

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURA

PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA

TESIS PRESENTADA PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

DISEÑO DE UN FILTRO HORIZONTAL ROTATORIO PARA APLICACIONES

DIDÁCTICAS EN EL LABORATORIO DE INGENIERÍA QUÍMICA DE LA

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

NELLY JOHANNA SOTO CASTAÑEDA

DIRECTOR (A):

SANDRA MILENA ZAMBRANO

PAMPLONA, COLOMBIA

DICIEMBRE 2016

«Existen dos formas de ver la vida: una es creyendo que no existen los milagros, la otra es creyendo que todo es un milagro».

Albert Einstein

DEDICATORIA

Quiero dedicarle este triunfo en primera instancia

A Dios quien todo lo puede y hace todos los sueños realidad.

Quiero también dedicar este triunfo a mi Madre, a mi Padre,

a mi hermano, a mis familiares, a mis amigos

y a todos aquellos que creyeron en mí

y me apoyaron durante este proceso

Nelly Johanna Soto Castañeda

AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a Dios por ser quien me guió, me acompañó en los momentos en los cuales me sentí desorientada y me dio fuerzas y aliento para seguir adelante.

A mi madre por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, porque siempre estuvo en los buenos y malos momentos, siempre alentándome a seguir adelante y a quien le debo todo lo que soy.

A mi padre, por estar siempre en todo momento apoyándome sin importar nada, gracias por confiar en mí, por los ejemplos de perseverancia y constancia que me ha infundado siempre, por el valor que me ha mostrado para salir adelante y por su amor. A mi hermano, que con su cariño, apoyo y confianza me ha dado la motivación de salir adelante. Gracias por su paciencia, gracias por preocuparse por mí, gracias por compartir sus vidas, pero, sobre todo, gracias por estar en otro momento tan importante en mi vida.

A mi directora de proyecto de grado Sandra Zambrano por ser mi guía, por sus consejos, por tenerme tanta paciencia; por siempre estar ahí ayudándome, y por cada una de sus orientaciones, a todo el personal docente de la Facultad de Ingeniería Química, por todos los conocimientos transmitidos en el transcurso del programa.

A mis amigos y colegas que estuvieron en el transcurso de mi formación y nunca me abandonaron, por su amistad verdadera y leal, por ponerle ese toque de desestrés en lo que fue ésta etapa de vida. Y por último gracias a todas aquellas personas que ayudaron a que este gran esfuerzo se volviera realidad.

Contenido

Resumen	I
1. INTRODUCCIÓN.....	II
2. JUSTIFICACIÓN	IV
3. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....	1
3.1 MARCO TEÓRICO	1
3.1.1 FILTRACION.....	1
3.1.1.1 Componentes del sistema de filtración	1
3.1.1.2 Variables de proceso.....	2
3.1.1.3 Variables de diseño:	3
3.1.1.4 Principales factores que inciden en la selección del filtro:	3
3.1.1.5 Tipos de filtración	5
3.1.1.5.1 Filtración a presión constante	5
3.1.1.5.2 Filtración a velocidad constante.....	6
4.1.1.6 Equipos de filtración	8
3.1.1.7 Medio filtrante	16
3.2 ESTADO DEL ARTE.....	17
4. METODOLOGIA.	20
4.1 SELECCIÓN DEL EQUIPO DE FILTRACIÓN	23
4.1.1 ALTERNATIVA 1: Filtro prensa de marcos y placas.....	23
4.1.2 ALTERNATIVA 2: FILTRO DE TAMBOR ROTATORIO	25
4.1.3 ALTERNATIVA 3: FILTRO ROTATORIO DE DISCOS	28
4.2 ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS.	30
4.3 APLICACIÓN METODO ELECTRE	31
4.2 INFLUENCIA DEL CARBONATO DE CALCIO	33
4.2.1 Ficha de técnica y características fisicoquímicas	33
4.2.2 Desempeño de filtrado y condiciones de optima, solubilidad y admisibilidad .	36
4.2.3 Tamaño de partícula, densidad y volumen de partícula	38
4.2.4 Determinación de carbonato de calcio en la solución filtrada	39
4.4 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE FILTRACIÓN.....	40
4.4.1 Medio Filtrante	40
4.4.2 Capacidad del equipo de filtración.....	45

4.4.3 Condiciones de servicios Industriales requeridos	46
4.5 DIMENSIONAMIENTO DEL FILTRO DE TAMBOR ROTATORIO	54
4.5.1 Diagrama de Bloques.....	54
4.5.2 Condiciones Óptimas de operación y seguridad de proceso.....	55
4.5.3 Dimensionamiento Filtro de tambor rotatorio.....	55
4.5.4 Diagrama Isométrico equipo de filtración.....	57
4.5.5 Diagrama de Flujo del proceso de Filtración.....	57
4.5.6 Diagrama P&ID del proceso de filtración.....	60
4.5.7 Filosofía de control.....	61
4.5.8 DataSheet proceso de filtración	61
4.5.10 Manual de Operación y de Mantenimiento Preventivo y Correctivo.....	63
4.5.11 Análisis de Riesgos (What If).....	64
CONCLUSIONES	66
RECOMENDACIONES	67
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68

LISTA DE FIGURAS Y GRAFICOS

<i>Figura: 1 Diagrama de flujo para filtración continua de vacío</i>	12
<i>Figura: 2 Filtro rotatorio continuo de vacío</i>	14
<i>Figura: 3 Metodología selección equipo de filtración.</i>	20
<i>Figura: 4 Metodología caracterización CaCO₃</i>	20
<i>Figura: 5 Metodología determinación sistema de filtración.</i>	21
<i>Figura: 6 Metodología dimensionamiento filtro</i>	22
<i>Figura: 7 Filtro Prensa de Marcos y Placas.</i>	23
<i>Figura: 8 Filtro de Tambor Rotatorio al vacío.</i>	26
<i>Figura: 9 Filtro Rotatorio de Discos.</i>	28
<i>Figura: 10 Grafico Taza de filtrado vs Tiempo</i>	37
<i>Figura: 11 Grafica Velocidad de aire vs Flujo</i>	48
<i>Figura: 12 Montaje sistema de bombeo</i>	50
<i>Figura: 13. Diagrama de Bloques Sistema de filtración</i>	54
<i>Figura: 14 Figura dimensiones generales tambor</i>	56
<i>Figura: 15 Ángulos secciones de operación</i>	57

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1 Ventajas y desventajas Filtro Prensa</i>	25
<i>Tabla 2. Ventajas y Desventajas Filtro de tambor rotatorio.</i>	27
<i>Tabla 3. Ventajas y Desventajas Filtro Rotatorio de Discos.</i>	29
<i>Tabla 4 Comparación de alternativas.</i>	30
<i>Tabla 5 Ponderación Factores de comparación.</i>	31
<i>Tabla 6 Análisis de Importancia</i>	31
<i>Tabla 7 Matriz de Concordancia</i>	31
<i>Tabla 8 Matriz de discordancia</i>	32
<i>Tabla 9 Relaciones de Dominancias</i>	32
<i>Tabla 10 Caracterización del CaCO₃</i>	33
<i>Tabla 11 Resultados prueba de filtración.</i>	36
<i>Tabla 12 Condiciones generales Filtración de CaCO₃</i>	37
<i>Tabla 13 Especificaciones técnicas CaCO₃</i>	38
<i>Tabla 14 Análisis Medio Filtrante</i>	41
<i>Tabla 15 Variables para definir la fibra necesaria</i>	44
<i>Tabla 16 Especificaciones Medio Filtrante</i>	45
<i>Tabla 17 Servicios Industriales.</i>	46
<i>Tabla 18 Datos de relación Tiempo Velocidad de aire</i>	47
<i>Tabla 19 Especificaciones bomba de alimentación.</i>	51
<i>Tabla 20 Condiciones Óptimas de operación.</i>	55
<i>Tabla 21 Balances de Materia para cada región del proceso</i>	58
<i>Tabla 22 DataSheet Equipos involucrados en el proceso.</i>	62
<i>Tabla 23 Revisión Análisis de Riesgos</i>	64

ANEXOS

<i>Anexo A 1 Planos Tambor Rotatorio Equipo de Filtración.</i>	70
<i>Anexo A 2 Diagrama Isométrico Motor</i>	71
<i>Anexo A 3 Diagrama Isométrico Bomba de Vacío.</i>	72
<i>Anexo A 4 Isométrico Bomba Centrifuga de alimentación Recomendada.</i>	73
<i>Anexo A 5 Diagrama Isométrico Tanques y Agitadores</i>	74
<i>Anexo A 6 Montaje equipo de Filtración.</i>	75
<i>Anexo A 7 Diagrama Isométrico equipo de filtración.</i>	76
<i>Anexo A 8 Diagrama de Flujo del proceso.</i>	77
<i>Anexo A 9 Diagrama de Tuberías e Instrumentación. (P&ID)</i>	78
<i>Anexo A 10 Plot Plant</i>	79
<i>Anexo A 11 Metodología Revisión Análisis de Riesgos.</i>	80
<i>Anexo A 12 Tabla de Análisis What If</i>	81

Resumen

En el presente proyecto se plantea el diseño de un sistema de filtración, el cual involucra un filtro horizontal rotatorio, para su posterior construcción y montaje en el laboratorio de operaciones unitarias, como herramienta didáctica para la capacitación de estudiantes en el ciclo profesional de la carrera de ingeniería química en la universidad de Pamplona.

Para realizar el diseño del sistema de filtración se presenta en primera instancia los estudios que corroboren que el filtro de tambor rotatorio es el más ideal para el sistema, se representan las características físicas, químicas y técnicas del carbonato de calcio como las condiciones de operación que garanticen un proceso de filtración efectivo, se especifican los equipos involucrados en el sistema de filtración, se estipula el balance de materia de todo el proceso y los cálculos necesarios para el dimensionamiento del filtro de tambor rotatorio. Por último se encuentran los diagramas de flujo del proceso, tubería e instrumentación, el manual de operación, el Plot Plant, el estudio de riesgos, el manual de operación del proceso y los planos isométricos del equipo.

Palabras clave: Sistema de Filtración, Dimensionamiento de filtros, Operaciones Unitarias, Diseño de equipos.

1. INTRODUCCIÓN

La filtración es una operación básica que consiste en la separación de partículas sólidas a partir de un fluido a través de un medio filtrante o pared separadora sobre el que se depositan los sólidos. Las filtraciones industriales van desde un sencillo colado hasta separaciones altamente complejas; el fluido circula a través del medio filtrante en virtud de una diferencia de presión a través del medio; por lo tanto, los filtros se clasifican en función de este aspecto en: filtros que operan con presión superior a la atmosférica en la corriente superior del medio filtrante y los que lo hacen con presión atmosférica en la corriente superior del medio filtrante y a vacío en la corriente inferior. (McCabe, Smith et al. 2006).

En todos los filtros continuos de vacío, el líquido es succionado a través de un medio filtrante en movimiento sobre el que se deposita una torta de sólidos. En todo momento una parte del medio filtrante se encuentra en la zona de filtración, otra parte en la zona de lavado y otra en la etapa de descarga de sólidos, de forma que la salida de líquidos y de sólidos se realiza en forma ininterrumpida. (Haataja, Leiviskä, & Uronen, 1986) El tipo más frecuente de filtro continuo de vacío es el filtro de tambor rotatorio son un filtro continuo en donde el componente sólido en una pulpa o una mezcla es separado por una tela filtrante porosa u otros medios girada a través de la pulpa o de la mezcla, con el vacío aplicado a la superficie interna para hacer los sólidos acumular en la superficie como una torta o capa a través de las cuales se dibuje el líquido. Los filtros de tambor del vacío tienen un campo del uso amplio, entre otros en el refinamiento del mineral, hidrometalurgia, industria metalúrgica, química y

farmacéutica, transformación de los alimentos y tratamiento de aguas residuales. (Hutten 2016).

La universidad de Pamplona es una institución de educación superior que desarrolla y presta servicios de alta calidad, para satisfacer las necesidades de la sociedad. (Hale, 2009) Cuenta con laboratorios de operaciones unitarias donde los estudiantes realizan sus prácticas. Sin embargo, una de las limitaciones que afectan los procesos experimentales y los espacios para relacionar la teoría con la práctica es que el Programa de Ingeniería química, aún no cuenta con un equipo donde se desarrollen las experiencias relacionadas con el proceso de filtración. Debido a los argumentos anteriormente planteados, mediante el presente proyecto se pretende realizar el diseño de un sistema de filtración con filtro de tambor rotatorio, para el laboratorio de operaciones unitarias, se presenta en este documento el diseño conceptual para la construcción de este sistema de filtración en él se muestran los diferentes estudios que favorezcan y faciliten su puesta en marcha teniendo en cuenta las mejores condiciones tanto del sistema el general como del compuesto a utilizar.

2. JUSTIFICACIÓN

Las razones asociadas a la selección del tema están relacionadas con la preocupación de los directivos y estudiantes por ampliar los equipos de laboratorio de operaciones unitarias de la facultad de ingeniería química de la universidad de Pamplona. En la actualidad existen equipos en los cuales los estudiantes hacen sus prácticas en diferentes campos como son: transferencia de calor, mecánica de fluidos y transferencia de masa, ayudando así al fortalecimiento de sus conocimientos, con el diseño del filtro de tambor rotatorio, se tendrían mejores oportunidades para que en un futuro los estudiantes puedan rediseñar el equipo y poner en práctica sus conocimientos en otras áreas de la ingeniería química, y así avanzar en este proceso continuo de mejoramiento tecnológico, teórico y práctico.

El proceso de filtración es fundamental para el ingeniero químico en el desempeño de su labor como profesional, ya que es una de las operaciones primarias y una de las más utilizadas por la mayoría de las industrias como lo son las industrias cerveceras, alimenticias, cementeras, entre otras. Por ello, es necesario que en el proceso de aprendizaje de los estudiantes cuenten con un equipo de laboratorio en donde pongan en práctica los conocimientos aprendidos sobre el proceso de filtración.

De igual manera, con base en los lineamientos de la Universidad y acorde con su compromiso social, se considera fundamentales en su acción, la búsqueda constante del conocimiento, innovación, el rigor científico, y la aplicación de los mismos al desarrollo de la comunidad se propone la ejecución de este proyecto sobre el diseño del filtro de tambor rotatorio, esperando así la realización de prácticas por parte de los estudiantes.

La idea de diseñar un filtro de tambor rotatorio se debe a que es un equipo de múltiple aplicación en la industria. Su utilización como separador de sólidos-líquidos y su diseño práctico lo convierten en el complemento apropiado de equipamientos más usados en la industria en general, trabaja continuamente con caudales regulares. (Höflinger & Hackl, 1990) Además, al ser automatizado no requiere de intervención de mano de obra en las diferentes fases de trabajo, y los dispositivos automáticos de control son de bajo costo, el equipo permite ajustar la velocidad de giro del tambor lo que facilita y mejora la filtración permitiendo el refinamiento del mineral así mismo es de bajo costo comparado con los beneficios que brinda. (Montalvo 2011)

3. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

A continuación se incluye una revisión exhaustiva del marco teórico y del estado del arte de diferentes sistemas de filtración usados industrialmente.

3.1 MARCO TEÓRICO

Se incluyen componentes del sistema de filtración, equipos y tipos de filtración así como medios filtrantes más usados en la industria.

3.1.1 FILTRACION

La filtración es una operación unitaria cuya finalidad es la separación de un sólido insoluble que está presente en una suspensión solido-liquido, haciendo pasar dicha suspensión a través de una membrana porosa que retiene las partículas sólidas. (Holdich, 1990) A la membrana porosa se le denomina medio filtrante, mientras que las partículas retenidas en la membrana forman una capa que se llama torta y el líquido que atraviesa la membrana porosa y está exento de sólidos se denomina filtrado. (Calviño, 2006) En la filtración puede ocurrir que la fase deseada sea el filtrado, la torta o ambos. Cuando lo que se desea obtener es la parte sólida, una vez obtenida la torta, esta debe lavarse para eliminar las impurezas que pueda contener. Para obtener el flujo de filtrado a través del medio filtrante se puede operar por simple gravedad, o bien aplicando una presión superior a la atmosférica en la parte anterior del medio filtrante o vacío en su parte posterior, denominándose filtración a presión y filtración a vacío, respectivamente. (Feng, Long, & Yu, 2016)

3.1.1.1 Componentes del sistema de filtración

Usualmente los sistemas de filtración están compuestos por un conjunto de equipos principales como por ejemplo:

- **Tanque de alimentación:** Equipo usado generalmente para almacenar la suspensión a filtrar. (Hutten, 2016b)
- **Filtro.** Está compuesto principalmente por un medio filtrante, este suele ser de materiales sintéticos compuestos a base de fibras entrecruzadas de gran resistencia, las cuales pueden atrapar las partículas a través de mecanismos de bloqueo o de adhesión, son diseñados con geometría plegada. Los mismos no se regeneran, debido a lo anterior, en caso de colmatación deben ser sustituidos. Adicionalmente, con el fin de advertir el momento en que hay que sustituir el elemento filtrante, en qué medida crece la retención de sólidos o prevenir que pasa con la pérdida de carga, el filtro contiene equipos auxiliares como por ejemplo, un agitador, una bomba de vacío, medidor de presión de vacío y un controlador de velocidad de giro del tambor. (Minyuan, 1989)
- **Tanque de almacenamiento.** Equipo usado para el posterior depósito del líquido clarificado. (Osborne, 1976)

3.1.1.2 **Variables de proceso.** Las principales variables de proceso que se deben asegurar son: (Perlmutter, 2015)

- Concentración de sólidos
- Tamaño de partícula
- Temperatura
- pH

- La viscosidad y densidad

3.1.1.3 Variables de diseño:

- Área de filtración
- Caída de presión a través del filtro
- Resistencia del medio filtrante
- Flujo de filtrado
- Cantidad de sólidos retenidos
- Humedad de la torta
- Tiempo de lavado

3.1.1.4 Principales factores que inciden en la selección del filtro:

a) Naturaleza de los sólidos: La filtración involucra la separación de sólidos compresibles e incompresibles, partículas deformables o rígidas de diferentes concentraciones y tamaños, que al depositarse en el medio filtrante, formaran capas de sólidos (torta.)

b) El medio filtrante: Lo fundamental en cualquier filtro es el medio filtrante cuyas características dependen del material del que se fabrica y de las técnicas empleadas en su elaboración, su selección se realiza tomando en cuenta los siguientes puntos: (Richardson's)

- Tamaño mínimo de partícula retenida
- Permeabilidad o resistencia al flujo
- Relación entre oclusión del medio o incremento de resistencia al flujo

- Resistencia al calor, a la acción de productos químicos, a la abrasión, flexión y rotura.
- Estabilidad dimensional
- Facilidad de limpieza.

c) **La fuerza impulsora.** La separación de los sólidos contenidos en un fluido es mediante una fuerza impulsora, de acuerdo a ella los filtros se clasifican en:

Filtros por gravedad. La fuerza impulsora es la presión de la columna de líquido sobre el medio filtrante, un ejemplo es el filtro de arena abierto. (Rushton, 1978)

Filtros a vacío. La fuerza impulsora es la succión del lado de la salida del filtrado por medio de vacío, operan en forma cíclica y continua son ejemplos el filtro de hojas el filtro de tambor rotatorio.

Filtros a presión. La fuerza motriz es la presión dada por la fuerza motriz, un ejemplo es el filtro de placas y marcos o filtro prensa, donde el número de placas y marcos varia con la capacidad del filtro, es un filtro intermitente (Soua, Mouroko-Mitoulou, & Vorobiev, 2004)

Filtros centrífugos. La fuerza impulsora es la centrífuga se usan para separar sólidos de tamaño de partícula muy pequeña o de suspensiones diluidas.

