

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA

DISEÑO DE UN FILTRO A ESCALA PILOTO PARA LA RETENCIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS DE AGUA RESIDUAL PROVENIENTE DE UNA EMPRESA LICORERA EMPLEANDO CAUCHO DE NEUMÁTICOS USADOS

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERA QUÍMICA**

MARÍA FERNANDA DELGADO CASTILLO
mfdelgadocastillo@hotmail.com

DIRECTOR: ING. MARIO ALDÁS
marioanibalaldas@hotmail.com

CO-DIRECTORA: ING. LILIANA GUZMÁN
liliana.guzman@epn.edu.ec

Quito, Abril 2016

© Escuela Politécnica Nacional (2015)
Reservados todos los derechos de reproducción

DECLARACIÓN

Yo, María Fernanda Delgado Castillo, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

María Fernanda Delgado Castillo

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por María Fernanda Delgado Castillo, bajo mi supervisión.

Ing. Mario Aldás
DIRECTOR DE PROYECTO

Ing. Liliana Guzmán
CODIRECTORA DE PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Agradezco infinitamente a Dios por todas las bendiciones recibidas, por regalarme la dicha de tener una familia; por la satisfacción de poder alcanzar uno de mis grandes sueños.

De la misma manera, mi mayor agradecimiento a mi madre Lic. Julia Castillo León por su total apoyo durante toda mi vida e inculcarme valores que me han hecho crecer como persona, a mi padre y a mi hermana por todo su apoyo incondicional en cada momento, por sus consejos y por la confianza depositada en mí y en mis capacidades físicas e intelectuales.

Agradezco a mi Director Ing. Mario Aldás, a mi Co-directora Ing. Liliana Guzmán y a la vez al Ing. Oswaldo Proaño por su ayuda y tiempo dedicado en el desarrollo del presente Proyecto de Titulación. A todos mis profesores quienes a lo largo de mi formación académica supieron impartir de la mejor manera sus conocimientos.

Mi agradecimiento a esta universidad que me abrió las puertas en donde me he formado como persona y como profesional.

María Fernanda Delgado Castillo

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios en gratitud a todas las bendiciones y dichas recibidas.

De manera muy especial dedico este trabajo a mi mamita Tuca que aunque no esté presente físicamente sé que desde el cielo me da sus bendiciones y se sentirá muy orgullosa de mi.

A mi madre, a mi padre y hermana pilares fundamentales en mi vida que siempre tuvieron una palabra de alivio frente todo obstáculo, y a mis sobrinas Vicky, Victoria y Lua.

A mi papito José a quién amo con todo mi corazón por ser para mí un gran ejemplo a seguir, una persona trabajadora, honrada y responsable.

María Fernanda Delgado Castillo

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
RESUMEN	ix
INTRODUCCIÓN	x
1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	1
1.1 Filtración	1
1.1.1 Tipos de Filtración	1
1.1.1.1 Filtración superficial o en torta	2
1.1.1.2 Filtración en volumen o a profundidad	13
1.1.1.3 Filtración de flujo cruzado o ultrafiltración	14
1.1.2 Mecanismos de filtración	15
1.1.2.1 Mecanismo de depósito	15
1.1.2.2 Mecanismo de fijación	17
1.1.2.3 Mecanismo de desprendimiento	17
1.1.3 Atascamiento y lavado del material filtrante	18
1.1.4 Elección del tipo de filtración	19
1.1.5 Filtros de arena	20
1.1.6 Diseño de filtros	21
1.1.6.1 Agua sobrenadante en el filtro	22
1.1.6.2 Lecho de arena o caucho	22
1.1.6.3 Sistema de drenaje	24
1.1.6.4 Caja del filtro	25
1.2 Efluentes de la industria licorera	26
1.2.1 Procesos para la obtención de alcohol	27
1.2.1.1 Producción de efluentes en la industria licorera en el Ecuador	28
1.2.1.2 Contaminantes de los efluentes de la industria licorera	29
1.2.2 Tratamiento de los efluentes de la industria licorera	29
2. PARTE EXPERIMENTAL	31
2.1 Tratamiento y adecuación del caucho proveniente de neumáticos usados	31
2.1.1 Diagrama de Bloques	31
2.1.1.1 Selección de neumáticos	32
2.1.1.2 Tratamiento previo	33
2.1.1.3 Molienda y clasificación de tamaño	34
2.2 Evaluación del efecto de la altura del lecho y tamaño de la partícula sobre la cantidad de sólidos suspendidos en el efluente	37
2.2.1 Montaje experimental	37
2.2.2 Diseño experimental	39
2.2.2.1 Variables de diseño	39

2.2.2.2	Variable de respuesta	39
2.2.2.3	Combinaciones de los niveles de las variables de diseño	40
2.2.3	Procedimiento experimental	41
2.2.3.1	Operación del filtro con lecho de caucho molido	41
2.2.4	Determinación de la influencia de las variables de diseño: altura y granulometría del lecho	43
2.2.5	Determinación de las condiciones óptimas de operación	43
2.3	Diseño de un filtro multicapa a escala piloto	43
2.3.1	Caracterización de las partículas de caucho molido	43
2.3.1.1	Coefficiente de uniformidad	44
2.3.1.2	Porosidad	45
2.3.1.3	Esfericidad y tamaño de poro	45
2.3.1.4	Permeabilidad	45
2.3.1.5	Filtración a presión constante	46
2.3.2	Diseño del filtro a escala piloto	47
2.3.2.1	Diseño preliminar	47
2.3.2.2	Número de filtros	47
2.3.2.3	Área de filtración y dimensiones de filtración	48
2.3.2.4	Pérdidas de carga	49
2.3.2.5	Soportes del filtro	50
2.3.2.6	Retrolavado del filtro	51
2.4	Estimación del costo del filtro multicapa a escala piloto	51
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	53
3.1	Tratamiento y adecuación del caucho molido	53
3.1.1	Resultados de la molienda de neumáticos usados	53
3.2	Evaluación del efecto de la altura del lecho y tamaño de la partícula sobre la cantidad de sólidos suspendidos en el efluente	54
3.2.1	Resultados experimentales	54
3.2.2	Análisis estadístico	55
3.2.2.1	Modelo estadístico 3×2	56
3.2.2.2	Verificación de los supuestos del modelo	57
3.2.3	Influencia de las variables de diseño sobre la variable de respuesta	59
3.2.3.1	Tabla ANOVA	59
3.2.3.2	Diagrama de Pareto	61
3.2.4	Condiciones óptimas de operación	62
3.3	Diseño del filtro multicapa	64
3.3.1	Caracterización de las partículas de caucho molido	64
3.3.1.1	Coefficiente de uniformidad	64
3.3.1.2	Porosidad	65
3.3.1.3	Esfericidad y tamaño de poro	66
3.3.1.4	Permeabilidad	67
3.3.1.5	Filtración a presión constante	71

