos de acero para cada fijar a la columna los extremos, estos tornillos deben tener aproximadamente 0,3cm de diámetro.

A.3.6. Filtro

El filtro requerido para la planta de adsorción no fue diseñado, únicamente se especificó en base a la información establecida por el proceso. Por tal motivo, para la selección del filtro más conveniente a emplear en la planta de adsorción, no se requirió de ningún cálculo, sólo se compararon las condiciones requeridas con las que ofrecen los filtros del mercado, tal como se presentó en la sección VIII.5.6. del capítulo de ingeniería básica.

A.3.7. Tolva

La tolva diseñada es la B-1101, ésta es empleada para contener en su interior la lignina pesada retirada de la columna de adsorción C-1101 y es considerada como un recipiente de almacenamiento abierto a la atmósfera en forma de pirámide truncada invertida.

Para su diseño se consideraron los puntos mencionados en la sección VIII.5.7 del capítulo correspondiente a ingeniería básica.

- Datos requeridos para el diseño de la tolva B-1101

Para el diseño de este recipiente se cuenta con la siguiente información:

- Capacidad de la columna: $6,3 \times 10^{-4} \text{ m}^3$
- Flujo volumétrico de agua de lavado: $6,3 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{h}$
- Diámetro del lecho: 0,031m.
- Porcentaje de sobrediseño: 270%.

- Material de construcción de la tolva B-1101

Para el diseño de la tolva B-1101 se considera como material de construcción el acero inoxidable 316 de cédula 40 por ser resistente al grado de corrosión de la corriente procesada.

- Dimensiones de la tolva B-1101

En esta sección se presentan los cálculos a seguir para dimensionar la tolva almacenadora de lignina pesada.

- Capacidad de la tolva

El cálculo de la capacidad de la tolva involucra la información de la columna de adsorción, puesto que la B-1101 se encargará de almacenar la lignina pesada una vez que se agote.

$$C_{B-1101} = (C_{C-1101} + V_{\text{aguaLav}}) S d_{B-1101} \quad (79)$$

Donde:

C_{B-1101} : capacidad de la tolva B-1101 (m^3).

C_{C-1101} : capacidad de la columna C-1101 (m^3).

$V_{aguaLav}$: volumen de agua de lavado por ciclo (m^3).

Sd_{B-1101} : porcentaje de sobrediseño (270%).

Sustituyendo se tiene:

$$C_{B-1101} = (6,3 \times 10^{-4} m^3 + 6,3 \times 10^{-4} m^3) 270\%$$

$$C_{B-1101} = 3,5 \times 10^{-3} m^3$$

- Longitud de alimentación y base de la tolva

Este es un procedimiento de cálculo iterativo que comienza al suponer la longitud de la base de la tolva y se cierra al comprobar que la capacidad de la tolva calculada es idéntica a la determinada en la sección A.3.7.3.1. de este capítulo.

- Longitud de la alimentación

Antes de realizar el cálculo de la longitud de la zona de alimentación se debe establecer el ángulo de las paredes de la tolva. Se fija un ángulo de 10° ya que éste permite reducir las posibilidades de espacios muertos dentro del equipo, asegurándose así que lo alimentado se almacene en el fondo de la B-1101.

$$\varphi = 10^\circ$$

Donde:

φ : ángulo entre la vertical y la pared de la tolva (grados).

La longitud de la alimentación de la tolva se obtiene a partir de un procedimiento iterativo y para ello se debe fijar la altura de la tolva. Considerando para el diseño una altura de 0,20m se cuenta con una dimensión acorde a los requerimientos del sistema.

$$A_{B-1101} = 0,20m$$

Donde:

A_{B-1101} : altura de la tolva (m).

El cálculo de la longitud de la alimentación es el siguiente:

$$La\ lim = Lbase + 2(A_{B-1101} Tag\varphi) \quad (80)$$

Donde:

$La\ lim$: longitud de la alimentación (m).

$Lbase$: longitud de la base, es un valor supuesto porque el procedimiento de cálculo es un proceso iterativo. Se supone un valor de 0,12m (m).