3.1.1. 5 Tipos de filtración

3.1.1.5.1 Filtración a presión constante

Se hace controlando la diferencia de presión de tal modo que se mantenga constante durante todo el proceso; este tipo de filtración puede hacerse de manera fácil si la suspensión a filtrar proviene de un depósito que se mantiene a presión constante. Es de suponerse que manteniendo constante la presión, se irá disminuyendo la velocidad de filtración a medida que esta vaya ocurriendo, debido a que irá aumentando el espesor de la torta y en consecuencia también se incrementara la resistencia de filtración. (Bourcier et al., 2016)

Este tipo de filtración se puede describir con las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta\theta} = \frac{M\mu\alpha}{\Delta P A_{Filtracion}^2 g_c} V + \frac{R_m\mu}{\Delta P A_{Filtracion} g_c} \quad \text{Ecuación 1}$$

Para tortas incompresibles y filtración a presión constante resulta:

$$S = \frac{masa_{sólido}}{masa_{suspensión}} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$S' = \frac{W_{torta\ seca}}{W_{torta\ húmeda}} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$M = \frac{S \cdot \rho_{filtrado}}{1 - \frac{S}{S'}} \quad \text{Ecuación 4}$$

$$K_1 = \frac{M \cdot \mu \cdot \alpha}{A_{filtracion}^2 \cdot g_c} = \frac{S \cdot \rho_{filtrado} \cdot \mu \cdot \alpha}{A_{filtracion}^2 \cdot g_c \cdot \left(1 - \frac{S}{S'}\right)} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$K_2 = \frac{R_m \cdot \mu}{A_{filtracion} \cdot g_c} = \frac{M \cdot \mu \cdot \alpha}{A_{filtracion}^2 \cdot g_c} \cdot V_e = K_1 \cdot V_e \quad \text{Ecuación 6}$$

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta V} = \frac{K_1}{\Delta P} \times V + \frac{K_2}{\Delta P} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

θ : Tiempo

μ : Viscosidad

α : Resistencia específica de la torta

M: masa del sólido referida al filtrado

V_e : Volumen equivalente

3.1.1.5.2 Filtración a velocidad constante

En este tipo de filtración la presión es aumentada gradualmente, utilizando una bomba hasta que la presión de la alimentación en el filtro alcance un valor límite. Esta filtración presenta la desventaja de que al principio, cuando la resistencia es pequeña y se podrían obtener volúmenes grandes de filtrado operando a presiones altas, se trabaja a presiones bajas y con eso disminuye el rendimiento total de filtro. (Sparks & Chase, 2016b)

Para estudiar este tipo de filtración se puede partir de la siguiente ecuación:

$$\Delta P = (V + V_e) \cdot \frac{M \cdot \mu \cdot \alpha}{A_{filtracion}^2 \cdot g_c} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta\theta} \quad \text{Ecuación 8}$$

Si la velocidad de filtración permanece constante $\frac{\Delta V}{\Delta\theta}$ y la torta es incompresible:

$$\frac{\Delta P}{q} = K_1 \times V + K_2 \quad \text{Ecuación 9}$$

$$K_1 = \frac{M \cdot \mu \cdot \alpha}{A_{filtracion}^2 \cdot g_c} = \frac{S \cdot \rho_{filtrado} \cdot \mu \cdot \alpha}{A_{filtracion}^2 \cdot g_c \cdot \left(1 - \frac{S}{S'}\right)} \quad \text{Ecuación 10}$$

$$K_2 = \frac{R_m \cdot \mu}{A_{filtración} \cdot g_c} = K_1 \cdot V_e \quad \text{Ecuación 11}$$

3.1.1.5.3 Tortas compresibles:

Cuando la resistencia específica de la torta no varía con el espesor de la torta, y es independiente de la presión $-\Delta P_t$, la torta se denomina Incompresible. Esto ocurre cuando la torta está formada por partículas sólidas rígidas e indeformables en la que los valores de la porosidad de la torta y superficies específica de las partículas no se ven afectados por la compresión aplicada sobre el lecho. (Sparks, 2012)

En general, las partículas que forman la torta son flexibles y deformables. En ese tipo de tortas, la resistencia al flujo depende de la caída de presión, variando a lo largo de todo el espesor de la torta. Estas tortas se denominan **compresibles**. En este caso la resistencia específica de la torta α varía en todo el espesor de la torta, y se debe utilizar un valor medio para integrar las expresiones anteriores. (Sutherland, 2009b)

Existen fórmulas empíricas que permiten calcular la resistencia específica de la torta α . Una de ellas es de la relación de Almy - Lewis:

$$\alpha = \alpha_0 \times \Delta P^n \quad \text{Ecuación 12}$$

En la que α_0 es la resistividad específica de la torta cuando no existe caída de presión, n es el factor de compresibilidad, cuyo valor está comprendido entre 0,1 y 1, correspondiendo los valores mayores a las tortas más compresibles. Se supone que n es independiente de la presión, aunque en realidad se ha comprobado que existe cierta dependencia.

Los valores de α_0 y n deben obtenerse experimentalmente, a partir de medidas de α con una caída de presión en la torta conocida, y representando en papel doble logarítmico los pares de valores α y ΔP_t correspondientes. La pendiente de la recta ajustada será el valor del factor de compresibilidad n , mientras que la ordenada en el origen permite obtener el valor de α_0 .

4.1.1.6 Equipos de filtración

La filtración a escala industrial va desde el simple colado hasta separaciones muy complejas. El fluido puede ser líquido o gas, las partículas sólidas pueden ser gruesas o finas, rígidas o plásticas, redondas o alargadas, individualidades separadas o agrupaciones, etc. La suspensión de la alimentación puede ser de alta o baja concentración de sólidos, puede estar fría o caliente, y someterse a vacío o a alta presión. Todavía se complica más si se tiene en cuenta que unas veces es el fluido la fase valiosa, a veces lo es el sólido, y otras ambos a la vez. En algunos casos la separación ha de ser total y completa y en otros solo parcial. (Kuzmina & Osipov, 2016)

Por tanto, se han desarrollado numerosos tipos de filtros para resolver cada caso determinado.

Una primera clasificación de los mismos pudiera ser en:

- a) **Coladores**, (rejilla metálica en un canal de flujo)
- b) **clarificadores**, (también para pequeñas cantidades de sólidos que generalmente se desechan)

c) **filtros de torta**, (para gran cantidad de sólidos, provistos a veces con dispositivos para lavarlos)

d) **espesadores de filtro**, (su misión es separar algo del líquido claro y producir una suspensión más concentrada). (Sparks & Chase, 2016a)

Otra clasificación pudiera hacerse en aquellos que funcionan a presión, (por gravedad, debido a una altura de líquido, por una bomba o por fuerza centrífuga) o a vacío. También podemos clasificar entre filtros continuos, (descarga de sólidos y líquido ininterrumpida) y discontinuos, (la operación se interrumpe periódicamente para separar los sólidos depositados). (Sutherland, 2009a)

En cualquier caso, habrá que elegir el más adecuado, que será aquel que cumpla las necesidades con un coste mínimo; generalmente, interesará un área mínima o una velocidad de filtración alta.

Los factores más importantes para la selección de un filtro son:

- a) resistencia específica de la torta filtrante
- b) la cantidad de suspensión a filtrar
- c) la concentración de sólidos en la suspensión
- d) la facilidad de descarga de la torta formada. (Aguilar, 1997)

Una clasificación más importante de los filtros es la siguiente:

1). Filtros discontinuos:

- **Filtros abiertos a presión**, (de gravedad, filtro prensa);

2.) Filtros de hojas.

- **Filtros continuos:**
- **rotatorios**, (de tambor o discos)

- **otros**, tales como Prayon, de cinta horizontal, cartuchos filtrantes, etc.; C) Filtración en centrífugas, de modo que la fuerza impulsora la proporciona el movimiento centrífugo. (Sutherland, 2010)

3). Filtros de lecho, (o de arena): Son ejemplos de la filtración en profundidad, en el que las partículas penetran en los intersticios del lecho filtrante, quedando atrapadas. Se usan para depuración de aguas urbanas y tratamiento de aguas residuales con muy bajos contenidos en sólidos. El lavado de estos lechos ha presentado problemas, haciéndose un retro lavado, con flujo en sentido inverso de aire seguido de agua. (Serrano, 2013)

4) Filtros prensa: Se utilizan cuando se desean filtraciones más rápidas. Se construyen en dos formas: prensa de placas y marcos, y prensa de placas rebordeadas o cámaras. (Lee, Sohn, & Park, 2015)

A) Filtros prensa de placas y marcos: En ellos no se alcanza la caída de presión constante desde el principio de la filtración, sino que hay un periodo de filtración a caudal constante al comienzo de la misma. Son una serie de placas y marcos alternos soportados por un par de raíles; las placas tienen una superficie acanalada o estriada. El marco hueco está separado de la placa por una tela filtrante y la prensa se cierra por medio de un tornillo manual o hidráulico. Entre cada par de placas se forma por tanto una cámara. La suspensión se introduce por un orificio del marco y el filtrado pasa a través de la tela de cada lado, de modo que se forman dos tortas en cada cámara. El filtrado circula hacia abajo por la superficie de las placas y se descarga a través de un grifo. Puede inspeccionarse el filtrado de cada placa, pudiéndose aislar una de ellas, si se estropea o aquel no resulta claro. En algunos se provee la calefacción por vapor. (Hutten, 2016a)

B) Filtro prensa de cámaras: Similar al anterior pero se prescinde de los marcos, y las cámaras individuales están formadas entre placas sucesivas. Por tanto, el espesor de la torta

no puede variarse. El canal de alimentación generalmente difiere del anterior, siendo por el centro.

En estos dos casos se han obtenido mejoras muy importantes: grandes unidades, materiales nuevos y más ligeros, mayores presiones y grado de automatización, escurrido más completo que facilita el posterior lavado, etc. (Hutten, 2016a)

5) Filtros de hojas: En ellos, la caída de presión constante se alcanza desde los primeros instantes de la filtración. Son apropiados para tratar grandes volúmenes de suspensión, de modo que, para la misma capacidad que un filtro prensa, ocupan menos espacio. Los hay de diferentes tipos: filtro Moore, Kelly, Sweetland, Vallez, Niágara, (verticales u horizontales), etc., dependiendo del tipo de hojas, la mayor o menor uniformidad y facilidad de separación de la torta, la facilidad de lavado y la instalación de la tela.

En ellos, cada hoja está rodeada de la tela filtrante de modo que la torta queda depositada en el exterior y el líquido claro pasa al interior, bien por vacío o por presión. (Sparks & Chase, 2016b)

6) Filtros rotatorios continuos de vacío: En todos los filtros continuos de vacío, el líquido es succionado a través de un medio filtrante en movimiento sobre el que se deposita una torta de sólidos. La torta se aleja de la zona de filtración, se lava, se seca por aspiración y se descarga del medio filtrante para reiniciar el ciclo con la entrada de otra carga de sólidos en suspensión. En todo momento una parte del medio filtrante se encuentra en la zona de filtración, otra parte en la zona de lavado y otra en la etapa de descarga de sólidos, de forma que la salida de líquidos y de sólidos se realiza en forma ininterrumpida. La presión diferencial a través del medio filtrante de un filtro de vacío continuo no es elevada y normalmente está comprendida entre 250 y 500 mm de Hg. Los distintos diseños de filtros

difieren en la forma en la que se introduce la suspensión, la forma de la superficie filtrante y la manera en la que se descargan los sólidos. Sin embargo, la mayor parte de ellos aplican vacío desde una fuente estacionaria para accionar las partes de la unidad por medio de una válvula rotatoria. (McCabe, Smith, & Harriot, 2006)

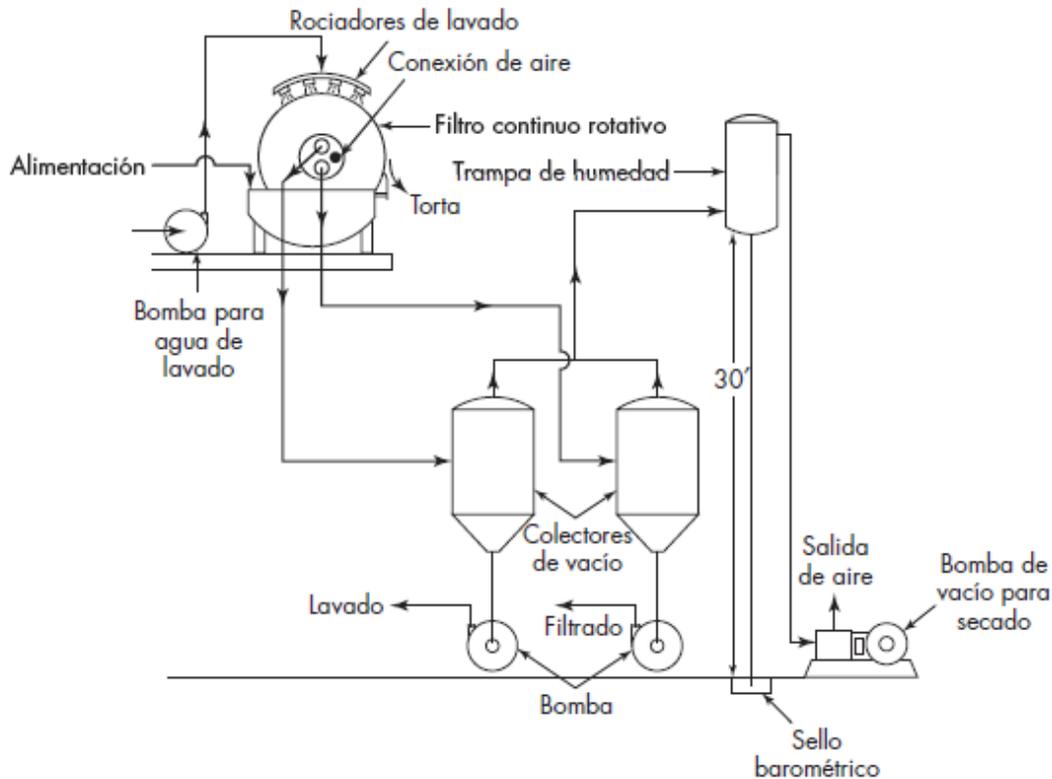


Figura: 1 Diagrama de flujo para filtración continua de vacío. Fuente: (McCabe et al., 2006)

A) **Filtro de tambor:** El tipo más frecuente de filtro continuo de vacío es el filtro de tambor rotatorio que se representa en la figura 4.2. Un tambor horizontal, con una superficie acanalada, gira con una velocidad de 0.1 a 2 rpm en un depósito con la suspensión agitada. Un medio filtrante, tal como una lona, cubre la superficie del tambor, que está sumergido parcialmente en el líquido. Debajo de la superficie cilíndrica acanalada del

tambor principal se encuentra un segundo tambor más pequeño con una superficie sólida. Entre los dos tambores existen separaciones radiales que dividen el espacio anular en compartimentos separados. Los filtros rotatorios se utilizan principalmente en los tratamientos primarios, o donde se requiera remover sólidos grandes o gruesos, de manera rápida y a un bajo costo de operación, ya que estos pueden causar obstrucciones en los ductos, por lo tanto, estos filtros son muy útiles en diferentes industrias como: Azucarera, Vinícola, Alimenticia, Minería, Cementera, Plantas de tratamiento de aguas residuales, Plantas procesadoras de alimentos entre otras. (T. Sivakumar*)

Existen numerosas variantes comerciales de filtros de tambor rotatorio. En algunos diseños no existen compartimentos en el tambor, y el vacío se aplica a toda la superficie interior del medio filtrante. El filtrado y el líquido de lavado se retiran conjuntamente a través de una tubería sumergida; los sólidos se descargan inyectando aire a través de la lona desde un sistema estacionario situado dentro del tambor, hinchando la tela filtrante y desprendiendo la torta. En otros modelos la torta se desprende de la superficie filtrante por un conjunto de cuerdas paralelas muy juntas, o bien separando la tela filtrante de la superficie del tambor y haciéndola pasar alrededor de un rodillo de diámetro pequeño.

El cambio brusco de dirección que provoca este rodillo da lugar a que se desprendan los sólidos. La tela puede lavarse a medida que retorna desde el rodillo hasta la cara inferior. Este tipo de filtro cuenta con cuatro fases de trabajo: formación de torta, lavado, secado y descarga. (McCabe et al., 2006)

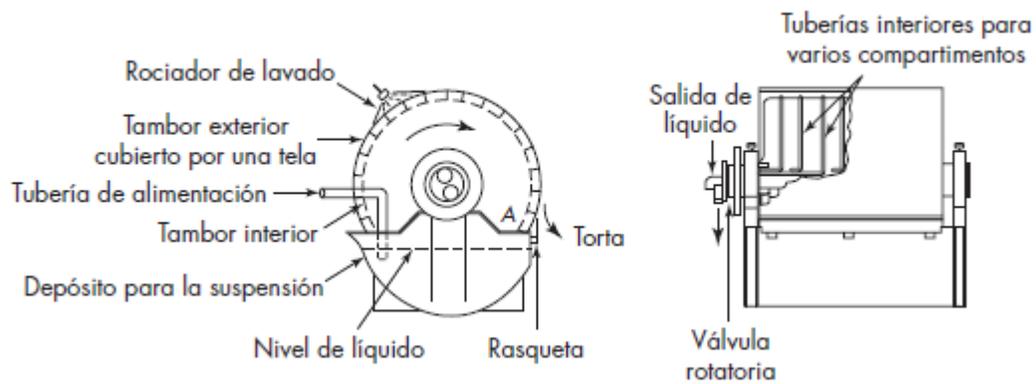


Figura: 2 Filtro rotatorio continuo de vacío Fuente: (McCabe et al., 2006)

La caída de presión durante la formación de la torta se mantiene constante. Por tanto, las anteriores ecuaciones para la filtración discontinua a presión constante se pueden aplicar a los filtros continuos introduciendo algunas modificaciones. (McCabe et al., 2006)

Tiempo real de filtrado:

$$t = \frac{K_c V^2}{2} + \frac{V}{q_o} \quad \text{Ecuación 13}$$

Despejando V

$$V = \frac{(1/q_o^2 + 2K_c t)^{1/2} - 1/q_o}{K_c} \quad \text{Ecuación 14}$$

Sustituyendo los valores $1/q_o$ y K_c

Ecuación 4.14

$$\frac{V}{tA} = \frac{\left[\left(\frac{2\Delta P g_c c \alpha}{\mu t} \right) + \left(\frac{R_m}{t} \right)^2 \right]^{1/2} - \frac{R_m}{t}}{\alpha}$$

La Ecuación puede escribirse en función de la velocidad de producción de sólidos, y de las características del filtro.

$$\dot{m} = c \left(\frac{V}{t} \right) \quad \text{Ecuación 15}$$

- Con ciclos de tiempos cortos

$$\frac{\dot{m}}{A_t} = \frac{\left[\left(\frac{2c\alpha\Delta P g_c f n}{u} \right) + (nR_m)^2 \right]^{1/2} - nR_m}{\alpha} \quad \text{Ecuación 16}$$

- Para una torta incomprensible

$$\frac{\dot{m}}{A_t} = \left(\frac{2c\alpha\Delta P g_c f n}{\alpha\mu} \right)^{1/2} \quad \text{Ecuación 17}$$

- Para una torta comprensible

$$\frac{\dot{m}}{A_t} = \left(\frac{2c\alpha\Delta P^{1.5} g_c f n}{\alpha_o\mu} \right)^{1/2} \quad \text{Ecuación 18}$$

B) Filtro de discos: Similares a los anteriores, sólo que tienen un cierto número de hojas filtrantes dispuestas sobre un eje. Proporcionan peor lavado que el anterior y la descarga de la torta es más difícil, pero ofrecen un área mucho mayor.

Otros filtros continuos: Los hay de muchos otros tipos: a) Filtro de cinta horizontal: son a vacío, tienen una banda sobre dos poleas, la suspensión encima y escurre el filtrado; b) Filtro Prayon: Filtro a vacío para líquidos corrosivos con células horizontales sobre un marco giratorio. c) Cartuchos filtrantes: Serie de anillos sobre un eje central que se usan para líquidos con pequeñas cantidades de sólidos en suspensión, etc.