3.3.2	Diseño de un filtro multicapa a escala piloto	78
3.3.2.1	Diseño preliminar	78
3.3.2.2	Determinación del número de filtros	80
3.3.2.3	Área de filtración y dimensionamiento del filtro	81
3.3.2.4	Pérdida de carga a través de los lechos del filtro	83
3.3.2.4.1	Pérdida de carga a través del lecho de caucho	84
3.3.2.4.1	Pérdida de carga a través del lecho de arena	84
3.3.2.5	Soportes para el filtro multicapa	85
3.3.2.6	Retrolavado del filtro multicapa	88
3.3.2.7	Dimensionamiento de accesorios primarios y secundarios para el funcionamiento del filtro	89
3.3.2.7.1	Bomba para el filtrado	93
3.3.2.7.2	Bomba para el retrolavado	96
3.3.2.7.3	Bomba para la vinaza	98
3.4	Análisis del costo del filtro multicapa	103
3.4.1	Costo de operación	103
3.4.1.1	Costo de obtención de las partículas de caucho molido	103
3.4.1.2	Costo de agua potable para retrolavado	104
3.4.2	Costo directo de accesorios primarios y secundarios	105
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	106
4.1	Conclusiones	106
4.2	Recomendaciones	107
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109
	ANEXOS	114

ÍNDICE DE TABLAS

		PÁGINA
Tabla 2.1	Formulación de neumáticos BRIDGESTONE	33
Tabla 2.2	Características del molino de cuchillas empleado en la molienda del caucho	37
Tabla 2.3	Características del sistema de tamices empleados en la clasificación por tamaños del caucho molido	37
Tabla 2.4	Características del recipiente de vinaza	38
Tabla 2.5	Características del filtro	39
Tabla 2.6	Características del recipiente de recolección del filtrado	39
Tabla 2.7	Pruebas experimentales para un diseño factorial 3 x 2	41
Tabla 2.8	Características de la bomba de vacío	42
Tabla 2.9	Características de la balanza analítica empleada en el pesado	42
Tabla 2.10	Características de la mufla	43
Tabla 2.11	Datos experimentales de caucho molido en el laboratorio entre las malla # 8, 12 y 16	43
Tabla 2.12	Velocidad de filtración de diferentes lechos: altura 15 cm	43
Tabla 2.13	Coefficiente de superficie específica ϕ y porosidad ϵ para lechos de arena	50
Tabla 2.14	Precio de los elementos necesarios para la construcción del filtro multicapa	52
Tabla 3.1	Tratamiento de datos experimentales del caucho molido en el laboratorio entre mallas 8, 12 y 16	54
Tabla 3.2	Resultados de las pruebas experimentales de filtración	55
Tabla 3.3	Regresión ajustada al diseño factorial 3 x 2	56
Tabla 3.4	Análisis de varianza (ANOVA) para la retención de sólidos suspendidos	60

Tabla 3.5	Óptimo para la operación de filtración	64
Tabla 3.6	Tipos de permeabilidad y valores K	70
Tabla 3.7	Caracterización de las partículas de caucho molido entre las mallas 8, 12 y 16	71
Tabla 3.8	Filtración a presión constante para la mejor combinación de lecho: altura 15 cm y granulometría 1,19 mm	72
Tabla 3.9	Filtración a presión constante para el lecho: altura 15 cm y granulometría 1,68 mm	74
Tabla 3.10	Filtración a presión constante para el lecho: altura 15 cm y granulometría 2,38 mm	76
Tabla 3.11	Producción de etanol y vinaza por Sideral S.A.	78
Tabla 3.12	Porcentaje de remoción para la mejor combinación de los parámetros de las variables de entrada	79
Tabla 3.13	Resumen del balance de masa para un 10 % de la producción industria	80
Tabla 3.14	Características del filtro multicapa caucho-arena	82
Tabla 3.15	Densidades de los materiales empleados en el filtro	85
Tabla 3.16	Resumen de accesorios secundarios	101
Tabla 3.17	Resumen de accesorios primarios-válvulas	101
Tabla 3.18	Resumen de accesorios primarios-bombas	101
Tabla 3.19	Costos directos para la implementación del filtro multicapa	105

ÍNDICE DE FIGURAS

		PÁGINA
Figura 1.1	Zonas creadas en una filtración	3
Figura 1.2	Esquema de un filtro de mangas	12
Figura 1.3	Esquema de un filtro rotatorio de tambor	13
Figura 1.4	Filtración a profundidad	14
Figura 1.5	Mecanismos de depósito	17
Figura 1.6	Filtro lento y rápido de arena	20
Figura 1.7	Variación de la permeabilidad para diferentes tipos de lecho filtrante	23
Figura 1.8	Opciones para evitar la percolación	26
Figura 1.9	Proceso de producción de etanol	27
Figura 2.1	Esquema del procedimiento seguido para el diseño para la retención de sólidos suspendidos de agua residual proveniente de una empresa licorera empleando caucho de neumáticos usados	31
Figura 2.2	Estructura de un neumático	33
Figura 2.3	Fotografías de Molienda del caucho en el molino de cuchillas y obtención del caucho molido	35
Figura 2.4	Fotografías de Sistema de tamices y caucho clasificado por tamaño	36
Figura 2.5	Esquema del proceso empleado en el laboratorio	38
Figura 3.1	Verificación del supuesto de normalidad	57
Figura 3.2	Verificación del supuesto de varianza constante	58
Figura 3.3	Verificación del supuesto de independencia	59
Figura 3.4	Diagrama de Pareto	62
Figura 3.5	Efecto de la altura y granulometría del lecho sobre los sólidos suspendidos finales	63
Figura 3.6	Coefficiente de uniformidad del caucho molido entre las mallas 8, 12 y 16	65

Figura 3.7	Esfericidad del lecho de caucho en función de la porosidad	67
Figura 3.8	Valores del coeficiente correctivo del número de Reynolds en función de la porosidad y esfericidad	68
Figura 3.9	Valores del coeficiente correctivo de frotamiento en función de la porosidad y esfericidad	69
Figura 3.10	Rango de permeabilidad y su relación con el proceso de filtración	70
Figura 3.11	Volumen filtrado (L) en función del tiempo empleado (s)	73
Figura 3.12	Filtración a presión constante para lecho: altura 15 cm y Granulometría 1,19 mm	73
Figura 3.13	Filtración a presión constante para lecho: altura 15 cm y Granulometría 1,68 mm	75
Figura 3.14	Filtración a presión constante para lecho: altura 15 cm y Granulometría 2,38 mm	77
Figura 3.15	Esquema para realizar el balance de masa en el filtro con caucho, considerando el 97% de remoción de sólidos	79
Figura 3.16	Esquema del filtro multicapa caucho-arena	83
Figura 3.17	PFD del proceso de filtración	91
Figura 3.18	Esquema para el dimensionamiento de la bomba B-02	94
Figura 3.19	Esquema para el dimensionamiento de la bomba B-03	96
Figura 3.20	Esquema para el dimensionamiento de la bomba B-01	98
Figura 3.8	Verificación del supuesto de varianza constante	58
Figura 3.9	Verificación del supuesto de independencia	59
Figura 3.17	P&ID del proceso de filtración	99
Figura AI.1.	Abertura de tamices	115
Figura AII.1.	Características del Acero A-36	116
Figura AIII.1.	Pérdidas por fricción de accesorios	117

Figura AIV.1. Comparación entre diferentes tipos de filtros	118
Figura AV.1. Densidades de materiales sólidos	119
Figura AVI.1 Diagrama de Moody	120

ÍNDICE DE ANEXOS

	PÁGINA
ANEXO I Abertura de tamices	115
ANEXO II Características del Acero A-36	116
ANEXO III Pérdidas por fricción de accesorios	117
ANEXO IV Comparación entre diferentes tipos de filtros	118
ANEXO V Densidad de sólidos	119
ANEXO VI Diagrama de Moody	120
ANEXO VII Método estándar para el análisis de agua y aguas residuales (APHA)	121