Sustituyendo se obtiene:

$$La\ lim = 0,12m + 2(0,20Tag10)$$

$$La\ lim = 0,19m$$

- Capacidad de la tolva del proceso iterativo

$$C'_{B-1101} = \frac{A_{B-1101}}{3} \left(La\ lim^2 + Lbase^2 + \sqrt{La\ lim^2 + Lbase^2} \right) \quad (81)$$

Donde:

C'_{B-1101} : capacidad de la tolva del proceso iterativo (m3).

Sustituyendo se tiene:

$$C'_{B-1101} = \frac{0,20m}{3} \left((0,19m)^2 + (0,12m)^2 + \sqrt{(0,19m)^2 + (0,12m)^2} \right)$$

$$C'_{B-1101} = 3,5 \times 10^{-3} m^3$$

Como el valor obtenido para C'_{B-1101} es igual al calculado para C_{B-1101} , el proceso iterativo a finalizado y se tiene ya diseñado el equipo B-1101.

A.4. Tablas y figuras para el dimensionamiento de equipos

En esta sección se presentan las tablas y figuras utilizadas durante el proceso de diseño de los equipos de la planta de adsorción de metales pesados sobre lignina. En la tabla N°27 se muestra los diámetros nominales de tuberías de acero comercial.

Tabla N°27. Diámetros nominales de tuberías de acero comercial. (Walas, 1990).

Diámetro nominal (pulg)	Diámetro exterior (pulg)	Cédula N°	Diámetro interior (pulg)	Área de flujo de la tubería (pulg ²)	área de superficie por pie lineal de tubería (pie ²)		Peso por pie lineal (lb)
					Outside	Inside	
1/8	0,41	40	0,269	0,058	0,106	0,070	0,25
		80	0,215	0,036	0,106	0,056	0,32
1/4	0,54	40	0,364	0,104	0,141	0,095	0,43
		80	0,302	0,072	0,141	0,079	0,54
3/8	0,68	40	0,493	0,192	0,177	0,129	0,57
		80	0,423	0,141	0,177	0,111	0,74
1/2	0,84	40	0,622	0,304	0,220	0,163	0,85
		80	0,546	0,235	0,220	0,143	1,09
3/4	1,05	40	0,824	0,534	0,275	0,216	1,13
		80	0,742	0,432	0,275	0,194	1,48
1	1,32	40	1,049	0,864	0,344	0,274	1,68
		80	0,957	0,718	0,344	0,250	2,17
1 1/4	1,66	40	1,380	1,500	0,435	0,362	2,28
		80	1,278	1,28	0,435	0,335	3,00
1 1/2	1,90	40	1,610	2,04	0,498	0,422	2,72
		80	1,500	1,760	0,498	0,393	3,64
2	2,38	40	2,067	3,350	0,622	0,542	3,66
		80	1,939	2,950	0,622	0,508	5,03
2 1/2	2,88	40	2,469	4,790	0,753	0,647	5,80
		80	2,323	4,230	0,753	0,609	7,67
3	3,50	40	3,068	7,380	0,917	0,804	7,58
		80	2,900	6,610	0,917	0,760	10,30
4	4,50	40	4,026	12,700	1,178	1,055	10,80
		80	3,826	11,500	1,178	1,002	15,00
6	6,63	40	6,065	28,900	1,734	1,590	19,00
		80	5,761	26,100	1,734	1,510	28,60
8	8,63	40	7,981	50,000	2,258	2,090	28,60
		80	7,625	45,700	2,258	2,000	43,40
10	10,75	40	10,020	78,800	2,814	2,620	40,50
		60	9,750	74,600	2,814	2,550	54,80
12	12,75	30	12,090	115,000	3,338	3,170	43,80
16	16,00	30	15,250	183,000	4,189	4,000	62,60
20	20,00	20	19,250	291,000	5,236	5,050	78,60
24	24,00	20	23,250	425,000	6,283	6,090	94,70

En la figura N°41 se muestran los números de potencia para un agitador en función del número de Reynolds y del tipo de agitador considerado.