3.1.1.7 Medio filtrante

Medio filtrante es un término utilizado para describir cualquier material utilizado para filtrar partículas de la corriente de flujo de un fluido. Cada filtro se fabrica con el medio filtrante apropiado para brindar la protección necesaria para la aplicación para la cual se diseñó.

3.1.1.7.1 Medio filtrante de celulosa El medio filtrante de celulosa o pulpa de madera se ha utilizado en la filtración de motores desde el comienzo. Las fibras de celulosa son de forma irregular y tienen poros más pequeños. Los poros más pequeños del medio filtrante producen más resistencia al flujo, lo cual significa clasificaciones de eficiencia más baja. El medio filtrante de celulosa tiende a acumular contaminante en la superficie debido a la configuración de los poros. La celulosa puede brindar una filtración efectiva, pero en ciertas aplicaciones se prefieren otros tipos de medio filtrante.

3.1.1.7.2 Medio filtrante sintético Las fibras del medio filtrante sintético son delgadas y lisas, lo cual produce menos restricción en comparación al medio filtrante de celulosa. La forma uniforme de las fibras permite a los ingenieros utilizar el medio filtrante con el tamaño y configuración de fibras apropiados para crear la trayectoria de flujo con la menor resistencia posible. El medio filtrante sintético tiende a capturar contaminante en toda la profundidad del medio, lo cual permite una mayor capacidad de retención de contaminante.

3.1.1.7.3 Medio filtrante combinado Algunas veces una aplicación requiere las características del medio filtrante de celulosa y del medio filtrante sintético; por lo tanto, se combinan ambos. Con el medio filtrante combinado, las características del medio filtrante de celulosa y del medio filtrante sintético se combinan para crear un medio que acomoda la eficiencia y la capacidad de retención de contaminante del filtro.

3.2 ESTADO DEL ARTE

En primera instancia se reseña la tesis realizada por Ángel Esteban Lázaro Acuña y Víctor Ramón Barrera Marzola, “Evaluación técnica-económica del sistema de filtración para Disóleo de alto contenido de BS&W de la empresa terminal de líquidos de barranquilla TEIBA S.A.”, de la universidad de San Buenaventura de Cartagena, elaborada en febrero del 2010. En esta tesis se realiza el dimensionamiento del equipo de filtración después de haber establecido las condiciones de operación tales como: temperatura, caída de presión, cantidad de materia a filtrar, entre otros. De igual manera, la principal conclusión encontrada que en los cálculos de diseño del filtro es un factor importante tener en cuenta un tamaño promedio de partícula de los sedimentos presentes en el Disóleo y la temperatura del fluido dentro del

filtro, debido al efecto que ésta presenta en la viscosidad y velocidad de filtración de la acumulación de sólidos incompresibles que actúan como medio filtrante al formarse la torta.

Otra tesis relacionada es “Diseño de banco de pruebas para placas de filtración de polietileno de ultra alto peso molecular”, presentada en enero de 2007 por Marco Antonio Etcheberrigaray Torres, para obtener el título de Ingeniero Mecánico, en la Universidad de Chile. En esta investigación se revisaron varios aspectos a tener en cuenta para el diseño de un sistema de filtración, siendo los más relevantes: el carácter de la suspensión, nivel de producción deseado, las condiciones de proceso y los materiales de fabricación.

La tesis “diseño de una unidad de filtración de agua de formación de pozos petroleros”, presentada por Julio Santiago Medina Rosero y Gabriel Alejandro Miranda Almeida, para la escuela politécnica nacional de Ecuador, 2007. Una de las principales conclusiones a las que llegaron, están relacionada con las condiciones más críticas para el diseño de la unidad de filtración, que se relacionan directamente con sus requerimientos operacionales (caudal, presión, tamaño de partícula en suspensión, calidad del agua a la salida del proceso de filtrado, entre otros.); y también que las variables principales que se manejan en un sistema de filtrado, inciden directamente en la selección del medio de separación, pero además, factores como la corrosividad del agua, limitan la gama de elementos disponibles para conformar el sistema de filtrado.

También se encuentra la tesis, “Diseño de un sistema de filtración para la potabilización de agua en el municipio de Turbana-Bolívar”, presentada por Leandro Hernández D., para la universidad de San Buenaventura de Cartagena, 2007. Donde llego a establecer unas recomendaciones generales de operación y mantenimiento de plantas de tratamientos que van enmarcadas en los principios de operación, de mantenimiento, parámetros de control de

operación, entre otros. De igual forma, se llegó a diferentes conclusiones, de las cuales se tuvieron en cuenta que el filtro de tasa declinante es uno de los más económicos y de fácil mantenimiento, que en un filtro dual se incrementa la tasa de filtración y se mejora la calidad del efluente, y por último el agua analizada proveniente de sedimentadores es aceptable, ya que se encuentra dentro de los parámetros establecidos en el decreto 475/98.

Y por último, está la tesis “desarrollo de una planta para producir sulfato de sodio a partir de sulfato de calcio, subproducto en la producción de fertilizantes nitro-fosfatados”, presentada por los estudiantes Neyis Yances Ayola y Adalberto Matute Thowinsom, para la Universidad del Atlántico, Barranquilla, 1984. Ellos, en el diseño de la planta, incluyeron un filtro de tambor rotatorio, el cual fue diseñado teniendo en cuenta las condiciones a las que operaría la planta. Establecieron que las dimensiones de la mayor parte de los quipos, incluyendo el filtro de tambor rotatorio, son dimensiones correspondientes a plantas en escala de planta piloto.

En síntesis, en estas investigaciones se analizaron parámetros como el caudal, presión, temperatura, tamaño de partícula, entre otros., que son fundamentales para tener en cuenta en el diseño de las partes que conforman el sistema de filtración: tambor, bomba, válvulas entre otros, en las tesis y proyectos realizados anteriormente se puede observar que las investigaciones se enfocan más en las suspensiones a tratar que en mismo proceso de filtración.

4. METODOLOGIA.

Con el fin de seleccionar el equipo de filtración más adecuado, se estableció la siguiente metodología mostrada en la figura 3.

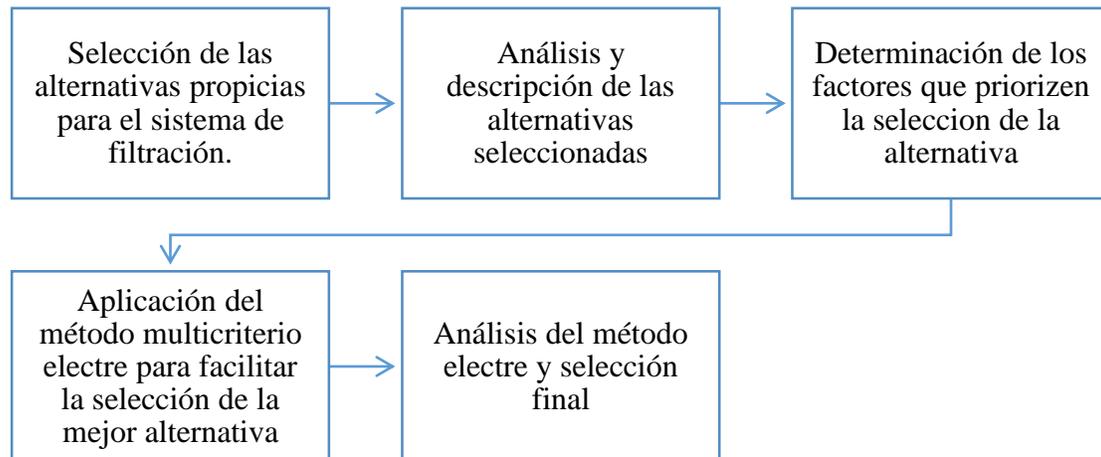


Figura: 3 Metodología selección equipo de filtración.

Para realizar la caracterización de la suspensión a tratar, se estableció la metodología mostrada en la figura 4.

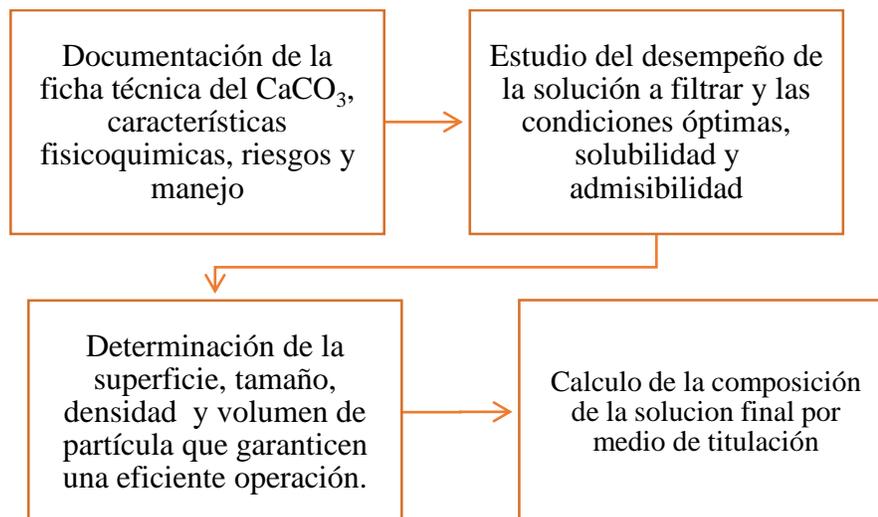


Figura: 4 Metodología caracterización CaCO3

La metodología usada para la determinación del equipo de filtración se estableció de acuerdo a la figura 5

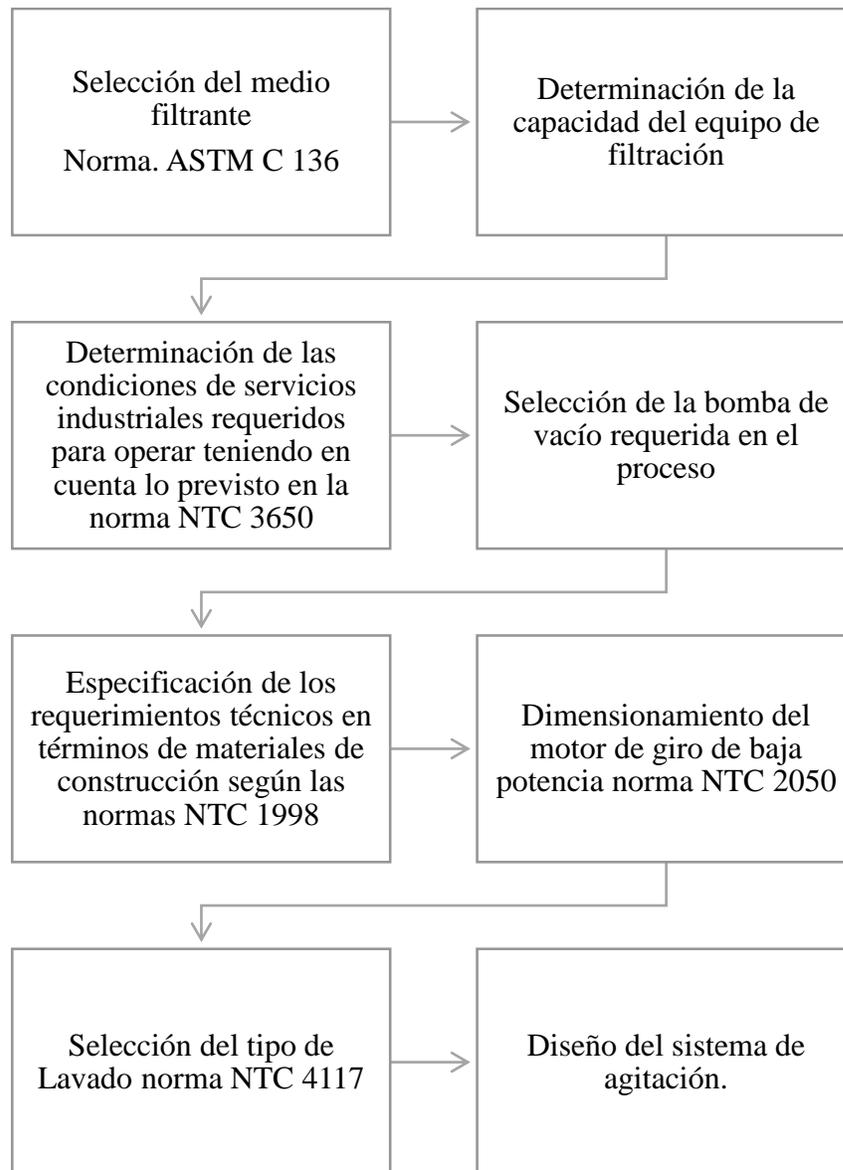


Figura: 5 Metodología determinación sistema de filtración.

Finalmente, para el dimensionamiento del filtro seleccionado, se estableció la siguiente metodología mostrada en la figura 6

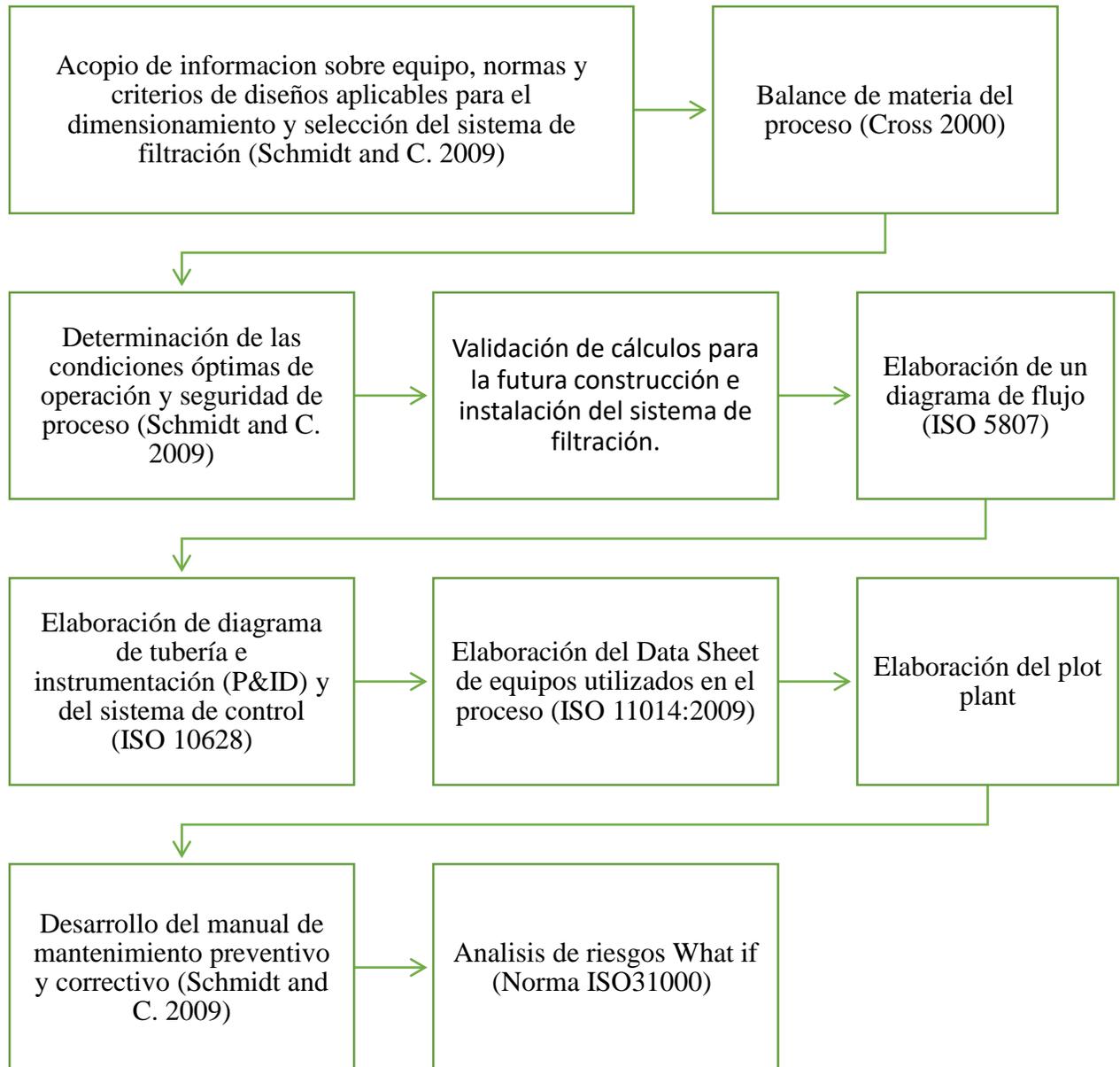


Figura: 6 Metodología dimensionamiento filtro

4.1 SELECCIÓN DEL EQUIPO DE FILTRACIÓN

Para evaluar qué equipo de filtración es el más idóneo para las condiciones de proceso y suspensión a filtrar, se realiza una comparación de tres alternativas viables y su posterior evaluación usando el método Electra. A continuación se describe cada una de las alternativas estudiadas y finalmente se desarrolla la metodología Electra.

4.1.1 ALTERNATIVA 1: Filtro prensa de marcos y placas

DESCRIPCIÓN. El filtro de prensa de placas y marcos es el diseño más fundamentales entre todos los filtros prensa, está constituido por muchas placas y marcos y cuenta con la presencia de una bomba centrífuga, las cámaras de separación consisten en un marco de filtro hueco separado de dos placas de filtro por tela de filtro, (Ver figura 7).

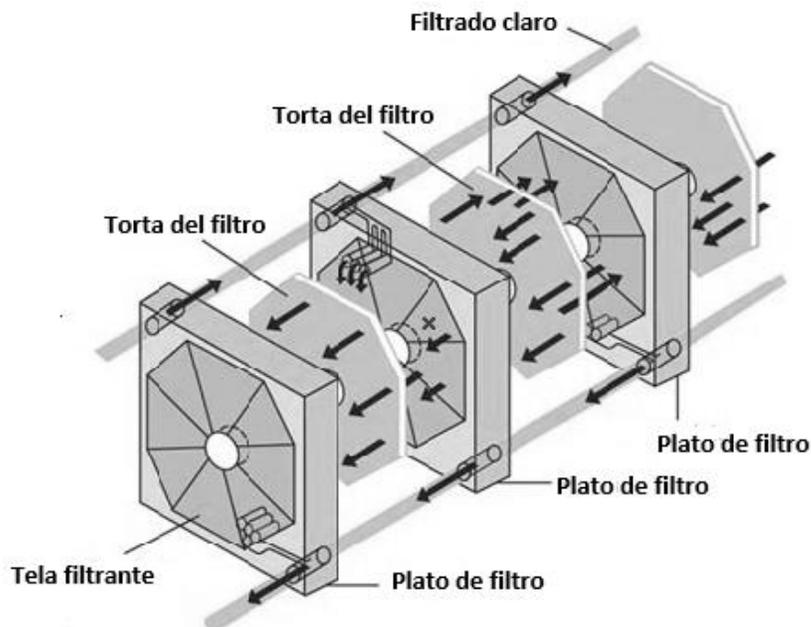


Figura: 7 Filtro Prensa de Marcos y Placas. Fuente: Fernando Concha

La suspensión introducida fluye a través de un puerto en cada trama individual, y las tortas de filtración se acumulan en cada bastidor hueco. A medida que la torta de filtro es más

gruesa, la resistencia del filtro aumenta también, así que cuando la cámara de separación está llena, el proceso de filtración se detiene ya que ha llegado a la diferencia de presión óptima.

El filtrado que pasa a través de tela filtrante se recoge a través de tuberías de recogida y es almacenada en el tanque del filtro, mientras que la torta de filtración (sólidos en suspensión) se acumula en el marco de la placa hueca, y son separadas en las placas del filtro tirando del bastidor de la prensa. Las tortas se dejan caer fuera de esas placas finalmente. ("Small Scale Continuous Cake Filtration using the Disposable Rotary Drum Filter," 2003).