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo fue diseñar un filtro a escala piloto para la retención de sólidos suspendidos de agua residual proveniente de una empresa licorera empleando caucho de neumáticos usados. Con este objetivo, se realizó una serie de pruebas experimentales de filtración empleando el caucho de los neumáticos como medio de filtración. Se trabajó con tres granulometrías de caucho que corresponden a la abertura de las mallas 8, 12 y 16 norma ASTM; para conseguir dichos tamaños se empleó un molino de cuchillas. Con cada granulometría se probó dos alturas de lecho 10 y 15 cm y por cada prueba se realizaron dos repeticiones. Después de un análisis estadístico de los resultados obtenidos en el laboratorio se concluyó que el mayor porcentaje de remoción de sólidos suspendidos igual al 97% se logró cuando el lecho fue de la menor granulometría es decir malla 16 y en la mayor altura 15 cm. Con este resultado se diseñó el filtro multicapa con caucho y arena fina para una capacidad correspondiente al 10% de la producción industrial de vinaza y capaz de soportar una carga superficial de $300 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{día}$. Para un día de 8 horas se dimensionó un filtro de 30 cm de diámetro, 8 cm como falso fondo para permitir la salida del filtrado, 12 cm de grava como sistema de drenaje, 40 cm de arena fina de 2 mm, 20 cm del lecho de caucho malla 16, y 45 cm de agua sobrenadante. Se dimensionó también soportes para el mismo, bombas y demás accesorios secundarios para el correcto desempeño del filtro.

INTRODUCCION

La filtración es una de las operaciones más empleadas en diferentes actividades humanas principalmente para la purificación de agua. Se cuenta con sistemas de tratamiento de las aguas residuales que incluye la operación unitaria de la filtración con la finalidad de poder reutilizar esta agua o para cumplir con normas y poder descargarlas sin inconveniente, asegurando que son inocuas para los seres vivos.

La filtración primaria de aguas se realiza para eliminar los sólidos suspendidos que se encuentran en aguas residuales, para este tipo de filtración los filtros comúnmente empleados son los constituidos por tres lechos de ripio, cascajo y arena fina entre 1 y 2 mm (Degremont, 1979, p. 234).

Considerables cantidades de neumáticos usados se acumulan en todo el mundo generando un gran problema puesto que no se degradan fácilmente, su costo de transporte es alto y son un foco de infección cuando no se disponen de manera adecuada. De tal manera que los neumáticos pueden ser empleados como un nuevo medio de filtración que promete ser una alternativa más barata y más eficiente a la arena o antracita, que se utilizan comúnmente para el filtrado de aguas residuales (Chen, 2004, p. 3).

Los filtros tradicionales que funcionan por acción de la gravedad utilizan arena o antracita las mismas que tienen una tendencia a obstruir durante el lavado, debido a la diferencia en la velocidad de sedimentación entre las partículas grandes y pequeñas, las partículas más pequeñas quedan atrapadas en la capa superior del lecho. Este problema se reduce cuando se utiliza partículas de neumático como medio filtrante debido a que es compresible y la porosidad de los granos disminuye al pasar de la parte superior a la parte inferior del lecho filtrante. Como resultado, las partículas más grandes se filtran en la parte superior de la cama y las más pequeñas se filtran en la parte inferior, lo que se asemeja a una configuración ideal (Ondrey, 2006, p.13).

Filtros que utilizan partículas de caucho como principal medio de filtración están siendo empleados actualmente para el tratamiento de agua de balasto, la misma que se define como “agua de mar bombeada en la bodega de un barco para aumentar su peso, hacerlo más estable y menos sujeto al vaivén del oleaje” (Tang, Butkus y Xie, 2006, p. 410); debido a que son capaces de remover de manera más eficiente que los filtros tradicionales el fitoplancton y zooplancton. (Park, Ellis y Lally, 2006, p. 3217).

Los estudios llevados a cabo en el laboratorio, muestran que las partículas de neumático alcanza velocidades de filtración más altas en el desempeño de manera parecida a los medios de filtración convencionales, debido sustancialmente a mayores tasas de filtración de agua y peso más ligero en comparación con la arena o antracita. (Ondrey, 2011, p.17).

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1 FILTRACIÓN

La filtración es una operación unitaria enfocada a la separación de un sólido y un líquido a partir de una mezcla de los mismos empleando un medio poroso o medio filtrante que retiene los sólidos y permite el paso de los líquidos (filtrado) (Degremont, 1979, p. 78).

Los sólidos se ven obligados a pasar por la capa porosa ya sea por presión, gravedad, vacío o capilaridad; obteniéndose así el líquido denominado filtrado, y quedando retenidos los sólidos entre el lecho fijo o en forma de una torta o cake. Como medio filtrante se puede emplear lechos fijos, medios textiles o membranas.

Los fenómenos del paso de una solución o mezcla a través de un medio poroso se rigen por la Ley de Darcy. Esta ley indica que la pérdida de carga H es proporcional a la velocidad de filtración v_f (relación del caudal Q a la unidad de superficie A), siendo el coeficiente de proporcionalidad k función de la viscosidad dinámica μ y la resistencia R .

$$v_f = \frac{H}{\mu R} = k \times H \quad [1.1]$$

Un filtro constituye un sistema de flujo pues en virtud de una diferencia de presión causada entre la entrada del efluente y la salida del líquido filtrado, ésta circula a través del mismo depositándose los sólidos presentes y dando lugar a un lecho de partículas por el que sigue transitando la suspensión.

1.1.1 TIPOS DE FILTRACIÓN

La filtración comercial abarca varias aplicaciones. Las partículas suspendidas pueden ser finas, rígidas o plásticas, esféricas o de forma irregular, en forma de

partículas individuales o agregadas. El producto puede ser el filtrado al que se le han extraído los sólidos o en ocasiones la torta sólida. Además ocasionalmente se requiere una remoción total de las partículas sólidas y en otros casos es sólo necesaria una eliminación parcial. El fluido de alimentación puede tener una carga considerable de partículas sólidas o una baja proporción de éstas. Si la concentración es pequeña, el filtro se opera por tiempos largos, antes de ser necesario limpiar el medio filtrante.

Los filtros se pueden clasificar según su ciclo de operación: por lotes, cuando se extrae la torta después de cierto tiempo, o de manera continua, cuando la torta se va extrayendo a medida que se forma. También puede ser de gravedad, donde el líquido fluye debido a la presencia de una carga hidrostática, o bien usar presión o vacío para incrementar la velocidad de flujo

Cabe destacar que los equipos industriales de filtración difieren de los equipos de escala de laboratorio solamente en lo que respecta a la cantidad de masa que se procesa y en la necesidad de operar a costos bajos. Debido a la amplia variedad de problemas de filtración, se han desarrollado varios equipos de filtración en función de los tipos más comunes de filtración que se indica a continuación:

- Filtración en torta
- Filtración en profundidad
- Ultrafiltración

1.1.1.1 Filtración superficial o en torta

Se lleva a cabo cuando los sólidos quedan retenidos en la superficie del filtro, debido a que la materia sólida en la suspensión tiene un tamaño mayor a la de los poros. Los sólidos son retenidos en la superficie del lecho, no penetran en el medio filtrante. Como medios filtrantes se destinan tamices, membranas, papel de filtro o telas porosas. Si el flujo incide perpendicularmente en la superficie, se habla de filtración de torta (GuntHamburg, 2010, p. 1).