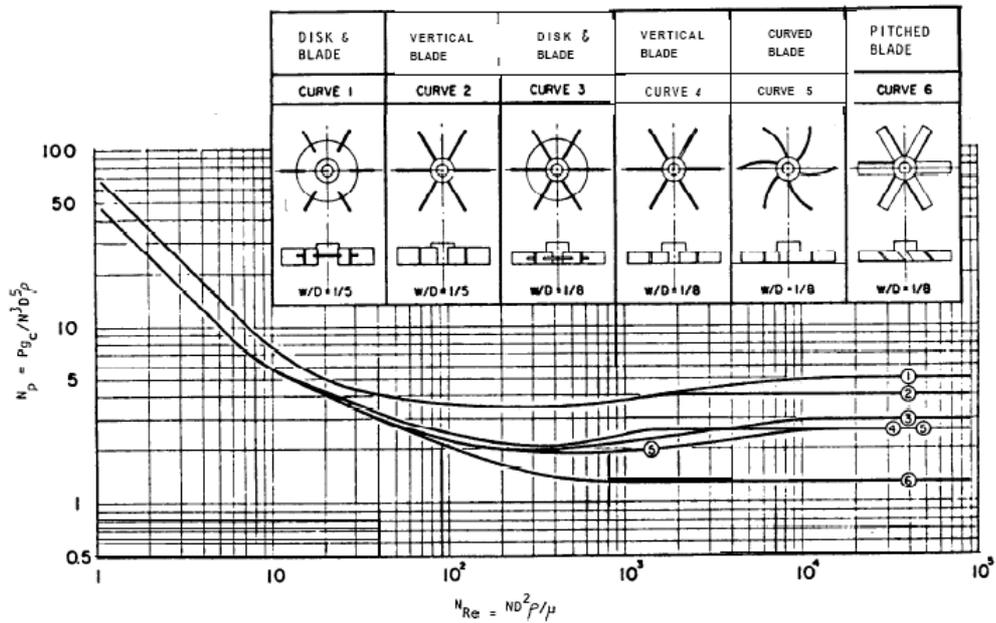


Figura N°41. Número de potencia para un agitador. (Walas, 1990).

En la figura N°42 se presenta la información necesaria para determinar el tiempo de mezclado de un agitador.

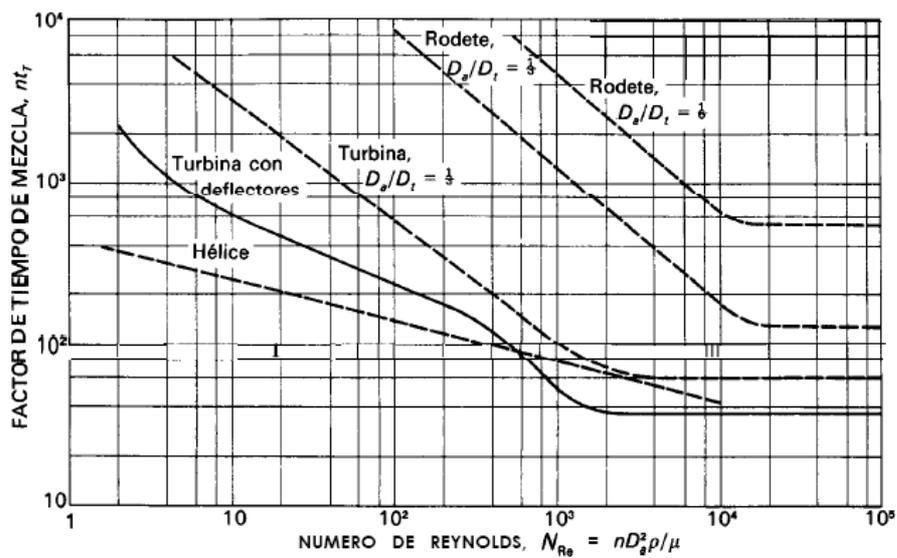


Figura N°42. Tiempo de mezclado de un agitador. (Walas, 1990).