La descarga de la torta se puede hacer de muchas maneras, por ejemplo: Estrechar los platos mientras que se están abriendo, Agitando las telas de filtración o también se puede utilizar un raspador para pasar de una cámara a otra raspando la torta de la tela. Al final de cada ejecución, la tela se limpia utilizando líquido de lavado dejando el equipo listo para comenzar el siguiente ciclo. (Richardson's)

PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

En general, la solución a filtrar necesitaba ser deshidratado y se inyecta en el centro de la prensa y se llena cada cámara, el tiempo de llenado debe ser lo más rápido posible con el fin de evitar la formación de la torta en la primera cámara antes de llenar la última cámara. Mientras que las cámaras se llenan la presión dentro del sistema aumentará debido a la formación de lodos. A continuación, el líquido se filtra a través de la tela filtrante mediante la adición de las corrientes de aire comprimido o agua.

El uso de agua a presión requieren más tiempo para pasar a la cámara en comparación con el aire a presión, sin embargo este método es mucho más rentable.

Tabla 1 Ventajas y desventajas Filtro Prensa

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Su diseño de elementos paralelos permite una amplia superficie de filtración utilizando poco espacio. ✓ Tiene la capacidad para deshidratar y comprimir sólidos obteniendo de ellos entre el 25 y 60% de lodos compactados. ✓ El tiempo de prensado es relativamente corto, menor a 4 horas. ✓ Puede aceptar lodos que tengan distinta capacidad de filtración. ✓ La tolerancia a los distintos tipos de lodo garantiza operaciones de poco riesgo y bastante seguras. ✓ Sus filtros toleran altas presiones. ✓ Alto nivel de proceso de filtración. ✓ Se pueden utilizar en procesos de estabilización, deshidratación, espesamiento y secado de lodos. ✓ Es adaptable al líquido que se quiera filtrar, lo que no limita su uso exclusivamente al agua. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Tiene un funcionamiento discontinuo. ✓ Presenta el dilema entre elevados costes de mano de obra o el uso de complicados procesos de automatización. ✓ Si la filtración se vuelve de mala calidad es muy complicado el proceso de llenado.

4.1.2 ALTERNATIVA 2: FILTRO DE TAMBOR ROTATORIO

DESCRIPCIÓN. Un filtro de vacío rotatorio consta de un gran tambor giratorio cubierto por una tela filtrante. El tambor se suspende en un axial a través de una cubeta que contenga suspensión líquida de sólidos con aproximadamente 50 a 80% del área de la pantalla sumergido en la suspensión. Como se muestra en la figura 8.

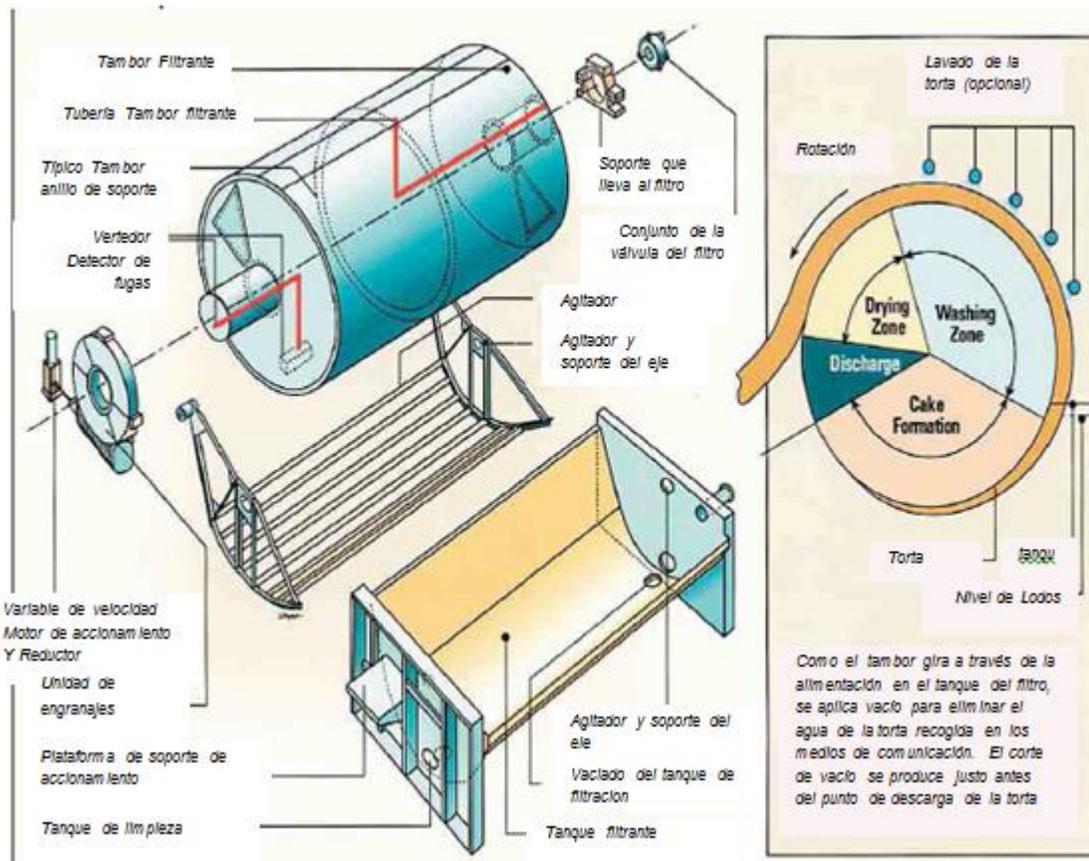


Figura: 8 Filtro de Tambor Rotatorio al vacío. Fuente: Fernando Concha

A medida que el tambor gira dentro y fuera de la cubeta, la suspensión es aspirada en la superficie de la tela y se hace girar hacia fuera de la suspensión como una torta. Cuando la torta está girando hacia fuera se deshidrata en la zona de secado. La torta seca se debe a que el tambor de vacío está chupando continuamente la torta y toma el agua fuera de ella. En el paso final de la separación, la torta se descarga como productos sólidos y el tambor gira continuamente a otro ciclo de separación.

PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Generalmente, el proceso principal en un filtro de tambor de vacío rotativo es la filtración continua en el que los sólidos son separados de los líquidos a través de un medio filtrante por un vacío. La tela filtrante es uno de los componentes más importantes en un filtro y por lo general está hecho de tejido de hilos de polímero. La mejor selección de tela puede aumentar el rendimiento de filtración. Inicialmente, la suspensión se bombea en el canal y cuando gira

el tambor, se sumerge parcialmente en la suspensión. El vacío aspira líquido y aire a través de los medios de filtro y fuera del eje por lo tanto se presenta la formación de una capa de la torta. Un agitador se utiliza para regular la suspensión si la textura es áspera. Los sólidos que se encuentran atrapados en la superficie del tambor se lavan y se secan después de 2/3 de revolución llevando a cabo la eliminación de toda la humedad libre.

Durante la etapa de lavado, el líquido de lavado o bien se puede verter sobre el tambor o sobre la torta. La torta de prensado es opcional, pero su uso impide que la torta se agriete y permite la eliminación de más humedad. La descarga de la torta se da cuando todos los sólidos se eliminan de la superficie de la torta por una cuchilla raspadora, dejando una superficie limpia y tambor vuelve a entrar en la suspensión. Hay unos pocos tipos de descarga que son raspadores, rodillos, cuerda, cinta sin fin y precapa.

El filtro se evalúa por el tamaño del área de tambor y su posible salida de material sólido, típicamente, la salida se encuentra en las unidades de kilogramos por hora de sólidos secos por metro cuadrado de área de filtro. El tamaño de las piezas auxiliares depende de la zona del filtro y del tipo de uso. Filtros de vacío rotativos son flexibles en el manejo de diversos materiales, por tanto el rendimiento estimado de 2.5 a 100 kilogramos por hora por metro cuadrado la eficacia de filtración también se pueden mejorar en cuanto al secado de la torta de filtro por el líquido de filtrado de manera que así se pueda prevenir significativamente el atascado en el tambor del filtro durante la fase de filtración, esto se convierte en beneficioso en términos de coste de producción y también la calidad. (Richardson's)

Tabla 2. Ventajas y Desventajas Filtro de tambor rotatorio.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> ✓ El filtro de tambor de vacío rotativo es una operación continua y automática, por lo que el coste de funcionamiento es baja. ✓ La variación de la velocidad giratoria del tambor se puede utilizar para controlar el espesor de la torta. ✓ El proceso se puede modificar fácilmente <ul style="list-style-type: none"> ✓ Puede producir un producto relativamente limpio mediante la adición de un dispositivo de lavado. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Debido a la estructura, la diferencia de presión se limita hasta 1 bar. ✓ Además de la batería, otros accesorios, por ejemplo, agitadores y la bomba de vacío, se requieren. ✓ La torta de descarga contiene humedad residual. ✓ El alto consumo de energía en la bomba de vacío.

4.1.3 ALTERNATIVA 3: FILTRO ROTATORIO DE DISCOS

DESCRIPCIÓN El filtro está conformado por discos y sectores que se pueden estar elaborados en polipropileno moldeado por inyección, metal o madera roja especial, el centro de apoyo de los cojinetes principales consiste en pasajes de filtrado trapecoidales. Los sectores están unidos a través de conexiones de anillo cerrado en un número igual al número de sectores del disco, una válvula con puentes y compartimentos internos para el secado al vacío y descarga de la torta bajo presión.

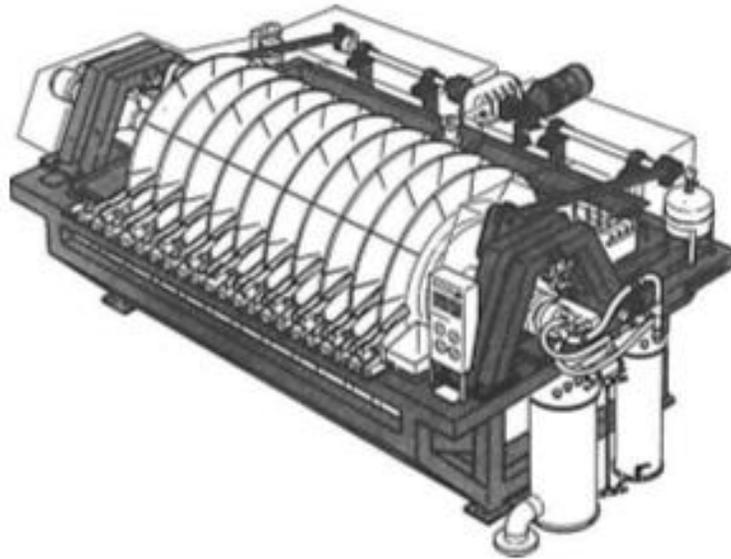


Figura: 9 Filtro Rotatorio de Discos. Fuente: Fernando Concha

La mayoría de los filtros de discos están equipados con una válvula sólo pocos presentan dos válvulas estas se montan a menudo cuando las cargas hidráulicas son altas, un agitador con paletas que está situado entre los discos para no interferir con la formación de la torta, un tanque que, en su lado de descarga, presenta compartimentos de suspensión para los discos y conductos de descarga para la torta. Cuando los sólidos son de carácter abrasivo, es aconsejable tener una línea en la parte inferior del tanque que acune el agitador con un caucho, dos cuchillas de descarga de torta en ambos lados de cada disco que están suspendidos de un marco montado en el tanque y sirven para desviar y guiar la torta a los conductos de descarga. (Soua et al., 2004)

PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

El principio de construcción de un filtro de vacío de disco giratorio es que varios discos de filtro están montados, paralelos entre sí, sobre un eje horizontal. Cada disco está hecho de sectores intercambiables cubiertos con el medio filtrante, que se pueden extraer para fijar y retirar telas filtrantes. Los filtros convencionales de disco giran los discos a través de un colector en el que se alimenta la suspensión. El sumidero normalmente tendrá un agitador para mantener la concentración de suspensión constante, y por lo tanto incluso la formación de torta. El vacío se aplica a los sectores del disco a través de tuberías en el núcleo del eje central, a lo largo del cual el filtrado también se retira. (Hale, 2009)

Tabla 3. Ventajas y Desventajas Filtro Rotatorio de Discos.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Reducción en el consumo de energía, hasta el 90% ya que no hay necesidad de aire fluyendo a través de los discos, debido al uso de la fuerza capilar que actúa sobre los poros. ✓ La bomba de vacío requerida es menor que en los filtros convencionales, reduciendo así al mínimo los costos de operación. ✓ Perfil de flujo constante y distribución uniforme de la torta ✓ Capacidad de alto rendimiento con un contenido de agua muy bajo y una torta seca. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Los filtros de disco no son adecuados para el lavado de la torta debido a que el agua sale rápidamente de la superficie de la torta. ✓ No son adecuados para sistemas de filtración en los que se produce conducción o distribución desigual, lo que lleva a la torta de craqueo ✓ El gran contenido de humedad de la torta, disminuye la productividad y perturba las operaciones de producción. ✓ El efecto de limpieza de las placas de cerámica y la eficiencia del filtro son bajos

4.2 ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS.

Tabla 4 Comparación de alternativas.

Factor	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Costos de mantenimiento	Son altos ya que la maquina opera discontinuamente y no presenta lavados durante su proceso.	Son bajos ya que es un proceso continuo, presenta una sección de lavado y sus partes son fácilmente desarmables.	Tiene sus ventajas y desventajas porque aunque es un proceso continuo sus partes son pequeñas y de difícil montaje y desmontaje lo que dificulta el mantenimiento del equipo.
Consumo de energía	Comparado con las otras alternativas sus consumos energéticos son bajos y de menos costo.	Debido al uso de una bomba de vacío el consumo energético es significativo.	Aunque contiene una bomba de vacío esta es de baja potencia por lo que su consumo energético es menor que el de otros filtros de vacío.
Control del proceso	El proceso de control es complejo y de alto costo.	El proceso se puede modificar y controlar fácilmente	Puede manejar un control moderado del proceso.
Tiempo de filtrado	Se podría considerar óptimo ya que el tiempo de prensado es corto sin embargo el proceso debe detenerse para descargar la torta del filtro y volver a montar la prensa, lo que le toma mucho tiempo.	Es optimo ya que trabajo continuamente y solo con lleva un paso por el filtro la operación se realiza con rapidez	El tiempo es relativo dependiendo del material a filtrar.
Eficiencia	Eficiente ya que el tiempo de filtrado es corto y la calidad del filtrado optima además puede trabajar con una gran gama de compuestos	Alta eficiencia y gran calidad de filtrado.	La eficiencia del filtro es baja.
Limpieza	Desmontaje y limpieza complejos.	Se puede adaptar un dispositivo de lavado lo que facilita la limpieza del equipo.	El efecto de limpieza de las placas de cerámica es complejo.

4.3 APLICACIÓN METODO ELECTRE

Tabla 5 Ponderación Factores de comparación.

Factor	Ponderación (%)
Costos de mantenimiento	0,20
Consumo de energía	0,15
Facilidades de control del proceso	0,20
Tiempo de filtrado	0,15
Eficiencia	0,25
Limpieza	0,05

Vector de Pesos.

W (0.2, 0.15, 0.20, 0.15, 0.25, 0,005)

Tabla 6 Análisis de Importancia

Factor	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Costos de mantenimiento	5	9	8
Consumo de energía	8	6	7
Facilidades de control del proceso	6	9	7
Tiempo de filtrado	8	7	7
Eficiencia	8	8	6
Limpieza	7	9	5

Tabla 7 Matriz de Concordancia

-	0,42	0,42	0,41	0,42	0,36
0,58	-	0,56	0,37	0,38	0,36
0,58	0,00	-	0,47	0,44	0,28
0,59	0,63	0,53	-	0,52	0,25
0,58	0,62	0,56	0,48	-	0,32
0,64	0,64	0,72	0,75	0,68	-

Tabla 8 Matriz de discordancia

-	0,38	0,25	0,25	0,50	0,50
0,38	-	0,63	0,25	0,50	0,50
0,50	0,50	-	0,38	0,50	0,50
0,50	0,50	0,50	-	0,50	0,50
0,25	0,38	0,50	0,25	-	0,25
0,25	0,25	0,38	0,38	0,25	-

Tabla 9 Relaciones de Dominancias

	Dominancias por fila	Dominancias Por columna	Diferencia de dominancia	Priorización
Alternativa 1	A2, A3	A2	4	2 Lugar
Alternativa 2	0	A3	1	1 Lugar
Alternativa 3	A2	0	2	3 Lugar

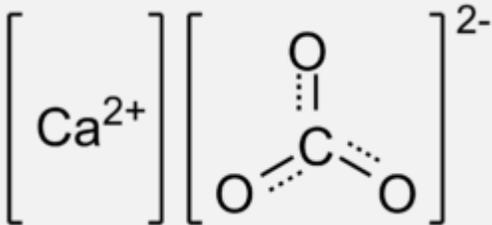
Como se puede observar en el análisis la alternativa que mejor se adapta a los parámetros que ejercen importancia en el sistema de filtración es la alternativa número 3 ya que domina las demás alternativas, y aunque su consumo de energía es un poco elevado debido al uso de una bomba de vacío de alta potencia sus otros factores se ven favorables, como lo es el bajo costo de mantenimiento y operación, fácil control y limpieza, alta eficiencia de filtrado y las facilidades de diseño.

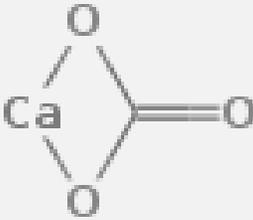
4.2 INFLUENCIA DEL CARBONATO DE CALCIO

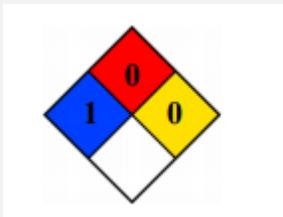
Para el proceso de filtración se tuvo en cuenta el carbonato de calcio como solución filtrante ya que es un producto de fácil acceso y bajo costo sin dejar de lado que sus características son las que mejor se compenentran con el uso de filtros rotatorios de vacío ya que mantiene velocidades que impiden la sedimentación del carbonato en la solución y auto limpieza para evitar la retención de sólidos en el equipo evitando el taponamiento. En este capítulo se presentan las características físicas y químicas del compuesto su Ficha técnica y de seguridad y las condiciones recomendadas de operación para un proceso eficiente de filtración.

4.2.1 Ficha de técnica y características fisicoquímicas

Tabla 10 Caracterización del CaCO₃ (Comercial, 2012)

Estructura Química	
	
Nombre IUPAC	Trioxocarbonato (IV) de calcio
General	

Otros nombres	Carbonato cálcico
Fórmula estructural	
Fórmula molecular	CaCO ₃
Identificadores	
Número CAS	471-34-1
Propiedades físicas	
Apariencia	Polvo blanco inodoro
Densidad	2711 kg/m ³ ; 2,711 g/cm ³
Masa molar	100.0869 g/mol
Punto de fusión	1172 K (899 °C)
Punto de ebullición	1612 K (1339 °C)
Propiedades químicas	
Solubilidad en agua	0.0013 g/100 mL (25 °C)
Termoquímica	

ΔfH_0líquido	-1154 kJ/mol
ΔfH_0sólido	-1207 kJ/mol
Peligrosidad	
NFPA 704	
Riesgos	
Ingestión	<p>En cantidad excesiva puede causar irritación gástrica leve e inflamación en la garganta.</p> <p>Su ingestión crónica puede causar hipercalcemia, alcalosis y daño renal.</p>
Inhalación	En grado excesivo puede causar irritación respiratoria leve.
Piel	Leve riesgo, puede causar irritación.
Ojos	Leve riesgo, puede causar irritación.
LD50	6450 mg/kg (oral, rata)
Manejo y Almacenamiento	
<p>Guarde en un envase cerrado herméticamente. Proteja contra los daños físicos. Almacene en área fresca, seca y bien ventilada, lejos de las fuentes de calor, de la humedad y de productos incompatibles. Los recipientes de este material pueden ser peligrosos al vaciarse puesto que retienen residuos del producto (polvo, sólidos); observe todas las advertencias y precauciones listadas para el producto.</p>	

4.2.2 Desempeño de filtrado y condiciones de óptima, solubilidad y admisibilidad

Si bien es posible predecir cualitativamente el efecto de las propiedades físicas del fluido y del sólido sobre las características de filtración de una suspensión, es necesario en todos los casos realizar un ensayo sobre una muestra antes de que el diseño del sistema de filtración pueda ser diseñado. Se realizan utilizando un filtro de vacío simple con un área de filtro de 0,0065 m² se utiliza para obtener datos de laboratorio, como se ilustra en la Tabla. La información sobre las velocidades de filtración y la resistencia específica obtenida de esta manera puede aplicarse directamente a los filtros industriales, siempre que se tenga debidamente en cuenta la compresibilidad de la torta de filtrado. No se puede enfatizar demasiado en estos resultados. (Sutherland, 2010)

Para las pruebas en el sistema de filtración se utilizara una solución concentrada de carbonato de calcio por lo que es muy necesario el análisis de las propiedades fisicoquímicas y de partícula que influyen en el uso de un filtro de tambor rotatorio para de esta manera obtener un proceso de filtración eficiente y conocer algunas de las condiciones de operación del proceso.