Las partículas sólidas se acumulan sobre el filtro, donde el medio filtrante posee poros que no permiten pasar las partículas de sólidos, formándose una torta.

Este tipo de filtración es el proceso por excelencia pero el problema que presenta es la formación sobre el material filtrante de una torta con el paso del tiempo, la misma que reduce el flujo de filtrado, donde la torta formada va creciendo, y por tanto, hay que retirarla o eliminarla cada cierto tiempo (Gunt Hamburg, 2010, p. 1). Este inconveniente se evita con la filtración tangencial, en la que el agua a filtrar fluye paralela a la superficie.

El caudal de filtrado, es decir del líquido que circula por la torta y el medio de filtración, es función de la diferencia de presiones actuantes en la superficie de salida del medio filtrante como se ilustra en la Figura 1.1.

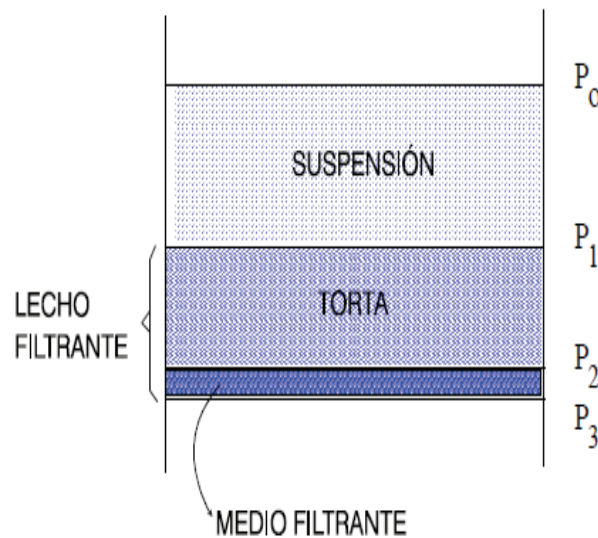


Figura 1.1 Zonas creadas en una filtración

La suma de las diferencias de presión individuales puede ser igualada a la diferencia de presión total en el equipo de filtración. En relación a la resistencia de la torta y del medio filtrante, las resistencias de las conexiones de entrada y salida son insignificantes y pueden ser despreciadas.

La resistencia del medio filtrante es importante al inicio de la filtración y se define como la resistencia total que se establece sobre el medio de filtración y la torta. La resistencia causada por los sólidos incrustados se denomina resistencia de torta y es igual a cero al iniciar la filtración. Debido a la incrustación permanente de sólidos sobre el medio ésta aumenta de acuerdo al tiempo de filtración (Brown, 1955, p. 244).

La pérdida friccional para flujo a través de lechos porosos se calcula a partir de la ecuación de Ergun:

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \underbrace{\frac{(1-\varepsilon)^2 \mu_f}{\varepsilon^3 D^2} v_s}_{\text{Pérdidas viscosas}} + 1,75 \underbrace{\frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{v_s^2}{D} \rho}_{\text{Pérdidas turbulentas}} \quad [1.2]$$

Donde:

ΔP : Caída de presión, (Pa)

μ : Viscosidad del fluido, (Pa*s)

v_s : Velocidad del fluido referida al área de sección normal del lecho, (m/s)

ρ : Densidad del fluido, (Kg/m³)

D : Diámetro equivalente (m)

ε : Porosidad, adimensional

L : Longitud del lecho, (m)

El diámetro equivalente es característico de la partícula y se determina mediante la siguiente relación:

$$D = \frac{6}{S_o} \quad [1.3]$$

Siendo S_o la superficie específica de la partícula.

Para filtración en que los sólidos suspendidos que formarán la torta son de tamaño muy pequeño y asumiendo que el flujo a través del lecho es laminar se tiene la ecuación de Ergun simplificada, ecuación [1.4]:

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu_f}{D^2} v_s \quad [1.4]$$

De ecuación [1.4] se despeja v_s :

$$v_s = \frac{\Delta P}{L} \frac{\varepsilon^3}{150(1-\varepsilon)^2} \frac{D^2}{\mu_f} \quad [1.5]$$

Adicionalmente, la velocidad del fluido referida al área de sección normal del lecho viene dada por:

$$v_s = \frac{\text{caudal}}{\text{sección}} = \frac{1}{A} \frac{dV}{d\theta} \quad [1.6]$$

Donde:

$\frac{dV}{d\theta}$: Variación del volumen filtrado en función del tiempo, (m^3/s)

Igualando ecuación [1.5] y ecuación [1.6] se tiene:

$$\frac{1}{A} \frac{dV}{d\theta} = \frac{\Delta P}{L} \frac{\varepsilon^3}{150(1-\varepsilon)^2} \frac{D^2}{\mu_f} \quad [1.7]$$

Para simplificar:

$$K = \frac{\varepsilon^3}{150(1-\varepsilon)^2} \quad [1.8]$$

$$\frac{1}{A} \frac{dV}{d\theta} = K \frac{\Delta P D^2}{L \mu_f} \quad [1.9]$$

La ecuación [1.9] permite apreciar que la velocidad de filtración es directamente a la diferencia de presiones a lo largo del lecho e inversamente proporcional a la viscosidad del fluido y al espesor del lecho.

El término $\mu_f L / K$ representa la resistencia constante al flujo a través del lecho poroso, esta resistencia comprende: la resistencia del medio filtrante y la resistencia debido a la torta formada

$$\frac{1}{A} \frac{dV}{d\theta} = \frac{\Delta P_{torta}}{r_{torta}} = \frac{\Delta P_{medio}}{r_{medio}} = \frac{\Delta P_{total}}{r_{torta} + r_{medio}} \quad [1.10]$$

La resistencia del medio filtrante es la resistencia que ofrece el lecho con los poros parcialmente ocupados, se representa con la ecuación [1.11]

$$r_{medio} = \mu R_m \quad [1.11]$$

Por otro lado, la resistencia de la torta depende del espesor y naturaleza de la misma:

$$r_{torta} = \mu R_T = \mu \frac{L_{torta}}{K} \quad [1.12]$$

El espesor de la torta (L_{torta}) no es posible determinar exactamente de las pruebas de filtración, pero es posible expresar esta variable en función del volumen filtrado. Por lo tanto, se tiene:

$$M = \frac{s\rho}{1-ms} V = wV \quad [1.13]$$

siendo:

M : Masa de sólido depositada o acumulada sobre el filtro

V : Volumen de filtrado

ρ : Densidad del filtrado

s : Fracción másica del sólido en suspensión (Kg sólido/ Kg suspensión)

$$m = \frac{\text{torta húmeda}}{\text{torta seca}}$$

w : masa de sólido referida al volumen de filtrado

La masa del sólido depositada sobre el filtro viene dada también por:

$$M = L_{torta} A (1 - \varepsilon) \rho_s \quad [1.14]$$

Reemplazando ecuación [1.13] en ecuación [1.14], y despejando L se tiene:

$$L_{torta} = \frac{1}{A(1-\varepsilon)\rho_s} \frac{s\rho}{1-ms} V = \frac{1}{A(1-\varepsilon)\rho_s} wV \quad [1.15]$$

Sustituyendo ecuación [1.15] en ecuación [1.12]:

$$R_T = \frac{L_{torta}}{K} = \frac{wV}{A(1-\varepsilon)\rho_s} \frac{1}{K} = \frac{wV}{A(1-\varepsilon)\rho_s} \frac{150(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \quad [1.16]$$

$$\alpha = \frac{1}{K\rho_s(1-\varepsilon)} \quad [1.17]$$

α es la resistencia específica de la torta cuyas dimensiones son (L_{torta}/M) , representando la resistencia que ofrece la unidad de masa de torta seca depositada sobre el área de sección normal al flujo.

Sustituyendo ecuación [1.17] en ecuación [1.16]:

$$R_T = \frac{\alpha wV}{A} = \frac{\alpha M}{A} (\text{resistencia de torta/viscosidad del filtrado, } 1/L) \quad [1.18]$$

Sustituyendo valores en ecuación [1.10]:

$$\frac{1}{A} \frac{dV}{d\theta} = \frac{\Delta P}{\mu \left(\frac{\alpha wV}{A} + R_m \right)} \quad [1.19]$$

Si se expresa la resistencia del medio como función de la resistencia de una capa hipotética de torta correspondiente a un volumen de filtrado V_e :

$$R_m = \frac{\alpha \rho s V_e}{A(1-ms)} = \frac{\alpha w V_e}{A} = \frac{\alpha M_e}{A} \quad [1.20]$$

Reemplazando dichos valores en ecuación [1.19]:

$$\frac{1}{A} \frac{dV}{d\theta} = \frac{\mu \alpha w}{A} \frac{\Delta P}{(V+V_e)} = \frac{\mu \alpha}{A} \frac{\Delta P}{(M+M_e)} \quad [1.21]$$

Las tortas filtrantes se clasifican en incompresibles y compresibles.

$$\alpha = \alpha_o \Delta P^n \quad [1.22]$$

α_o : resistencia específica a presión cero (resistencia específica de la torta si fuera totalmente incompresible).

n : factor de compresibilidad varía entre 0 – 1. n es la pendiente de recta α frente a ΔP en escala logarítmica.

$$\log \alpha = \log \alpha_o + n \log \Delta P \quad [1.23]$$

a) Tortas incompresibles

En las tortas filtrantes que son incompresibles, la resistencia específica y la porosidad de la torta se pueden considerar constantes a través de la torta durante todo el proceso de filtración.

b) Tortas compresibles

Cuando la fracción volumétrica de sólidos no es homogénea en toda la torta sino que varía con la longitud, se denomina como torta compresible. En este caso la velocidad del filtrado no es la misma a través de la torta y tampoco es su resistencia específica.

La compresibilidad puede ser un proceso reversible o irreversible. La mayoría de las tortas filtrantes no son elásticas, y la mayor resistencia ofrecida al flujo a altas diferencias de presión es debida al más compacto empaquetamiento de las partículas que forman la torta filtrante. La resistencia específica de la torta, por tanto, corresponderá a la de la más elevada diferencia de presiones a la que sea sometida, incluso aunque esta diferencia máxima de presiones pueda mantenerse únicamente durante un corto tiempo. Es necesario señalar que las etapas iniciales de la formación de la torta son de importancia por las siguientes razones:

- Establecida la presión de filtración, la velocidad de flujo es más grande al inicio del proceso ya que la resistencia es entonces despreciable.
- Una velocidad inicial de filtración muy alta puede llevar a la obstrucción de los poros del material filtrante, provocando una resistencia al flujo elevada.
- La disposición de las partículas sólidas en las capas superficiales puede afectar de forma apreciable la estructura de la torta filtrante.

La operación de filtración puede llevarse a cabo de tres formas distintas:

a) A presión constante:

La diferencia de presiones se mantiene constante durante la operación. Puesto que la resistencia del lecho filtrante aumenta a medida que crece el espesor de la torta, la velocidad de filtración disminuye gradualmente.

Para este tipo de filtración, la ecuación [1.19] puede escribirse así:

$$\frac{d\theta}{dV} = \frac{\mu\alpha w}{\Delta P A^2} V + \frac{\mu R_m}{\Delta P A} \quad [1.24]$$

Para tortas incompresibles a filtración a presión constante se tiene:

$$\frac{d\theta}{dV} = k_1 V + k_2 \quad [1.25]$$

$$k_1 = \frac{\mu \alpha w}{\Delta P A^2} = \frac{\mu \alpha \rho s}{\Delta P A^2 (1-ms)} = \frac{\mu R_{torta}}{\Delta P V A} \quad [1.26]$$

$$k_2 = \frac{\mu R_m}{\Delta P A} = \frac{\mu \alpha w}{\Delta P A^2} V_e = k_1 V_e \quad [1.27]$$

Para determinar el volumen total de filtrado se integra la ecuación [1.25]

$$\int_{-\theta_e}^{\theta} d\theta = \int_0^{V+V_e} k_1 (V + V_e) dV \quad [1.28]$$

$$\theta + \theta_e = \frac{k_1}{2} (V + V_e)^2 \quad [1.29]$$

Para $\theta = 0$ y $V = 0$ se tiene: $\theta_e = \frac{k_1 V_e^2}{2}$

Entonces:

$$\theta = \frac{k_1}{2} V^2 + k_1 V V_e \quad [1.30]$$

$$V = \sqrt{V_e^2 + \frac{2\theta}{k_1}} - V_e \quad [1.31]$$

b) A caudal constante:

A medida que incrementa el espesor de la torta, la resistencia al paso del líquido crece, por tanto también aumenta la pérdida de presión. Este tipo de filtración se logra empleando una bomba de desplazamiento positivo.

Para el estudio de la filtración a volumen constante se parte de la ecuación [1.32]:

$$\Delta P = (V + V_e) \frac{\alpha \mu w}{A^2} \frac{dV}{d\theta} \quad [1.32]$$

Al permanecer la velocidad de filtración constante ($dV/d\theta = cte$) y la torta es incomprensible, se tiene:

$$\Delta P = k_3 V + K_4 \quad [1.33]$$

$$k_3 = \frac{\alpha \mu w}{A^2} \left(\frac{dV}{d\theta} \right)_{cte} \quad [1.34]$$

$$k_4 = \frac{\alpha \mu w}{A^2} \left(\frac{dV}{d\theta} \right)_{cte} V_e = \frac{\mu R_m}{A} \frac{dV}{d\theta} = k_3 V_e \quad [1.35]$$

Finalmente, el volumen de filtración en función de la presión aplicada es:

$$V = \frac{\Delta P}{k_3} - V_e \quad [1.36]$$

Para relacionar el volumen de filtrado y el tiempo empleado en la filtración se emplea la ecuación [1.37]:

$$V = \left(\frac{dV}{d\theta} \right)_{cte} \theta \quad [1.37]$$

$$V + V_e = \left(\frac{dV}{d\theta} \right)_{cte} (\theta + \theta_e) \quad [1.38]$$

Por lo tanto se tiene:

$$\Delta P = \frac{\alpha \mu w}{A^2} \left(\frac{dV}{d\theta} \right)^2 (\theta + \theta_e) \quad [1.39]$$

$$\Delta P = k_5 \theta + k_6 \quad [1.40]$$

$$k_5 = \frac{\alpha \mu w}{A^2} \left(\frac{dV}{d\theta} \right)^2 \quad [1.41]$$

$$k_6 = \frac{\alpha \mu w}{A^2} \left(\frac{dV}{d\theta} \right)^2 \theta_e = k_5 \theta_e \quad [1.42]$$

c) En régimen mixto:

Se produce una combinación de los dos métodos anteriores

Los filtros de mangas y filtros de tambor son los más empleados para que se efectúe este tipo de filtración.