Primero se tiene en cuenta un ensayo de filtración al vacío a escala de laboratorio para conocer la relación de la taza de filtración y el tiempo de filtrado de esta manera se puede observar la conducta del carbonato de calcio a través del tiempo.

Se utiliza una solución de 100g de carbonato de calcio en 250 ml de agua para la solución de filtrado.

Tabla 11 Resultados prueba de filtración.

Prueba	Tiempo (min)	Taza de filtrado (g/min)
1	2	36,74
2	5	27,21
3	7	20,18
4	10	11,28

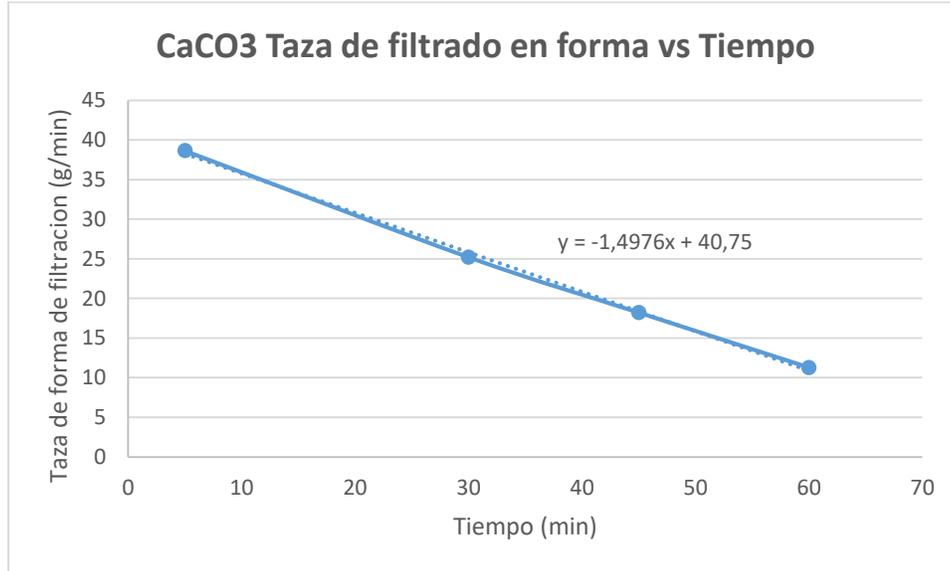


Figura: 10 Grafico Taza de filtrado vs Tiempo Fuente: Autor

Según el comportamiento de filtración determinado en el laboratorio se puede calcular una velocidad de filtrado de 1,4976 g/min por cada metro cuadrado y una resistencia de 3.5×10^{14} m².

En la literatura se encuentra que para la filtración de carbonato de calcio el equipo que mejor se adapta es el filtro de tambor rotatorio al vacío además se pueden observar las características optimas de operación para que el proceso sea de la manera más eficiente.

Tabla 12 Condiciones generales Filtración de CaCO3(Richardson's)

Tipo de filtro utilizado frecuentemente	Tambor Rotatorio de Vacío (RDVF)
Solidos contenidos en la alimenta con (%m/m)	30
Manejo de solidos por kilogramo de solidos secos por metro cubico en superficie de filtrado	0,04
Contenido de humedad de la torta (%m/m)	40
Superficie de filtrado mínima	0,010
Vacío kN/m2 presión por debajo de la atmosférica	26

4.2.3 Tamaño de partícula, densidad y volumen de partícula

Las especificaciones que regula la norma NTC 3603 para la comercialización del carbonato de calcio en Colombia se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 13 Especificaciones técnicas CaCO₃ ("NTC 3006," 2016)

Especificación	Unidad	Valor Típico
Variación de Color	ΔE	N/A
Contenido de Humedad	%	0.2max
Apariencia	N/A	Sin contaminación
Concentración de CaCO₃	%	95 +/- 3
Área superficial	μm^2	1.4
Diámetro de partícula	μm	0.66 esférica aparente.
Volumen de partícula	μm^3	1.38
Densidad de partícula	g/mL	0.84
Retención de partícula	%	1.0 \pm 0.2 en Tamiz malla 400-38 μm
Humedad a 105 °C	%	0.2
Presentación	N/A	<ul style="list-style-type: none"> • Saco industrial en papel Kraft doble capa cosido de 25 Kilogramos sin impresión • Saco industrial 60 x 90 laminado tela blanca en polipropileno cosido de 50 Kilogramos sin Impresión.

4.2.4 Determinación de carbonato de calcio en la solución filtrada

La titulación es un procedimiento cuantitativo usado ampliamente en química analítico. Con la titulación es posible determinar la concentración de una sustancia desconocida en un líquido añadiendo reactivos de concentración conocida. En este caso se titula con ácido clorhídrico y se utiliza como indicador rojo de metilo, con este procedimiento se puede calcular la cantidad de carbonato de calcio presente en el efluente filtrado.

4.4 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE FILTRACIÓN

Son muchas los términos a tener en cuenta al momento de caracterizar el equipo de filtración involucrado en el sistema de filtración en este capítulo se tienen en cuenta todas las consideraciones empezando por la selección del material filtrante la capacidad del filtro las condiciones de servicios industriales involucrados, los dispositivos necesarios en el proceso, los requerimientos técnicos y los materiales de construcción.

Consideraciones de diseño:

- Todos los cálculos se realizan conforme al alcance establecido para esta ingeniería conceptual
- Para el dimensionamiento de los equipos principales se considera un flujo de diseño de 10L a 15L, una concentración de solidos de 30% en peso en el tanque de alimentación y una temperatura ambiente de operación.
- El dimensionamiento de los tanques considera un 10% de sobre diseño en el volumen de líquido retenido como factor de seguridad
- Los cálculos de las bombas consideran las condiciones más críticas de distancia entre equipos, alturas y viscosidades de mezcla con el fin de obtener una bomba con la capacidad de operar en las condiciones de mayor adversidad.

4.4.1 Medio Filtrante

Son muchos los materiales utilizados en procesos de filtración pero cada material tiene sus características, ventajas y desventajas dependiendo de la solución a filtrar y del equipo utilizado a continuación se presenta en la tabla 14, los análisis de diferentes tipos de materiales.

Tabla 14 Análisis Medio Filtrante(T. Sivakumar*)

Medio	Acción del filtro	Mínimo normal de corte μm	Ventajas	Corte Absoluto	Desventajas	Observaciones/Aplicaciones Típicas
Papel sin tratar	Superficie absorbente	10 a 20	Bajo Costo	No	Resistencia muy baja	Filtros simples de laboratorio
Papel tratado	Superficie	5 a 20	Bajo Costo	No	Baja resistencia, Alta resistencia específica, solo recomendable en la superficie de los filtros, sujetos a la migración del elemento	Propósito general formas compactas de filtros para gases y líquidos, también aplicación en prensas filtrantes limitados por la tela del filtro
Discos de Papel	Borde (Profundo)	Debajo de 1	Bajo Costo, Corte Ajustable	Si	Alta resistencia específica no lavable	Filtración fina o de gases y líquidos
Telas	Superficie	Debajo de 5	Puede resistir más que el papel, Más recomendable para Filtros de gran tamaño	No	Carecen de rigidez y normalmente debe estar apoyado sobre una pantalla, malla, etc...	Las telas cubren una amplia gama de materiales con características diferentes. elementos de tejidos pueden ser utilizados para el gas de propósito general y filtros líquidos; También para los colectores de polvo, tela de filtro, etc.
Filtros	Profundidad	Debajo de 10	Propiedades mecánicas pueden ser controladas de cerca durante la manufactura. Disponible en un amplio rango de materiales	No	Carecen de rigidez y necesitan soporte	Filtros Más delgados es alternativa al papel para elementos plisados. almohadillas de filtro para una amplia gama de industrias

Medio	Acción del filtro	Mínimo normal de corte μm	Ventajas	Corte Absoluto	Desventajas	Observaciones/Aplicaciones Típicas
Fibras	Superficie	Debajo de 10	Rendimiento controlado, disponible en un amplio rango de materiales	Si	Más caro que la tela o papel	Mantiene una variedad de aplicación de filtración fina y ultra fina
Alambre tejido	Superficie	Debajo de 6	Rendimiento controlado por tejido y malla. Alta resistencia	Si	Más caro que la tela o papel	Extenso uso en mallas gruesa, medias y finas
Lanas Minerales	Profundidad	Debajo de 0,1	Alta permeabilidad, filtración ultra fina con fibras de micro diámetro y altas temperaturas	Si	Pueden representar un peligro para la salud, las velocidades de flujo deben mantenerse bajos, no es especialmente adecuado para filtración de Líquidos	Filtración ultra fina de aire y gases
Fibra de Vidrio	Profundidad	Debajo de 1 o mejor	Propiedades pueden ser controladas y graduadas durante la fabricación, Recomendable para altas temperaturas			Filtros de capas de aire Filtros de hoja de micro vidrio
Diatomeas	Profundidad		Muy efectivo para filtración fina con baja resistencia	No	Normalmente usado para uso exclusivo de precapa, pero puede ser mostrada en forma de hoja con carpeta	Filtros precapa, particularmente recomendable para clarificación

Medio	Acción del filtro	Mínimo normal de corte μm	Ventajas	Corte Absoluto	Desventajas	Observaciones/Aplicaciones Típicas
Carbón Activado	Adsorbente	Remueve Vapores, olores			Producto granular que contiene las necesidades de un ambiente adecuado	Filtros finales de aire o agua, tratamientos químicos, etc...
Arcilla Activada	Adsorbente				Forma granular, menos efectivo que el carbón activado	Filtros finales para remover olores y vapores
Antracita	Profundidad		Posibles altas tazas de flujo en camas de múltiples capas de arena		Necesita ser tratado para máxima dureza	Usado en filtros de gravedad y presión para tratamiento de aguas y filtración de aceites, ácidos, alcalinos
Metal Sinterizado	Profundidad	Debajo de 2	Propiedades pueden ser controladas durante la fabricación, elementos de alta resistencia, recomendado en altas temperaturas	Si	Posibilidad de elementos de migración, alto costo, no lavable	Bronce sinterizado para tareas generales. Acero inoxidable o aleaciones exóticas para presiones más altas, temperaturas y resistencia a la corrosión.
Cerámica	Profundidad	Debajo de 1	Propiedades pueden ser controladas durante la manufactura, recomendable para fluidos corrosivos.	Si	Alto costo, no lavable	Particularmente recomendable para ácidos, alcalinos y otros medios corrosivos

Según lo visto en la anterior tabla, el material que mejor se adapta a las condiciones tanto del material como del equipo son las fibras, este medio filtrante además de ser el más frecuente, presenta alta resistencia, y soporta de manera eficaz el ciclo de lavado del filtro. Otros materiales poseen esta característica pero no se adaptan al diseño del equipo como los son las membranas y las diatomeas pero como el sistema de descarga del filtro se basa en raspadores y no en precapa el uso de estos materiales no es posible. Ahora es preciso definir el tipo de fibra a utilizar.

Tabla 15 Variables para definir la fibra necesaria

Variable	Medida	Valor Típico
Temperatura	°C	Ambiente
Nivel de Humedad	%	0.2
Tamaño de Partícula	µm	0.66
Químicos en la alimentación.	N/A	CaCO ₃
Materiales Abrasivos	N/A	CaCO ₃
Sistema de limpieza del equipo	N/A	Impulsión a chorro

Según las variables definidas podemos considerar la fibra polipropileno como la más recomendada para nuestro proceso ya que se adapta de manera correcta a las necesidades presentadas anteriormente este medio es un material muy versátil utilizado en las industrias de fabricación de polvos, tiene una alta resistencia a materiales abrasivos y no se hidroliza lo que lo hace el más adecuado.

Caracterización del medio filtrante:

Tabla 16 Especificaciones Medio Filtrante

Especificaciones	Descripción
Grado de filtración	1, 3, 5, 10, 20, 40 μm absolutas.
Temperatura de operación	< 135°C
Soporta la combustión	Si
Resistencia alcalinos	Buena
Resistencia minerales ácidos	Buena
Resistencia agentes oxidantes	Buena
Peso promedio	10 a 22 oz

4.4.2 Capacidad del equipo de filtración.

Principalmente opera una capacidad de 10 a 50 litros los cuales son alimentados al tambor a través de una bomba de alimentación de manera recurrente ya que el equipo trabaja de forma continua por lo cual la alimentación debe ser constante hasta finalizar todo el proceso.

4.4.3 Condiciones de servicios Industriales requeridos

Los servicios industriales requeridos para el proceso se presentan en la tabla 17 en los cuales se hace un estudio estimativo de los servicios industriales y su consumo en cada uno de los equipos involucrados en el proceso de filtración.

Tabla 17 Servicios Industriales.

Rev	Equipo/Sistema	TAG	Agua			Aire		Energía			Descripción
			Contraincendios (lpm)	Industrial (lpm)	Lavado (lpm)	Instrumento (NCMH)	Industrial (m2/h)	Potencia Eléctrica (kWh)	Gas combustible (NCMH)	Combustible Diésel (lph)	
0	Tanque Agitado	TK-001	-	-	-	-	-	0.7	-	-	Almacenamiento Alimentación
0	Tanque	TK-002	-	-	-	-	-	-	-	-	Almacenamiento filtrado clarificado
0	Tanque	TK-003	-	-	-	-	-	-	-	-	Almacenamiento Torta, residuos sólidos
0	RDVF	RDVF-001	-	-	3.5	-	-	26.	-	-	Operación
0	Bomba	P-001	-	-	-	-	-	2.95	-	-	Bomba de entrega de alimentación
0	Bomba de vacío	P-002	-	-	-	-	-	61.	-	-	Bomba de vacío
			0	0	3.5	0	0	90,65	0	0	

A continuación se detalla el dimensionamiento de los equipos a usar en el sistema de filtración.

Bomba de Vacío. Se conoce por la literatura que la bomba de vacío debe ser capaz de efectuar una presión de 26 kN/m^2 , otros factores que definen la selección de la bomba de vacío son la velocidad de bombeo, el intervalo de presión, Presión deseada y la presión de escape.

Tabla 18 Datos de relación Tiempo Velocidad de aire(Chopey, 2010)

Tiempo<min>	Velocidad de aire <m ³ /minm ²
0	0
0,08	0,0708
0,12	0,1133
0,16	0,1416
0,2	0,1642
0,3	0,1925
0,4	0,2124
0,6	0,2322
0,8	0,2464
1	0,252
1,4	0,2577

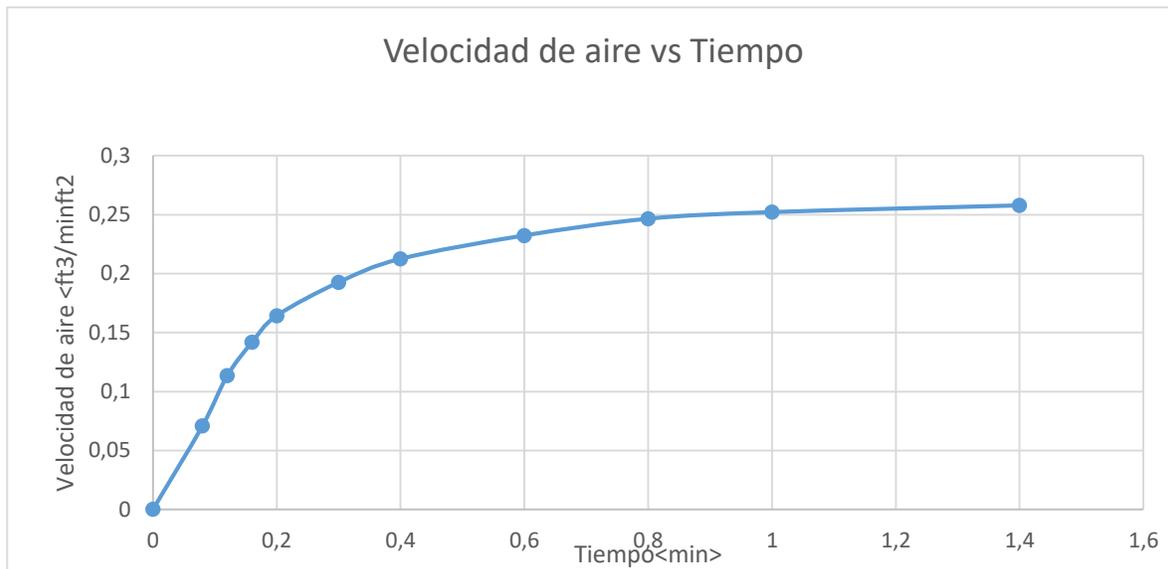


Figura: 11 Grafica Velocidad de aire vs Flujo Fuente: Autor

Se debe seleccionar una bomba de vacío que trabaje en el rango establecido de presión, que maneje pocos volúmenes y su costo sea razonable, para ello, se tiene en cuenta una de las bombas de vacío instaladas en el evaporador doble efecto que se encuentra en el laboratorio de operaciones unitarias donde se va a realizar el montaje del equipo lo que reduciría los costos de construcción del sistemas de filtración.

Para comprobar si es probable este recurso se tienen en cuenta las especificaciones de la bomba.

Capacidad de trabajo: Maneja hasta 75HP

Potencia: 40V, 220V y 440V

Peso: 6Kg

Velocidad de Bombeo: 1650 rpm

56KW

La bomba de vacío cumple perfectamente con las especificaciones necesarias para el funcionamiento del sistema de filtración lo que lo hace una alternativa idónea para el proceso.

- **Bomba de Alimentación.** Para la selección de esta bomba se tiene en cuenta que mejor se adapte a las condiciones de operación del proceso, teniendo en cuenta las consideraciones de operación del sistema de bombeo.
- **Líquido a Bombear:** Una solución de carbonato de calcio en agua para su posterior filtración el porcentaje máximo de carbonato en agua es del 30% en peso.
- **Temperatura de Bombeo:** Temperatura ambiente aproximadamente de 19°C a 25°C
- **Caudal de Bombeo (LPS):** Caudal con el que trabajara la bomba durante su vida útil la cual para la mayoría de bombas el periodo de diseño es de 10 años aproximadamente, el caudal que se utiliza para la selección de bombas es, una proporción del caudal máximo diario en función del número de horas de bombeo, así:

$$Q_b = Q_{max/dia} \left(\frac{24}{n} \right) \quad \text{Ecuación III.1}$$

Q_b = Caudal de bombeo l/h

$Q_{max/día}$ = Caudal máximo diario l/h

n = Número de horas de bombeo

Teniendo en cuenta datos aproximados de caudal diario de 20 litros y un tiempo de bombeo de 2 horas tenemos un caudal de bombeo de 240 l/h

- **Altura manométrica total.**

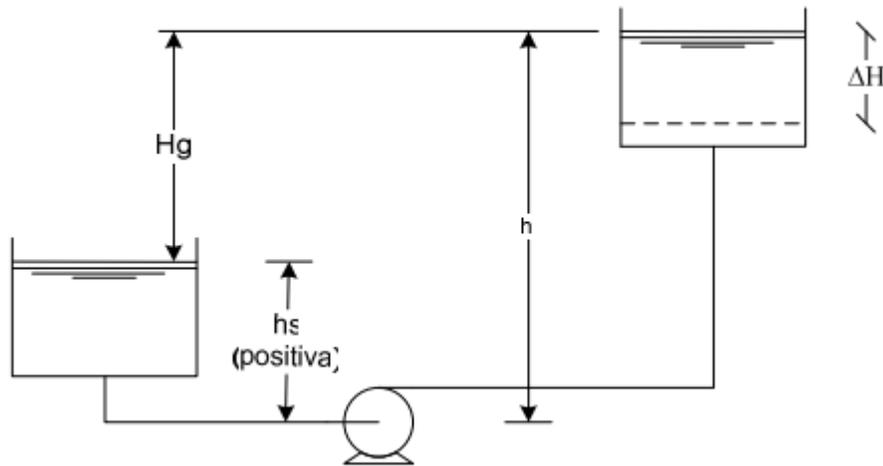


Figura: 12 Montaje sistema de bombeo

Los datos exactos de la altura no se pueden determinar exactamente pero una aproximación general para la altura manométrica de este montaje de bombeo puede ser dado por la siguiente ecuación:

$$H_t = h_i - h_s + \sum h_f + \sum h_L$$

NPHS Requerido: Se puede considerar para este sistema un NPHS requerido aproximadamente menor o igual a 11 m con un margen de seguridad de 0.5m considerando que estamos trabajando a presión atmosférica y temperatura ambiente.

Teniendo en cuenta las consideraciones de operación del sistema de bombeo se selecciona una bomba centrífuga de eje horizontal ya que es de uso frecuente en este tipo de operaciones, costos aceptables y cumple con las condiciones del proceso además se adapta perfectamente a la norma API 610. En la tabla 19, se presentan las especificaciones que confirman el uso de la bomba.

Tabla 19 Especificaciones bomba de alimentación. (Comercial, 2008)

Especificación	Valor Típico
Tipo de Bomba	Bomba de eje horizontal
Temperatura Líquido	-10°C - 90°C
Presión de operación	8bar aprox.
Motor	Motor asíncrono, cerrado de ventilación externa apto para trabajo continuo. Grado de protección IP-55, aislamiento clase F.
Precio aproximado	\$150.000-\$300.000
Velocidad en RPM	2850
Potencia en HP	1.3
Material	Eje en acero inoxidable. Tapa de aspiración, cuerpo de bomba y cuerpo de unión en fundición gris G-20. Turbinas estampadas en latón. Cierre mecánico de alta calidad

- Motor de Giro** La elección del motor de giro está dada prácticamente a partir de la velocidad del impulsor el tambor puede manejar velocidades de 10 a 60rpm, los motores comerciales y reductores de velocidad manejan velocidades estándar de 37, 45, 56, 68, 84,100,125,155,190,320 rpm. En algún caso se requiere de motores de velocidades pero en este proceso no es necesario ya que el torque de arranque es bajo y no tiene asentamiento de slurry. Hoy en día es posible encontrar motores en un amplio rango de velocidades de giro. La velocidad de giro del impulsor se relaciona con su tipo y su potencia según las características y el rango que abarca el filtro la velocidad estándar que mejor se puede adaptar es de 45rpm se podría considerar el uso de Motores trifásicos estándar que poseen las siguientes especificaciones

Características Eléctricas:

Eficiencia IE1 hasta tamaño constructivo 225 (Norma IEC 60034-30)

Tensiones conmutables 220 / 440 V a 60 Hz.

Posibilidad de arranque directo en todos los tamaños constructivos. Adicionalmente arranque Y - Δ a partir del tamaño 132.

Clase térmica F - Impregnación al vacío, tecnología VPI

Tipo de servicio: S1

Factor de servicio (FS): entre 1.05 a 1.15.

Temperatura de operación: -15/40°C

Aptos para ser accionados con variador de velocidad

Características Mecánicas:

Carcasa en Aluminio que asegura su bajo peso y excelente conductividad térmica.

Rodamientos tipo rígidos de bola, de doble sello y con juego interno C3. Totalmente cerrados y libres de mantenimiento. Con una vida útil de hasta 20.000 horas de servicio continuo.

Ejecución IMB3 / IMB35 / IMB5

Con retenedor CD Ring en el platillo AS

Protección Mecánica IP55

Gracias a su carcasa en Aluminio se asegura una excelente conductividad térmica y un bajo peso. Su diseño permite que operen a dos tensiones y que su arranque se realice ya sea directamente, en estrella triángulo, con arrancador suave o con variador de velocidad lo cual posibilita su aplicación en la totalidad de condiciones disponibles.

- **Tipo de lavado**

El sistema de lavado pensado para este sistema de filtración es en forma de ducha lo que permitiría el alcance a través de toda la sección de lavado del tambor, el lavado consistiría en tres regaderas distribuidas de manera lineal de manera que se garantice el alcance total del agua de lavado a través de toda la sección la cual es una de las cuatro secciones de operación del proceso de filtración por lo tanto es importante que se lleve a cabo en las mejores

condiciones, es por eso que este sistema de lavado adapta de la mejor manera al proceso además se mantiene poco gasto de la fuente de agua ya que no hay desperdicio de la misma.

- **Agitador**

Como la solución de alimentación es carbonato de calcio y agua se recomienda el uso de un agitador en el tanque de alimentación y en el tambor para evitar la sedimentación del carbonato en el agua. Un agitador de paletas en el tanque de alimentación y en el tambor un agitador de vaivén es favorable en este proceso ya que opera a velocidades bajas o moderadas e impulsan el líquido radial y tangencialmente. Los agitadores industriales de paleta giran a velocidades comprendidas entre 20 y 300 rpm. Normalmente, la longitud del rodete del agitador de paletas es del orden del 50% al 80% del diámetro interior del tanque. A velocidades muy bajas, este tipo de agitador mantiene un alto efecto de mezcla.

4.5 DIMENSIONAMIENTO DEL FILTRO DE TAMBOR ROTATORIO

En este capítulo se describe las especificaciones usadas como base para el diseño completo del filtro, los diagramas, planos y demás elementos necesarios para su posterior diseño y construcción

4.5.1 Diagrama de Bloques

El proceso empieza con la preparación de una solución de carbonato de calcio con agua con un contenido máximo de carbonato de 30% en porcentaje peso a peso esta dilución pasa al equipo de filtración por medio de una bomba centrífuga de eje horizontal, allí se le aplica vacío a la solución para realizar la separación del líquido y el sólido provocando la formación de la torta en la primera sección del tambor rotatorio, pasando luego a la sección de lavado en la que se retira excesos de residuos sólidos de la torta para que se dé un secado más homogéneo en la sección de secado para pasar a su posterior descarga por medio de raspadores, por último se obtienen los residuos sólidos que son depositados en un tanque de almacenamiento y los residuos líquidos son recirculados al proceso para su reutilización en el proceso. Como se muestra en la figura 13.

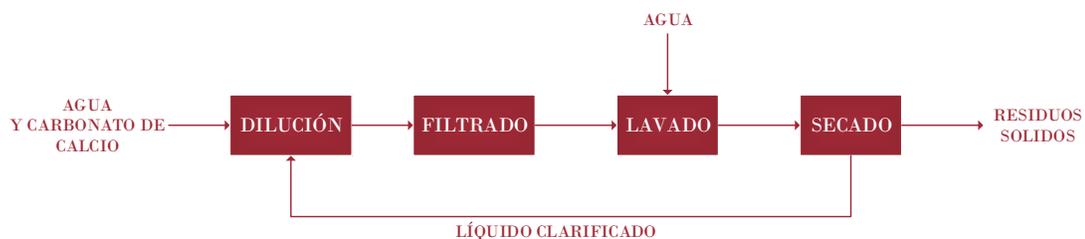


Figura: 13. Diagrama de Bloques Sistema de filtración Fuente: Autor

4.5.2 Condiciones Óptimas de operación y seguridad de proceso.

Las condiciones en el proceso de filtración están dadas por la tabla 20. Estos datos son los registrados en la bibliografía, es decir, son datos aproximados de operación, pero nos ayudan a obtener unas condiciones bases para el diseño del equipo.

Tabla 20 Condiciones Óptimas de operación.

Especificación	Valor Típico
Temperatura<°C>	Ambiente (19 - 25)
Presión <atm>	1
Velocidad del tambor <rpm>	10 – 60
Tipo de Descarga	Descarga por raspadores (scrapper)
Área máxima Usual <m ² >	80
% sólidos en alimentación <m/m>	30
Capacidad (L)	10-50
Tambor sumergido	1/3

4.5.3 Dimensionamiento Filtro de tambor rotatorio

Para el dimensionamiento del filtro se realizan los siguientes cálculos bases para el diseño del equipo filtrante.

Considerando que el Tambor se encuentra sumergido 1/3 en el líquido de filtrado tenemos que:

$$f = 1/3$$

Como el proceso opera en forma continua la masa que obtenemos esta expresada en kg/h.

$$W = \dot{m} \cdot t = \dot{m} \cdot f \cdot t_c \quad \text{Ecuación IV.25}$$

\dot{m} : Masa de la torta después del filtrado en kg/h.

$$\dot{m} = 20, 245 \text{kg/h.}$$

Ecuación IV.26

$$\text{Filtrado promedio} = 27 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$$

$$A = \frac{\dot{m} \cdot f \cdot t_c}{t_c \cdot \text{Filtrado promedio}} = \frac{\dot{m} \cdot f}{\text{Filtrado promedio}}$$

$$A = \frac{20,245 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * 1/3}{27 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}} = 0,2499 \cong 0.25 \text{ m}^2$$

De acuerdo a los cálculos realizados con el dimensionamiento del tambor se tiene un área de filtrado de 0,25 m². Para visualizar mejor las dimensiones y secciones de operación calculadas, se representan las figuras 14 y 15.

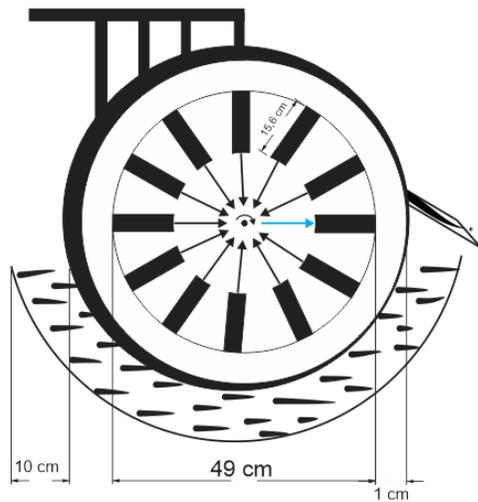


Figura: 14 *Figura dimensiones generales tambor Fuente: Autor*

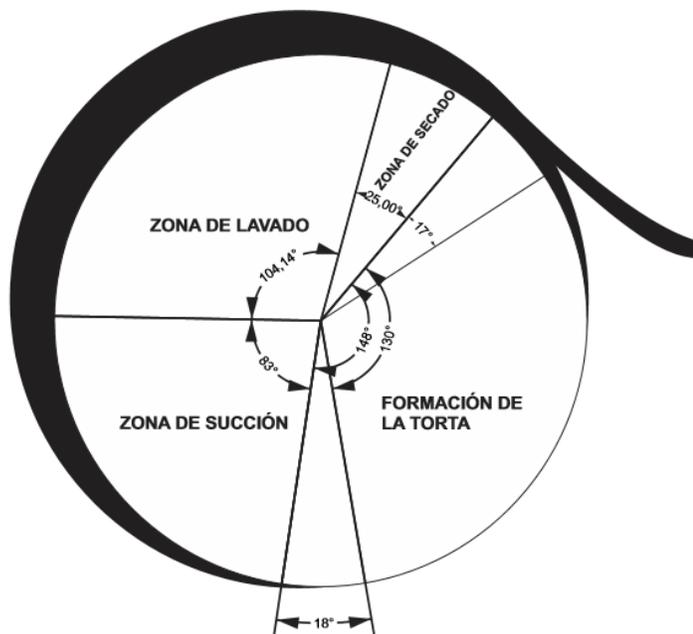


Figura: 15 Ángulos secciones de operación Fuente: Autor

4.5.4 Diagrama Isométrico equipo de filtración

Los planos isométricos con las medidas generales de diseño tanto para el filtro de tambor rotatorio con sus dispositivos (bomba de vacío, motor) como para el sistema general con sus respectivas tuberías tanques y bombas de alimentación se encuentran del Anexo A1 hasta el anexo A.7.

4.5.5 Diagrama de Flujo del proceso de Filtración.

El diagrama de flujo se presenta en el Anexo A.8 con las respectivas especificaciones de los equipos involucrados, El balance de materia se deja determinado para cada sección en la tabla 21.

Ecuaciones básicas:

Cada una de las corrientes está identificada por un índice i en el diagrama de bloques, estos pueden ser caracterizados por los siguientes parámetros.

- Taza de flujo másico de Carbonato de Calcio (M_{ai})
- Taza de flujo másico de agua (M_{wi})
- Consistencia de residuos (S_{spi})
- Proporción entre masa del agua y masa de Carbonato (W_{pi})
- Proporción entre la masa de solidos residuales y la masa de Agua (X_{si})

La siguiente tabla muestra los balances de materia para cada corriente suponiendo que se encuentra en estado estático.

Tabla 21 Balances de Materia para cada región del proceso ("Small Scale Continuous Cake Filtration using the Disposable Rotary Drum Filter," 2003)

Unidad de Operación.	Ecuaciones de Balance de Materia	Ec.
Dilución		
Solución	$M_{p2} = (1 - f_1)M_{p1}$	IV.1
Agua	$M_{p1}W_{p1} + M_{w3} = M_{p2}W_{p2}X_{s2}$	IV.2
CaCO ₃	$M_{p1}W_{p1}X_{s1} + M_{w3}X_{s3} = M_{p2}W_{p2}X_{s2}$	IV.3
Formación de la torta		
Solución	$M_{p4} = (1 - f_2)M_{p2}$	IV.4
Agua	$M_{p2}W_{p2} = M_{p4}W_{p4} + M_{w5}$	IV.5
CaCO ₃	$M_{p2}W_{p2}X_{s2} = M_{p4}W_{p4}X_{s4} + M_{w5}X_{s5}$	IV.6
Zona de Lavado		
Solución	$M_{p6} = (1 - f_3)M_{p4}$	IV.7
Agua	$M_{p4}W_{p4} + M_{w1} = M_{p6}W_{p6}X_{s8}$	IV.8
CaCO ₃	$M_{p4}W_{p4}X_{s4} + M_{w1}X_{s7} = M_{p6}W_{p6}X_{s6} + M_{w8}X_{s8}$	IV.9
Zona de secado		

Unidad de Operación.	Ecuaciones de Balance de Materia	Ec.
Solución	$M_{p9} = (1 - f_4)M_{p6}$	IV.10
Agua	$M_{p6}W_{p6} = M_{p9}W_{p9} + M_{w10}$	IV.11
CaCO ₃	$M_{p6}W_{p6}X_{s6} = M_{p9}W_{p9}X_{s9} + M_{w10}X_{s10}$	IV.12
Aguas Residuales		
Agua	$M_{w5} + M_{w8} + M_{w10} = M_{w11}$	IV.13
CaCO ₃	$M_{w5}X_{s5} + M_{w8}X_{s8} + M_{w10}X_{s10} = M_{w11}X_{s11}$	IV.14
Recirculación		
Agua	$M_{w3} + M_{w12} = M_{w11}$	IV.15
CaCO ₃	$M_{w3}X_{s3} + M_{w12}X_{s12} = M_{w11}X_{s11}$	IV.16

S_{spi} , W_{pi} y X_{si} se encuentran relacionados por la siguiente ecuación:

$$W_p = \frac{1 - S_{spi}}{S_{spi}(1 + X_{si}) - X_{si}} \quad \text{Ecuación IV.17}$$

Eficiencia de lavado:

El desempeño del sistema de lavado es usualmente descrito por el factor de dilución DF y el desplazamiento del radio DR.

$$DF = \left(\frac{M_{w7}}{M_{p2}} \right) - W_{p9} \quad \text{Ecuación IV.18}$$

$$DR = \left(\frac{X_{s2} - X_{s9}}{X_{s2} - X_{s7}} \right) \quad \text{Ecuación IV.19}$$

Además, el concepto de eficiencia global del sistema de lavado Y, expresa la fracción de sólidos disueltos eliminados en el sistema

$$Y = \frac{M_{w12}X_{s12} - M_{w7}X_{s7}}{M_{p4}W_{p4}X_{s4} + M_{w7}X_{s7}} \quad \text{Ecuación IV.20}$$

La eficiencia de lavado local Y_L , expresa la fracción de sólidos disueltos eliminada en la zona de lavado.

$$Y_L = \frac{M_{w8}X_{s8}}{M_{p6}W_{p6}X_{s6} + M_{w8}X_{s8}} \quad \text{Ecuación IV.21}$$

Balance de materia para el filtro de tambor rotatorio:

El límite bajo para Y_L es Y_{Li} suponiendo que hay una mezcla perfecta entre el fluido de lavado y la solución de Alimentación. Por lo tanto, el modelo de mezcla perfecta es $X_{s6} = X_{s8}$,

$$Y_{Li} = \frac{M_{w8}}{M_{p8}W_{p8} + M_{w8}} \quad \text{Ecuación IV.22}$$

El límite máximo es Y_{Ls} :

$$Y_{Ls} = 1 - \frac{M_{p6}W_{p6}X_{s7}}{M_{p4}W_{p4}X_{s4} + M_{w7}X_{s7}} \quad \text{Ecuación IV.23}$$

En conclusión:

$$Y_L = Y_{Ls}x_f + (1 - x_f)Y_{Li} \quad \text{Ecuación IV.24}$$

4.5.6 Diagrama P&ID del proceso de filtración.

El diagrama de tubería e instrumentación se encuentra en el anexo A.9 con su respectivo sistema de control.

4.5.7 Filosofía de control

A continuación se describe las estrategias o lógicas del sistema de control a implementar, de tal forma que permita la operación segura y confiable del sistema de filtración propuesto. De este modo, las estrategias o lógicas propuestas deben permitir una operación sencilla y segura para la cual se requiere

- PI-001: Indicador de presión en la corriente de salida de la bomba de alimentación.
- PIC-001: Controlador de presión que actúa para salvaguardia de la bomba, cuando esto sucede envía una señal a la bomba apagándola.
- FI-002: Indicador de flujo en la corriente de salida de filtrado clarificado del tambor.
- FIC-002: Controlador de flujo que actúa cuando el indicador de flujo envía una señal errónea, cuando esto sucede envía una señal de fallo al controlador de presión y este se encarga de apagar la bomba.
- SIT-003: Indicador de Velocidad de giro del tambor del filtro que permite censar las revoluciones del tambor para que no sobrepase sus rangos de velocidad que son de 10 a 60rpm.
- PI-004: Indicador de Presión de la bomba de vacío para evitar pérdidas en la bomba y futuras perdidas en el proceso de filtración.
- LG-005: Indicador de nivel del tanque de clarificado para evitar derramamientos en el mismo.

Finalmente, las estrategias de los lazos de control, funciones lógicas, funciones secuenciales y otros algoritmos de control podrán ser ejecutados con un control en cascada donde el controlador de flujo y de presión se encuentra relacionados censando estas dos variables y actuando sobre la bomba de vacío que es el elemento final de control.

4.5.8 DataSheet proceso de filtración

El resumen de las especificaciones de equipos propuestas para el sistema de filtración está dada en la tabla 22

Tabla 22 DataSheet Equipos involucrados en el proceso.