En el filtro de mangas la suspensión se hace circular por un sistema múltiple de medios filtrantes, en los que existen distintos marcos. Sobre las distintas mangas se van formando las tortas, por lo que son retiradas cada cierto tiempo. Así, en estos sistemas, mientras un conjunto de prensas están trabajando en filtración (formándose torta), otros están en limpieza y raspado de torta mediante circulación inversa. La Figura 1.2 muestra un esquema de este tipo de filtros.

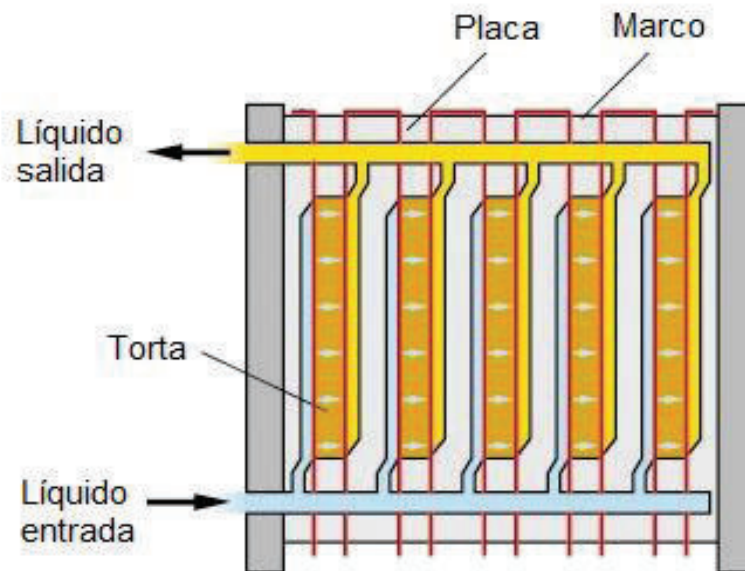


Figura 1.2 Esquema de un filtro de mangas

En la Figura 1.3 se esquematiza un filtro de tambor que consta de un tambor rotatorio que posee en su superficie el medio de filtración y por el cual ingresa el líquido a filtrar.

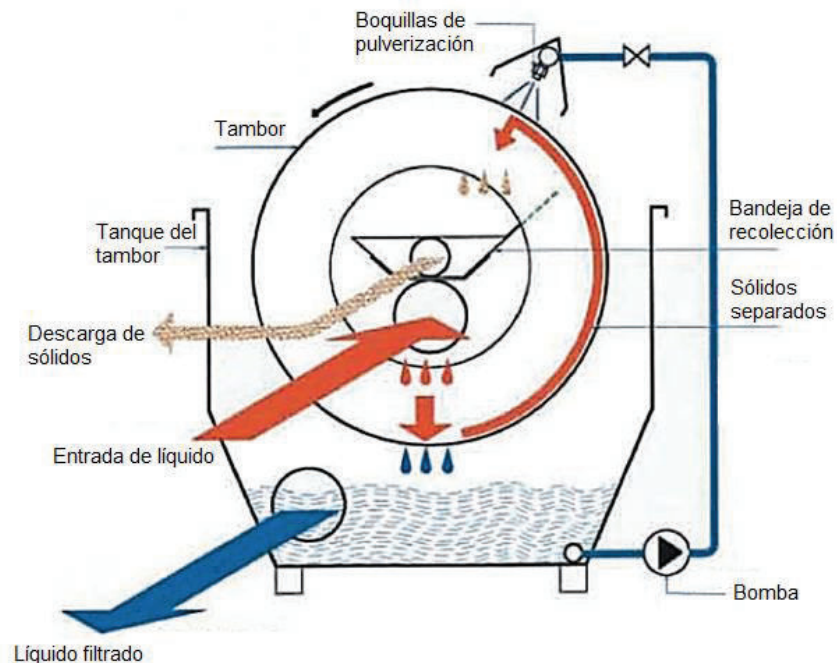


Figura 1.3 Esquema de un filtro rotatorio de tambor

1.1.1.2 Filtración en volumen o a profundidad

Representa el caso contrario a la filtración en torta, es decir las partículas sólidas de una suspensión tienen un tamaño menor a la de los poros del lecho, en donde las materias sólidas quedarán retenidas en el interior de la masa porosa; también es conocida como filtración sobre lecho filtrante.

Por circulación a través de un lecho constituido por sólidos medios o gruesos, este tipo de filtración logra eliminar partículas finas. Regularmente es de arena y se destina, luego de procesos de precipitación, para la remoción de sólidos suspendidos en el tratamiento de aguas. Los lechos se asean habitualmente por retro circulación del fluido (Martín, Salcedo y Font, 2011, p.16).

Una cantidad cada vez mayor de sólidos se va acumulando en los intersticios del lecho filtrante con el paso del tiempo. Esto provoca que la sección de paso disminuya y como consecuencia aumenta la resistencia que el filtro opone al flujo.

Esta resistencia se manifiesta como una pérdida de presión. El flujo a través del filtro disminuye, y se puede mantener únicamente incrementando la presión en la corriente de ingreso al filtro (Gunt Hamburg, 2010, p. 3).

Esta filtración se realiza en lechos granulares, de profundidad variada donde se deben retener las partículas pequeñas (entre 0.3 y 5 μm) y en baja concentración (menor de 0.1 g. sólidos/l). Se aplica en los procesos de depuración de aguas.

El caudal se reduce o la pérdida de carga aumenta a medida que se captan las partículas. A cierto valor, es vital lavar el filtro con agua a alta velocidad a contracorriente o empleando equipos de burbujeo de aire. La pérdida de presión disminuye tras practicar esta estrategia.

La filtración a profundidad se desarrolla principalmente en filtros de arena.

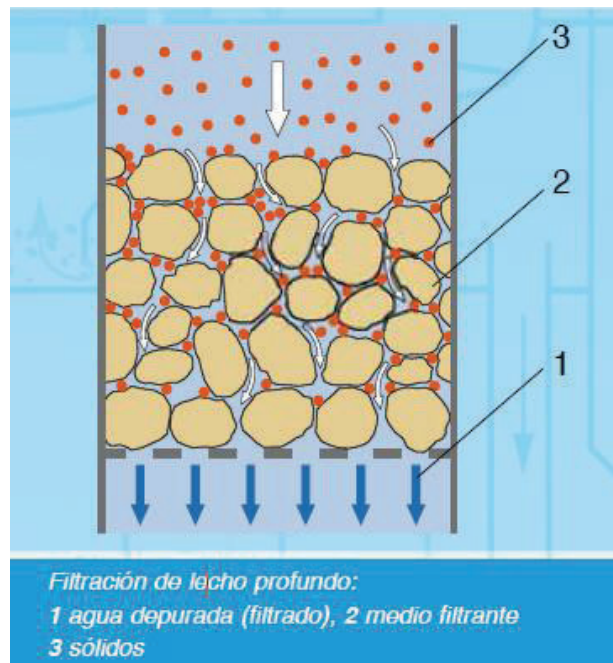


Figura 1.4 Filtración a profundidad

1.1.1.3 Filtración de flujo cruzado o ultrafiltración

En este tipo de filtración los sólidos (desde 5 μm hasta 0.03 μm) son separados mediante flujo tangencial al medio filtrante, el medio filtrante son membranas por lo que los sólidos no se acumulan sobre el lecho ya que son separados continuamente.

Puesto que si no existe una fuerza impulsora de presión a través del medio de filtración, las fuerzas que provocan la misma pueden ser la gravedad o la presión hidrostática (Martín, Salcedo y Font, 2011, p.18).

La ultrafiltración no es útil para remover sólidos visibles y se aplica en la separación de partículas de gran tamaño molecular por membranas especiales. Se distingue dos tipos de ultrafiltración:

- a)** Para partículas grandes: las partículas reunidas en la superficie del medio filtrante son trasladadas por un elemento mecánico o por gravedad.
- b)** Para partículas pequeñas: se usan membranas con poros de hasta 2 nm que operan de 0.2-1 MPa.

Para evitar la formación de la torta se alimenta progresivamente el líquido a filtrar, obteniéndose una corriente de líquido con una concentración inferior en solutos y que no obstruye la membrana.

1.1.2 MECANISMOS DE FILTRACIÓN

En función del material filtrante y de los sólidos a retener pueden darse lugar varios mecanismos: depósito, fijación y desprendimiento.

1.1.2.1 Mecanismo de depósito

Se identifican dos tipos:

Tamizado mecánico.- consiste en la retención de partículas más gruesas que la abertura de malla del filtro o la abertura de los elementos retenidos que forman un material filtrante por sí mismos.

Este fenómeno es significativo tanto más fina es la malla del material filtrante, es decir actúa de forma predominante en una filtración sobre soporte de malla fina y tiene poca importancia en un lecho filtrante compuesto por material relativamente grueso.

Depósito sobre material filtrante.- La partícula en suspensión describe una trayectoria en el líquido. Su tamaño en relación con el de los poros, podría atravesar el material filtrante sin ser interrumpida. No obstante, aparece un cambio de trayectoria y se da el acercamiento con el filtro.

Los mecanismos de depósito se presentan principalmente en la filtración a profundidad.

Estos fenómenos son (Di Bernardo, 2009, p. 7):

- Intercepción directa
- Inercia de la partícula
- Atracción por fuerzas de Van de Waals
- Difusión por movimiento Browniano
- Sedimentación
- Movimiento oscilante debida a fuerzas hidrodinámicas
- Aglutinamiento

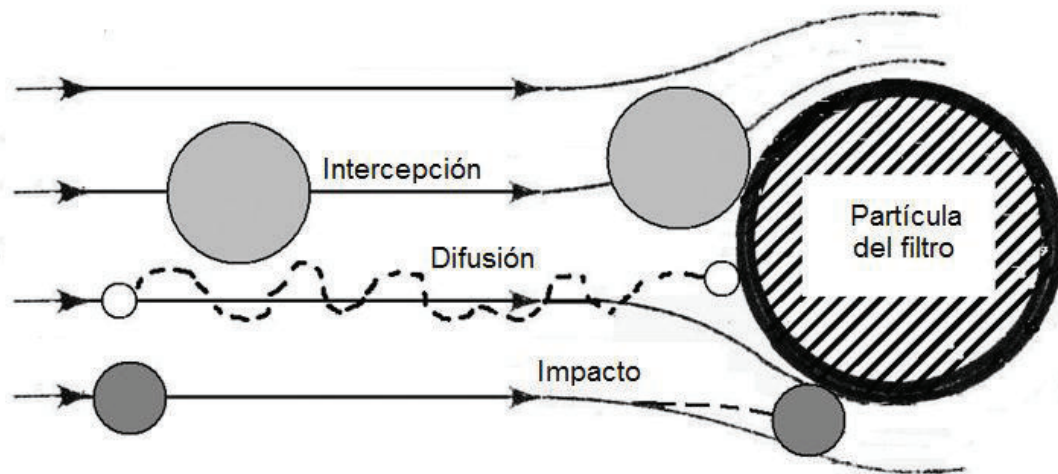


Figura 1.5 Mecanismos de depósito

1.1.2.2 Mecanismo de fijación

La fijación de las partículas sobre la superficie del lecho ocurre cuando la velocidad de flujo es pequeña.

Este mecanismo de fijación se debe a fuerzas de origen físico (enclavamiento, cohesión) y a fuerzas de adsorción, como fuerzas de Van der Waals.

1.1.2.3 Mecanismo de desprendimiento

En virtud de los mecanismos mencionados, se da una disminución del espacio entre las paredes del material recubiertas de partículas ya incrustadas. Se da lugar además a un incremento de velocidad y el régimen de flujo puede cambiar de laminar a turbulento. La materia filtrada o retenida puede ser desprendida levemente y arrastrada al interior del material filtrante o incluso con el filtrado que se obtiene.

Los sólidos contenidos en el seno del líquido y las partículas aglutinadas, no reaccionan de la misma forma y no presentan las mismas características ante los distintos mecanismos mencionados. Por lo tanto, la filtración directa de un efluente cuya materia en suspensión conserva su carga eléctrica y su estado, será diferente de la filtración de un líquido coagulado.

1.1.3 ATASCAMIENTO Y LAVADO DEL MATERIAL FILTRANTE

El taponamiento continuo de los intersticios del material filtrante se denomina como atascamiento.

Si la presión de alimentación es constante, el caudal del filtrado disminuye. Para mantener constante este caudal se debe incrementar la presión inicial a medida que se genere el atascamiento.

La velocidad de atascamiento es función de (Maldonado, 2005, p. 85):

- Velocidad de filtración.
- Características del elemento filtrante: rugosidad, tamaño de poro y homogeneidad.
- Elemento retenido: es mayor si existen partículas en suspensión y depende de su cohesión y capacidad de propagación.

Cuando el filtro se encuentra tapado, es imperativo llevarlo nuevamente a su estado original, esto es posible mediante un lavado enérgico de acuerdo a la naturaleza de las sustancias atrapadas y el tipo de filtro.

Es importante mencionar que se puede recurrir a materiales auxiliares para evitar el atascamiento y permitir que el proceso se acelere. Para dicho caso es común emplear en el filtro tierras diatomáceas que contienen principalmente sílice incomprensible, también se puede utilizar asbesto, celulosa de madera y otros sólidos inertes porosos.

Dichos auxiliares de filtración se emplean de diversas formas: por ejemplo como paso previo a la entrada del fluido de alimentación al filtro, impidiendo que los sólidos de tipo gelatinoso obstruyan el medio filtrante y resultando en un filtrado más transparente. Otra forma es agregarlos en la suspensión a filtrar antes de la filtración propiamente dicha. Esto provoca un aumento de la porosidad de la torta y reduce su resistencia durante el proceso.

El uso de ayudas de filtración usualmente está restringido a los escenarios en que la torta es el material que se descarta, o cuando el precipitado se puede separar de ellas por medios químicos.

1.1.4 ELECCIÓN DEL TIPO DE FILTRACIÓN

La decisión entre filtración sobre lecho filtrante y filtración sobre soporte depende de:

- Naturaleza del líquido a ser filtrado: cantidad de impurezas y atascamiento.
- Calidad del efluente.
- Características de la torta.
- Escenarios de instalación.
- Medios y posibilidades útiles para el lavado del filtro.

Los gastos de instalación y los gastos de explotación representan las diversas soluciones, estando relacionados también con las condiciones del líquido a filtrar, la forma de lavado, el grado de automatismo y de control, entre otros.

De acuerdo con Gordon (1972) en la elección de un filtro “es trascendental la posibilidad de un lavado fácil, eficaz y económico, como la obtención de la mejor calidad de filtrado, ya que esto sólo será posible de forma constante, si el lavado mantiene siempre intacto el material filtrante” (p. 260).