TAG	SERVICIO	FLUIDO	TIPO	Dimensiones			Condiciones de operación		Material
				Alto <cm>	Ancho <cm>	Largo <cm>	Temperatura <°C>	Presión <bar>	
P-001	Bomba de alimentación	Agua y Carbonato	Horizontal	34	40	45	21	–	Acero 304
TK-001	Tanque de alimentación con agitación.	Agua y Carbonato	Horizontal	70	30	30	21	1	PVC
TK-002	Tanque de almacenamiento residuos solidos	Carbonato	Horizontal	35	15	15	21	1	PVC
TK-003	Tanque de almacenamiento residuos líquidos.	Agua y carbonato	Horizontal	70	30	30	21	1	PVC
VP-001	Bomba de vacío filtro de tambor.	Agua y carbonato	Horizontal	41	57	85	21	–	Acero
RDVF-001	Filtro de tambor rotatorio	Agua y carbonato	Vertical	69	70	100	21	1	Acero
LV-001	Sistema de lavado	Agua	Horizontal	85	3.5	3.5	21	1	PVC

4.5.9 Plot Plant

El Plot Plan propuesto para el sistema de filtración se presenta en el anexo A.10. La ubicación del sistema de filtración será en el laboratorio de operaciones unitarias. Se seleccionó el lugar indicado en el plano ya que se encontraba cerca al equipo de evaporación de doble efecto y se plantea usar una de las bombas de vacío del mismo debido a que se puede disminuir costos y sus especificaciones se adaptan al dimensionamiento realizado. Además el área seleccionada cuenta con facilidades de conexiones eléctricas.

4.5.10 Manual de Operación y de Mantenimiento Preventivo y Correctivo.

Instrucciones para la puesta en marcha

1. Realizar inspección de los tanque y el contenedor de CaCO_3
2. Realizar el cargue del tanque de alimentación.
3. Verificar la conexión eléctrica.
4. Asegurar nivel en el tanque de alimentación para la puesta en marcha de la bomba de alimentación.
5. Energizar el agitador del filtro
6. Chequear funcionamiento de la bomba de vacío.

Procedimiento para la operación del filtro rotatorio

1. Preparar la solución a filtrar, usando CaCO_3 en agua para obtener una concentración final entre el 1 y 2 % m/v. Seguidamente la solución se lleva al tanque de alimentación y se enciende el agitador con el fin de homogenizarla.
2. Posteriormente accionar el tambor giratorio del filtro y registrar el tiempo requerido para un determinado número de vueltas.
3. Abrir la válvula de paso del tanque de alimentación al filtro, manteniendo el tambor en su máximo nivel para procurar la mayor separación. Se efectúa la filtración de la muestra preparada.
4. A medida que rota el tambor retirar el CaCO_3 adherido y verificar que se deposita en la bandeja.
5. Evacuar el filtrado y determinar el caudal. Después tomar una muestra del filtrado y titular con el fin de calcular la concentración de CaCO_3 .
6. Finalmente, pesar la torta depositada en la bandeja, llevar a un horno para retirar la humedad y evaluar el porcentaje de recuperación del CaCO_3 .

Instrucciones de apagado

1. Apagar las bombas P-001, VP-001, el agitador del tanque de alimentación y el tambor de giro.

2. Suspender el suministro de agua del sistema de lavado.
3. Cerrar la válvula del tanque de residuos líquidos para detener la retroalimentación
4. Apagar la bomba de vacío del equipo de filtración.
5. Esperar hasta que no se observe formación de torta en el medio filtrante
6. Desocupar el tambor del filtro.
7. Desenergizar el sistema

Apagado de Emergencia

Ante cualquier situación de emergencia se recomienda apagar la bomba P-001, la bomba de vacío VP-001 y seguidamente desenergizar el filtro y los agitadores.

4.5.11 Análisis de Riesgos (What If)

El objeto principal de las revisiones de análisis de riesgo What If es asegurar que los eventos de fallo van a ser evitados y/o mitigados durante el tiempo la operación del sistema de filtración. Un análisis What If proporciona un análisis en la etapa conceptual para proporcionar una mayor confiabilidad.

Tabla 23 Revisión Análisis de Riesgos

QUE PASA SI	CONSECUENCIA	SALVAGUARDAS	RIESGO			CONSECUENCIA	RECOMENDACION
			C	P	RAM		
Ocurre derrame de tanque de clarificado	Perdida de CaCO ₃	Control de flujo en cascada para suspender el proceso	3	B	L	Proceso	Garantizar señal de control de nivel en el tanque de clarificado
Bajo nivel en el tanque de alimentación	Parada de proceso para proteger la bomba	Sensor de bajo nivel	3	B	L	Proceso	Garantizar señal de control de nivel en el tanque de alimentación
Perdida de vacío por daño en conexiones	Se afecta el proceso de filtración	Indicador de presión de vacío	2	B	N	Proceso	Chequear conexiones antes iniciar el proceso

Daño de la bomba de vacío	Se afecta el proceso de filtración	Sistema de control para apagar la bomba	2	C	L	Proceso	Mantener una operación estable.
Derrame de suspensión a filtrar por alto nivel en el contenedor del filtro.	Gasto energético	Chequear el flujo de agua de lavado	2	C	L	Económico	Cerrar manualmente la válvula de agua de agua de alimentación

La metodología usada en el desarrollo del análisis de Riesgos What If realizado al sistema de filtración se encuentra en el anexo A.11, y la respectiva tabla para analizar las situaciones de riesgo están registradas en el Anexo A.12.

CONCLUSIONES

El dimensionamiento del sistema de filtración propuesto se llevó a cabo con base en las mejores prácticas de ingeniería y demandó un estudio detallado de antecedentes, una buena selección de condiciones requeridas y la aplicación de conocimientos para desarrollar a nivel conceptual un prototipo viable, sencillo y de bajo costo.

Se pudo evaluar y seleccionar a partir del método Electre el equipo de filtración óptimo teniendo en cuenta factores como bajo costo de mantenimiento, bajo consumo energético, facilidades de control, y alta eficiencia. (Tabla 5). Se encontró que el filtro de tambor rotatorio se adapta a las condiciones requeridas ya que tiene una relación costos beneficios mayores a las otras alternativas establecidas.

Por otro lado también se encuentra que el tipo de descarga más adecuado para el equipo de filtración es por raspadores, esto se debe al solido en suspensión ya que su literatura frecuentemente recomienda el uso de este tipo de descarga

Se seleccionó el medio filtrante que presentó la mejor eficiencia de filtrado así como un óptimo desempeño en el proceso de lavado es decir, el material filtrante que cumple con las expectativas de filtración y además presenta buenas propiedades de resistencia al desgaste por lavado del equipo.

Teniendo en cuenta el análisis de riesgo realizado al sistema de filtración, se encontró que durante el proceso existen condiciones operacionales que pueden llevar a situaciones de fallo, teniendo en cuenta lo anterior se incluyó un sistema de control en cascada que enlaza el flujo y la presión de proceso automáticamente para anticiparse a los posibles fallos del sistema y mejorar la confiabilidad y disponibilidad del filtro.

RECOMENDACIONES

Se recomienda tener en cuenta los materiales de construcción del sistema de filtración con el fin de disminuir los costos, ya que el PVC para la instalación de tuberías y tanques de depósito reducen un 30% los gastos y no afecta el proceso de filtración.

Al momento de poner en marcha este diseño conceptual se recomienda tener en cuenta que el margen de error se encuentra entre un 20 y 35%.

Si se utiliza un sólido diferente al carbonato de calcio en la solución de filtrado se recomienda un previo ensayo de laboratorio, para estudiar las propiedades de la solución a filtrar y las condiciones operacionales requeridas, con el fin de garantizar una buena operación del proceso.

Tener muy en cuenta el manual de operación y de mantenimiento preventivo para evitar posibles daños tanto en el equipo como en las personas que se encuentren operándolo

Debido a que el modo de operación del filtro es continuo, el medio filtrante mantendrá constante contacto con la suspensión a filtrar, teniendo en cuenta lo anterior y con el fin de aumentar la vida útil del medio filtrante se recomienda el uso de materiales fibrosos como por ejemplo el propileno.

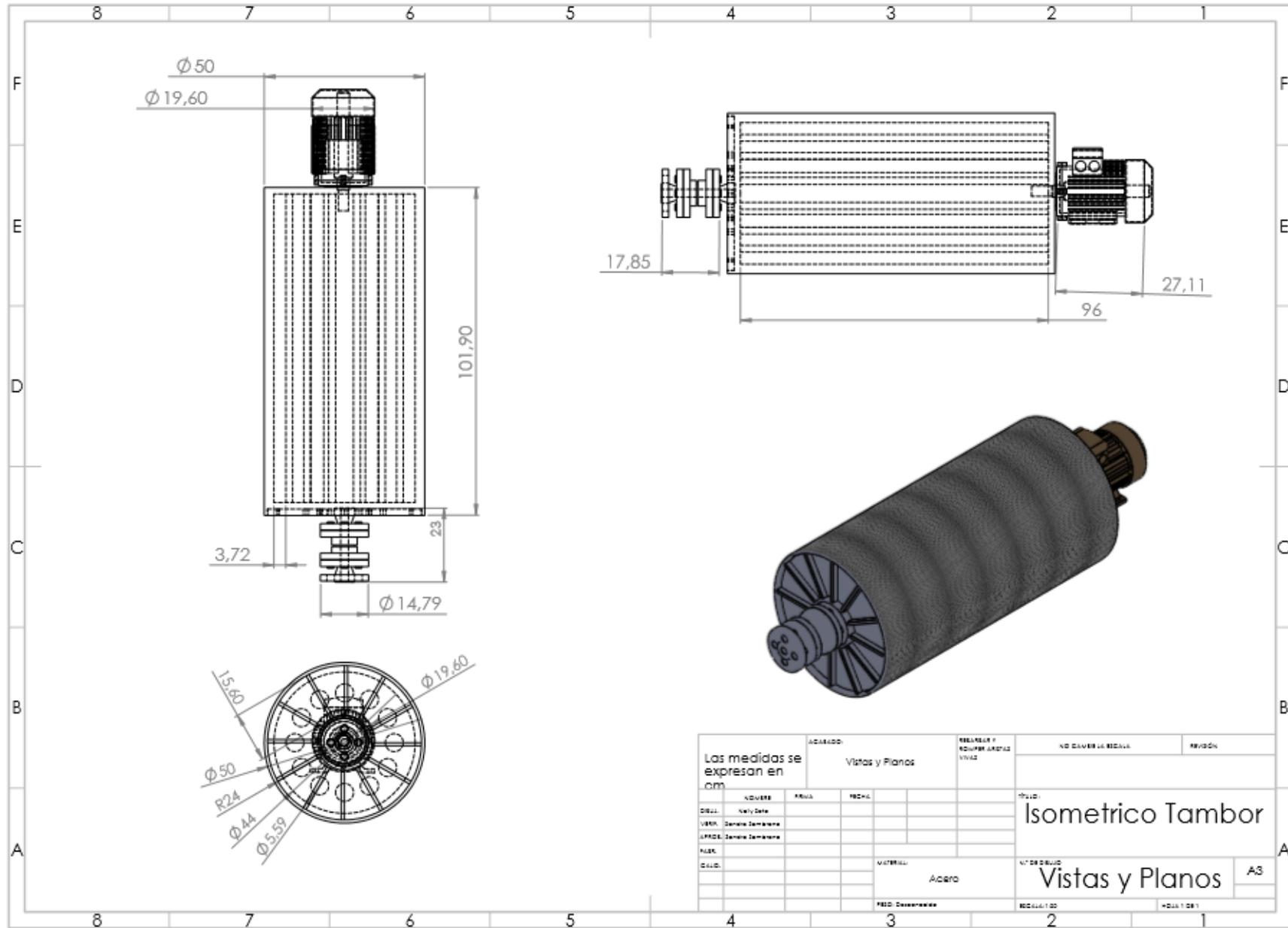
Para reducir costos al momento de llevar a cabo la construcción del sistema se recomienda la adaptación de una de las bombas de vacío del evaporador ya que cumple perfectamente con las especificaciones necesarias para llevar a cabo el proceso de filtración.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

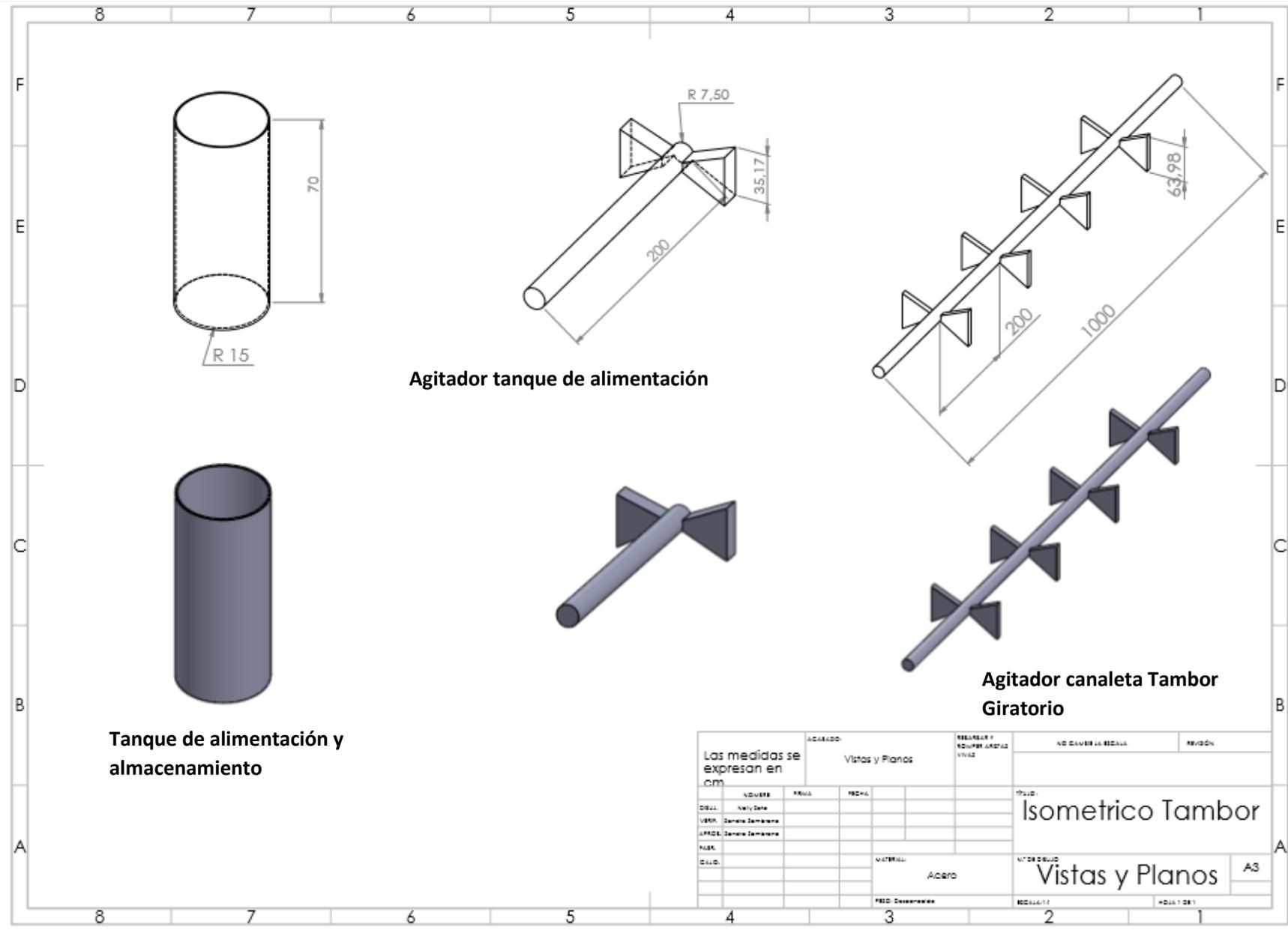
- Aguilar, E. O. (1997). Diseño de un filtro Horizontal rotatorio de vacio y su aplicacion en el proceso de fabricacion de acido fosforico por el west process. *Guatemala*.
- Bourcier, D., Féraud, J. P., Colson, D., Mandrick, K., Ode, D., Brackx, E., & Puel, F. (2016). Influence of particle size and shape properties on cake resistance and compressibility during pressure filtration. *Chemical Engineering Science*, *144*, 176-187. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2016.01.023>
- Calviño, N. O. (2006). Filtracion de aguas residuales para reutilizacion *Tenerife*.
- Chopey, N. (2010). Handbook of chemical engineering calculations. Comercial. (2008). Catalogo Kelvin.
- Comercial. (2012). Analisis comercial Carbonato de Calcio.
- Feng, Z., Long, Z., & Yu, T. (2016). Filtration characteristics of fibrous filter following an electrostatic precipitator. *Journal of Electrostatics*, *83*, 52-62. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.elstat.2016.07.009>
- Haataja, R., Leiviskä, K., & Uronen, P. (1986). CONTROL OF AN INDUSTRIAL DRUM FILTER BY USING ADAPTIVE MODELS A2 - PAUL, M *Digital Computer Applications to Process Control* (pp. 121-129). Oxford: Pergamon.
- Hale, D. J. (2009). Aspects of rotary vacuum filters design and operation.
- Höflinger, W., & Hackl, A. (1990). Evaluation of optimal knife advances for precoat filtration on rotary vacuum filters. *Filtration & Separation*, *27*(2), 110-113. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/0015-1882\(90\)80210-C](http://dx.doi.org/10.1016/0015-1882(90)80210-C)
- Holdich, R. G. (1990). Rotary vacuum filter scale-up calculations — and the use of computer spreadsheets. *Filtration & Separation*, *27*(6), 435-439. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/0015-1882\(90\)80538-V](http://dx.doi.org/10.1016/0015-1882(90)80538-V)
- Hutten, I. M. (2016a). Chapter 2 - Filtration Mechanisms and Theory *Handbook of Nonwoven Filter Media (Second Edition)* (pp. 53-107). Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Hutten, I. M. (2016b). Chapter 4 - Raw Materials for Nonwoven Filter Media *Handbook of Nonwoven Filter Media (Second Edition)* (pp. 158-275). Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Kuzmina, L. I., & Osipov, Y. V. (2016). Deep Bed Filtration Asymptotics at the Filter Inlet. *Procedia Engineering*, *153*, 366-370. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.129>
- Lee, K.-S., Sohn, J.-R., & Park, Y.-O. (2015). Filtration performance characteristics of ceramic candle filter based on inlet structure of high-temperature and high-pressure dust collectors. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, *21*, 101-110. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jiec.2014.09.004>
- McCabe, W. L., Smith, J. C., & Harriot, P. (2006). Operaciones Unitarias en Ingenieria Quimica. *Septima Edicion*.
- Minyuan, G. (1989). Developing a rotary-drum vacuum filter to world standards. *Filtration & Separation*, *26*(1), 10-11. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0015-1882\(89\)80031-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0015-1882(89)80031-X)

- NTC 3006. (2016).
- Osborne, D. G. (1976). Rotary-vacuum filtration of coal flotation concentrates. *International Journal of Mineral Processing*, 3(2), 175-191. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/0301-7516\(76\)90033-8](http://dx.doi.org/10.1016/0301-7516(76)90033-8)
- Perlmutter, B. A. (2015). Chapter 3 - Types of Filtration Systems *Solid-Liquid Filtration* (pp. 35-45). Boston: Butterworth-Heinemann.
- Richardson's, C. a. Particle Technology and Separation Processes. 2.
- Rushton, A. (1978). Pressure variation effects in rotary drum filtration with incompressible cakes. *Powder Technology*, 20(1), 39-46. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/0032-5910\(78\)80006-0](http://dx.doi.org/10.1016/0032-5910(78)80006-0)
- Serrano, H. A. V. (2013). Evaluacion del sistema de filtracion en multiples etapas ifime en tanques plasticos con presedimentacion y retrolavado. *Socorro*.
- Small Scale Continuous Cake Filtration using the Disposable Rotary Drum Filter. (2003). *Filtration & Separation*, 40(9), 26-27. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0015-1882\(03\)00926-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0015-1882(03)00926-1)
- Soua, Z., Mouroko-Mitoulou, T., & Vorobiev, E. (2004). Study of Filtration/Liquefaction of Calcium Carbonate Dispersions. *Chemical Engineering Research and Design*, 82(1), 105-109. doi:<http://dx.doi.org/10.1205/026387604772803115>
- Sparks, T. (2012). Chapter 7 - Filter Design *Solid-Liquid Filtration* (pp. 81-124). Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Sparks, T., & Chase, G. (2016a). Section 1 - Filtration – Introduction, Physical Principles and Ratings *Filters and Filtration Handbook (Sixth Edition)* (pp. 1-54). Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Sparks, T., & Chase, G. (2016b). Section 4 - Solid–Liquid Filtration *Filters and Filtration Handbook (Sixth Edition)* (pp. 199-295). Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Sutherland, K. (2009a). Energy efficiency: Filter media and energy efficiency. *Filtration & Separation*, 46(1), 16-19. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0015-1882\(09\)70086-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0015-1882(09)70086-2)
- Sutherland, K. (2009b). Process filters: What's new in process filtration? *Filtration & Separation*, 46(6), 15-17. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0015-1882\(09\)70224-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0015-1882(09)70224-1)
- Sutherland, K. (2010). Filter and Filtration Handbook. *Fifth Seccion* 14.
- T. Sivakumar*, G. V., A. Vimal Kumar**. ENHANCING THE PERFORMANCE OF ROTARY VACUUM DRUM FILTER. *Technical Journal*.

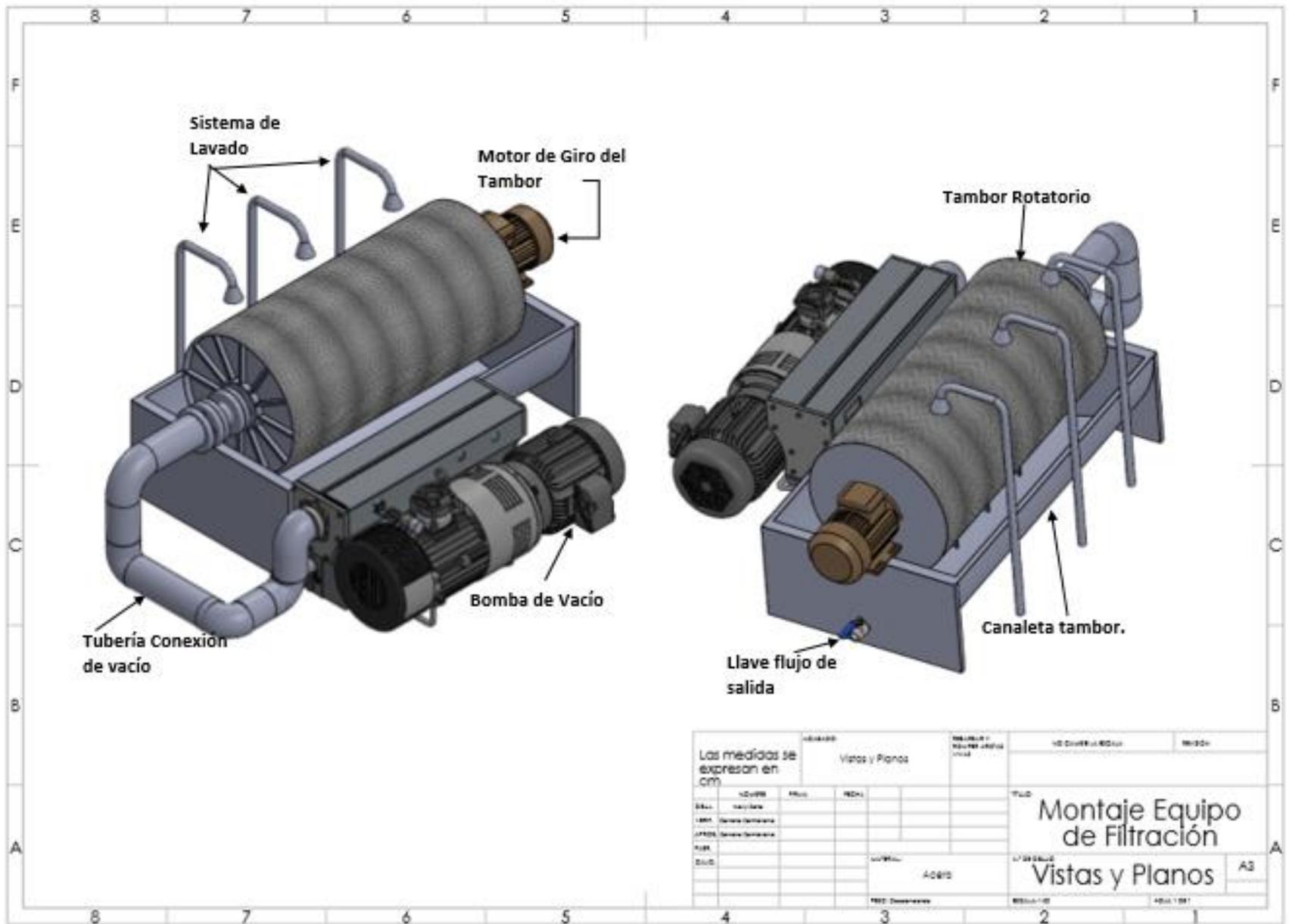
Anexo A 1 Planos Tambor Rotatorio Equipo de Filtración.



Anexo A 5 Diagrama Isométrico Tanques y Agitadores

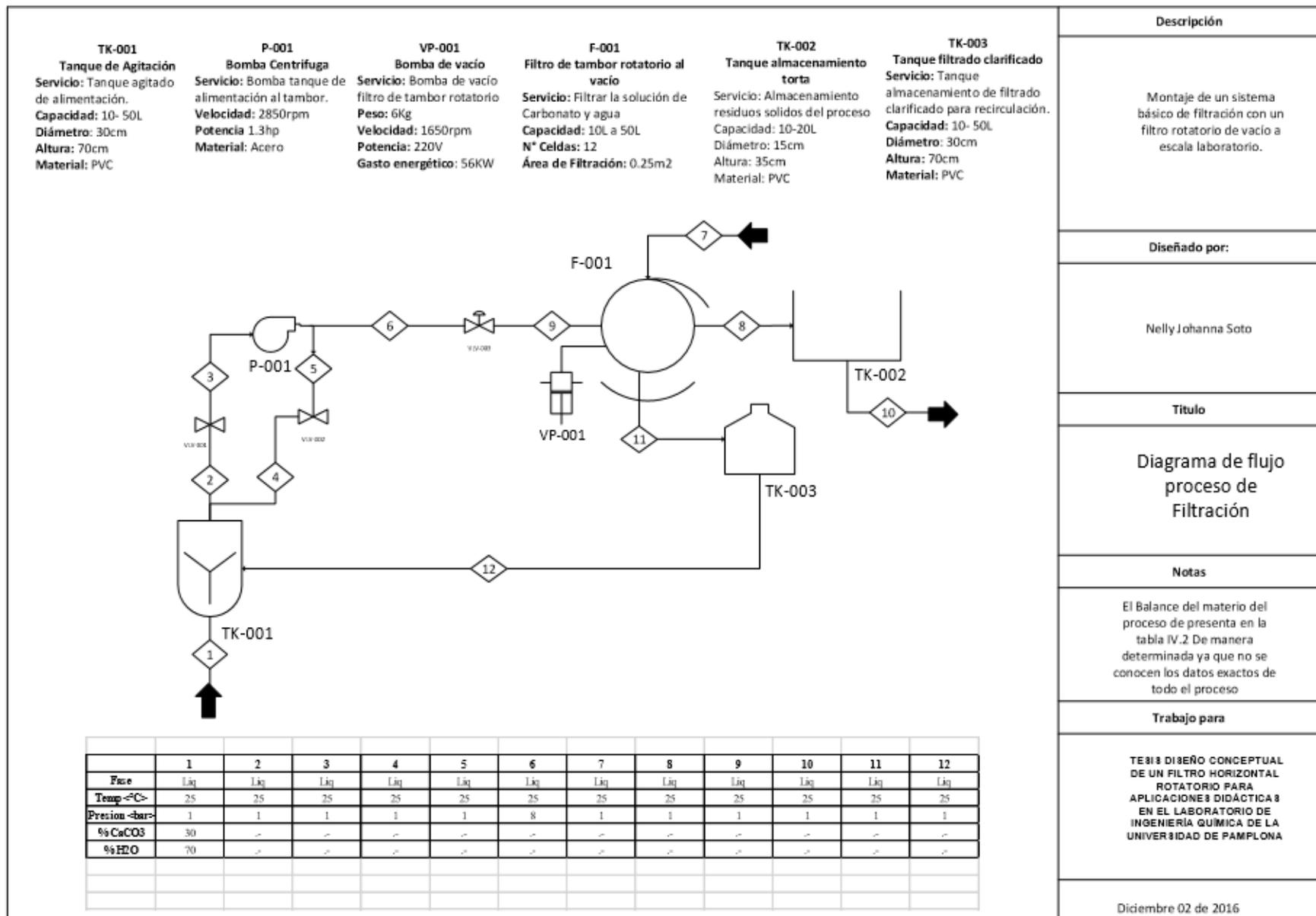


Anexo A 6 Montaje equipo de Filtración.

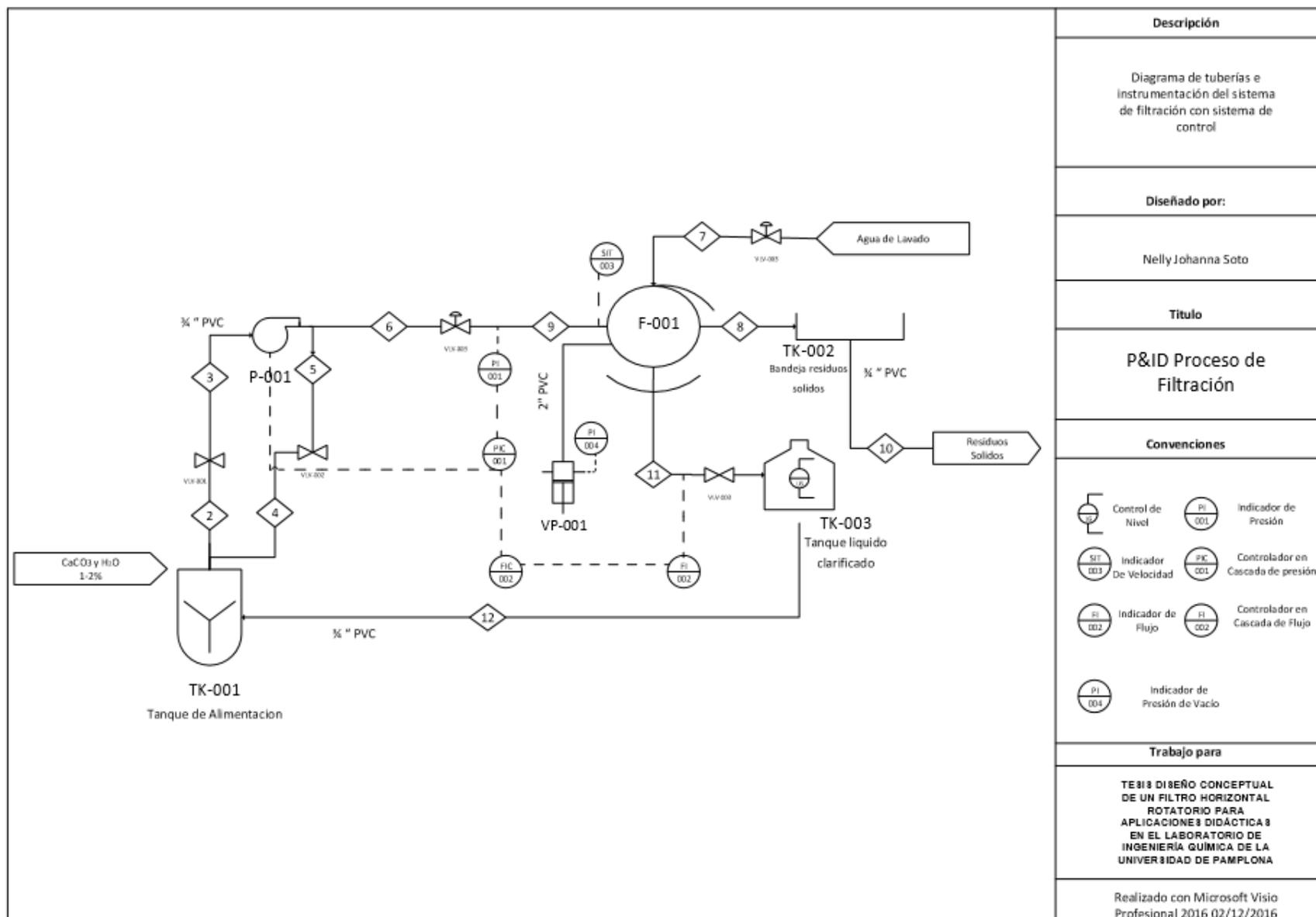


Fuente: Autor

Anexo A 8 Diagrama de Flujo del proceso.

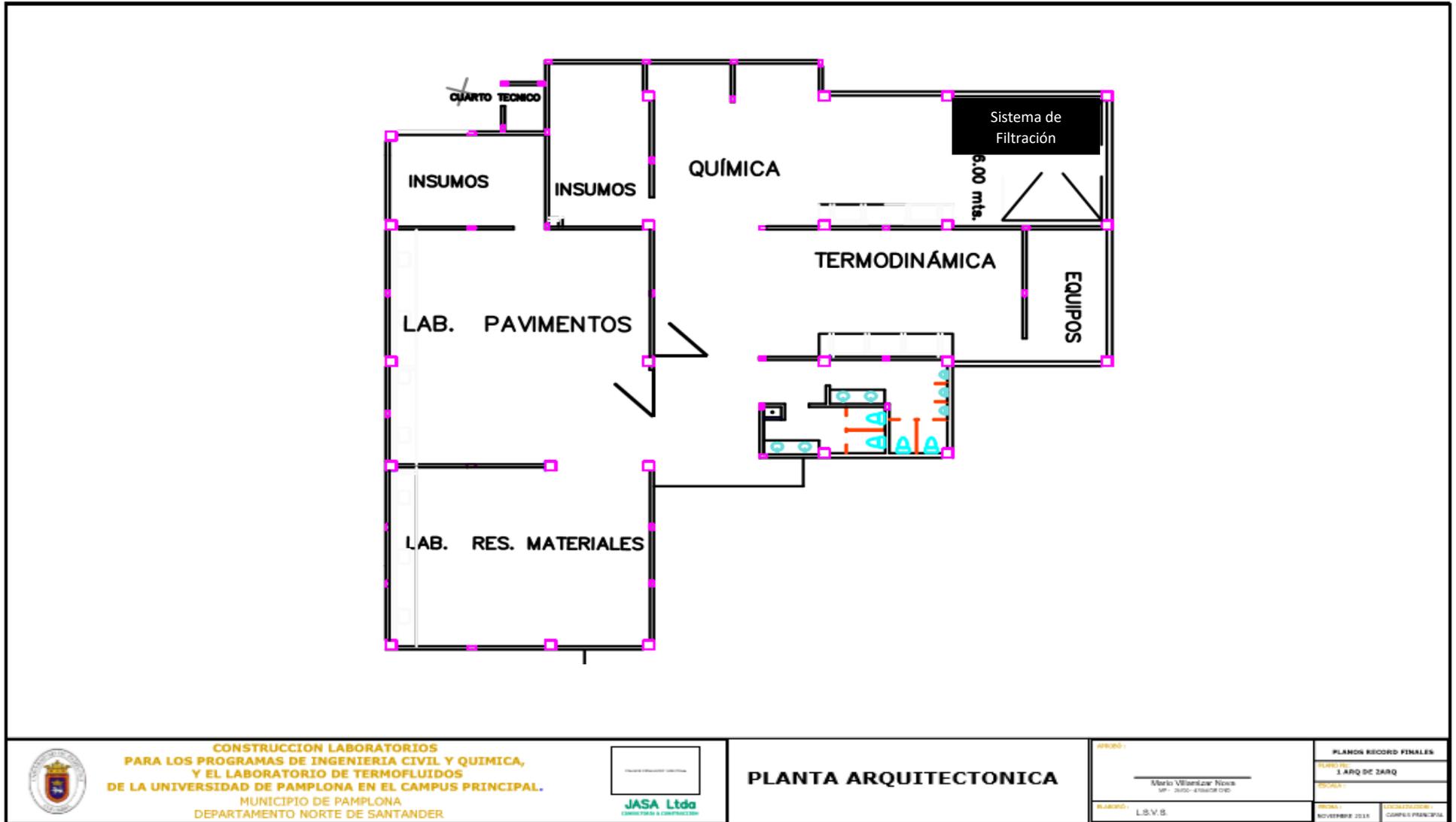


Anexo A 9 Diagrama de Tuberías e Instrumentación. (P&ID)



Fuente: Autor

Anexo A 10 Plot Plant



CONSTRUCCION LABORATORIOS
 PARA LOS PROGRAMAS DE INGENIERIA CIVIL Y QUIMICA,
 Y EL LABORATORIO DE TERMOFLUIDOS
 DE LA UNIVERSIDAD DE PAMPLONA EN EL CAMPUS PRINCIPAL.
 MUNICIPIO DE PAMPLONA
 DEPARTAMENTO NORTE DE SANTANDER



PLANTA ARQUITECTONICA

PROYECTO:
 Mario Villanueva Novoa
 M.P. 2000-470408-010
 ELABORADO:
 L.S.V.B.

PLANOS RECORD FINALES	
CLASIFICACION:	1 ARQ DE 2ARQ
ESCALA:	
FECHA:	NOVIEMBRE 2018
LOCALIZACION:	CAMPUS PRINCIPAL

Fuente: William Leguizamon

Anexo A 11 Metodología Revisión Análisis de Riesgos.

- i. Definir las suposiciones técnicas que van a ser revisadas en el proceso.
- ii. Definir las fronteras y los modos operacionales del proceso bajo revisión.
- iii. Seleccionar y confirmar el objetivo de un nodo.
- iv. Explicar las intenciones generales de diseño y las condiciones de operación del nodo.
- v. Especificar los parámetros de proceso del nodo.
- vi. Seleccionar y formular una pregunta Qué pasa si...
- vii. Identificar todos los escenarios de peligro de la pregunta en cuestión.
- viii. Identificar todas las consecuencias asociadas con cada escenario de peligro, sin tener en cuenta las salvaguardas.
- ix. Especificar las salvaguardas predominantes contra cada consecuencia.
- x. Determinar la probabilidad y severidad de cada consecuencia y documentarla si es necesario.
- xi. Hacer recomendaciones para mitigar las consecuencias y la severidad y probabilidad de acuerdo a los niveles de riesgo aceptables.
- xii. Repetir los pasos anteriores con otra pregunta Qué pasa si...
- xiii. Repetir los pasos anteriores para todos los nodos del proceso en revisión.
- xiv. Después de realizad el ejercicio el equipo de análisis debe clasificar (valorar mediante matriz RAM), todas las recomendaciones y priorizarlas de acuerdo al nivel de riesgo para implementación.
- xv. Elaborar un resumen de las recomendaciones en orden de prioridad (ranking)

Anexo A 12 Tabla de Análisis What If

Consecuencia					Probabilidad				
					A	B	C	D	E
Personas	Económica*	Ambiente	Proceso		Improbable	Remoto	Probable	Ocasional	Frecuente
Una o más fatalidades	Catastrófica >10COP	Contaminación Irreparable	Pérdida total de Reactivos	5	M	M	H	H	VH
Incapacidad Permanente	Grave 2 y 10 COP	Contaminación Mayor	Perdida leve de liquido	4	L	M	M	H	H
Incapacidad Temporal	Severo 1 a 2 COP	Contaminación Localizada	Derrames Considerables del tambor	3	N	L	M	M	H
Lesión Menor	Importante 0,5 a 0,9 COP	Efecto menor	Derrames leves del tambor	2	N	N	L	L	M
Lesión Leve	Marginal <0,3COP	Efecto Leve	Demora del proceso Leve	1	N	N	N	L	L
Ningún efecto	Ninguna	Ningún Efecto	Ninguna	0	N	N	N	N	N

***valores en millones**