1.1.5 FILTROS DE ARENA

Existen dos tipos de filtros de arena: de acción lenta y rápida.

Los filtros lentos permiten el paso del líquido por acción de la gravedad a través del lecho a baja velocidad. Al atravesar el mismo por los poros de la capa filtrante y adherirse las partículas a los granos de arena se lleva a cabo la retención de los materiales sólidos.

Pérez (2006) menciona que la principal característica que diferencia los filtros rápidos de arena es la eliminación de partículas en suspensión, relativamente grandes por procesos físicos. En dicha operación la materia sólida es acumulada en el tope del medio filtrante. Además se acota que los filtros de arena de acción rápida requieren limpiarse mediante una operación de reflujos (p. 11).

A continuación en la Figura 1.6 se muestra las características más comunes de los filtros de arena.

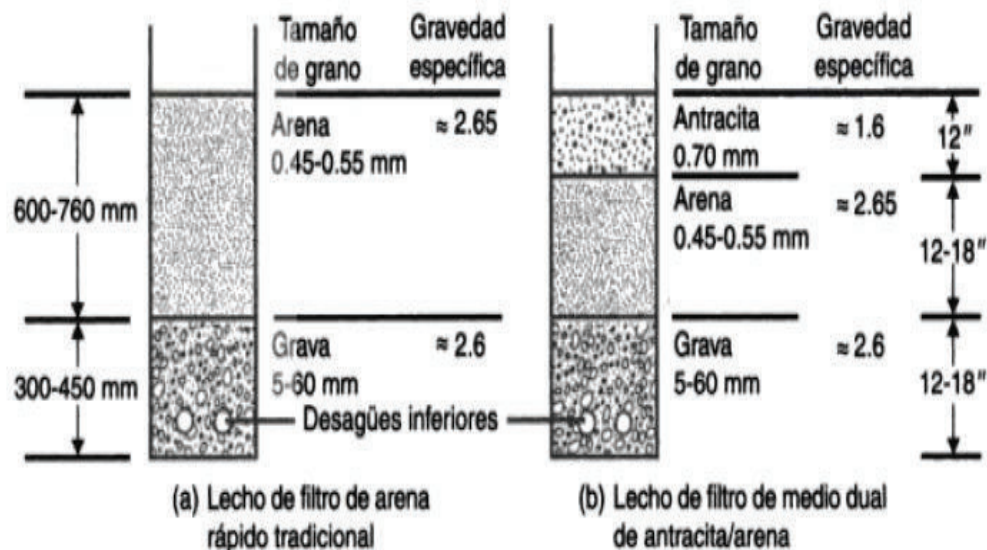


Figura 1.6 Filtro lento y rápido de arena
(Glynn y Heynke, 1999, p. 402)

1.1.6 DISEÑO DE FILTROS

Para el diseño de cualquier sistema de distribución de agua se debe considerar los factores mencionados a continuación:

Las pérdidas del sistema son un factor de gran importancia que se debe tomar en cuenta. Por definición “en cualquier sistema de distribución existen pérdidas de agua, ya sea por el goteo de alguna junta o válvula. Dichas pérdidas se encuentran entre 25 y 30% del agua que circula” (National Environmental Services Center, 2009, p. 3). Es complicado sortear éstas pérdidas pero para propósitos de diseño es recomendable tomar dicho criterio.

Otro factor a considerar es la cantidad de agua que se va a tratar, siendo el suministro correcto para un filtro de arena aquel que es constante en el tiempo. Para dicho efecto de acuerdo con Araujo (1995) “es aconsejable tener un depósito suficientemente grande para asumir que esta variación no traerá cambios en el funcionamiento del filtro, asumiendo que si no hay una falta de flujo de entrada en los filtros, el depósito se va a encargar de minimizar las fluctuaciones” (p. 74).

De la misma manera es de gran importancia la determinación del área total de filtración. Generalmente los filtros no deben ser muy pequeños puesto que su debilidad radica en el contacto arena pared y dicho contacto se minimiza al incrementar el área del filtro. Además, es vital saber el número de filtros que se utilizarán.

La facilidad para la limpieza de los filtros al realizar su construcción es un factor crucial. De esta forma si los filtros están resguardados es necesario realizar aberturas en su tapa, para que sean accesibles. Además es recomendable que las conexiones de entrada y salida sean planteadas al principio y no cuando los filtros ya estén culminados. Otras características que son importantes en un filtro incluyen la facilidad de descarga de la torta filtrante en una forma física apropiada, y un método para observar la calidad del filtrado obtenido (United States Environmental Protection Agency, 1999, p. 2).

En cuanto al aspecto económico el filtro más adecuado para la operación es el que efectúe la filtración a un costo mínimo. Dado que el valor del equipo es afín al área filtrante es deseable alcanzar velocidades altas de filtración. Dicha condición hace necesaria el uso de presiones elevadas que se ven restringidas por consideraciones de diseño mecánico. Pese a que en un filtro continuo se obtiene una capacidad de producción más elevada, para una superficie filtrante fija, que en uno discontinuo es forzoso utilizar el último si la torta filtrante tiene una resistencia elevada, puesto que gran porcentaje de filtros continuos operan a presión baja (Rocha, 2008, p. 2)

1.1.6.1 Agua sobrenadante en el filtro

National Environmental Services Center (2009) define el agua sobrenadante de un filtro como “un acopio de agua a tratar almacenada durante cierto tiempo en el filtro; en dicho transcurso de tiempo se produce sedimentación y aglomeración de las partículas sólidas y oxidación del agua”.

La profundidad de la reserva de agua a tratar se establece a través de la máxima resistencia que el lecho de arena va a provocar cuando esté saturado. Habitualmente se tiene lechos cuya altura va de 0,5 m a 1,5 m (p.4).

1.1.6.2 Lecho de arena o caucho

El lecho filtrante que se emplea comúnmente es la arena. De acuerdo con Barrientos (2009) “la arena se encarga de filtrar el agua que se va a tratar y granulométricamente presenta características concretas; así se contempla un coeficiente máximo de uniformidad $C_u < 3$, aunque es preferible que sea menor o igual a 2” (p. 57). El coeficiente de uniformidad da una idea de la regularidad de los granos de arena y otorga el nivel de porosidad presente entre los granos. La arena no debe tener impurezas tales como arcilla, lodos o materia orgánica, por lo que si es necesario será lavada para evitar tales elementos.

La solución a los inconvenientes de los filtros de lecho simple reside en lograr que su permeabilidad se reduzca en función de la profundidad de tal manera que las partículas aglomeradas puedan ingresar y hallar el medio más fino en las capas inferiores del filtro y el más grueso en las capas superiores. Cánepa (2010) menciona que al destinar un único tipo de material granular esto no es viable, pues el flujo de lavado lo estratifica en sentido contrario y ha planteado usar medios de diferentes densidades, de manera que los granos gruesos fueran de un material poco denso a fin que el flujo ascendente de lavado los estratifique y queden sobre los granos finos, cuya densidad es mayor (p. 10).

En la Figura 1.7 para el caso de un lecho doble de arena y antracita se indica la estratificación del material filtrante. Se observa que el material más fino está en las capas inferiores y el más grueso en la capa superior. Dicho escenario constituye un acercamiento a la estratificación granulométrica ideal en filtración descendente.

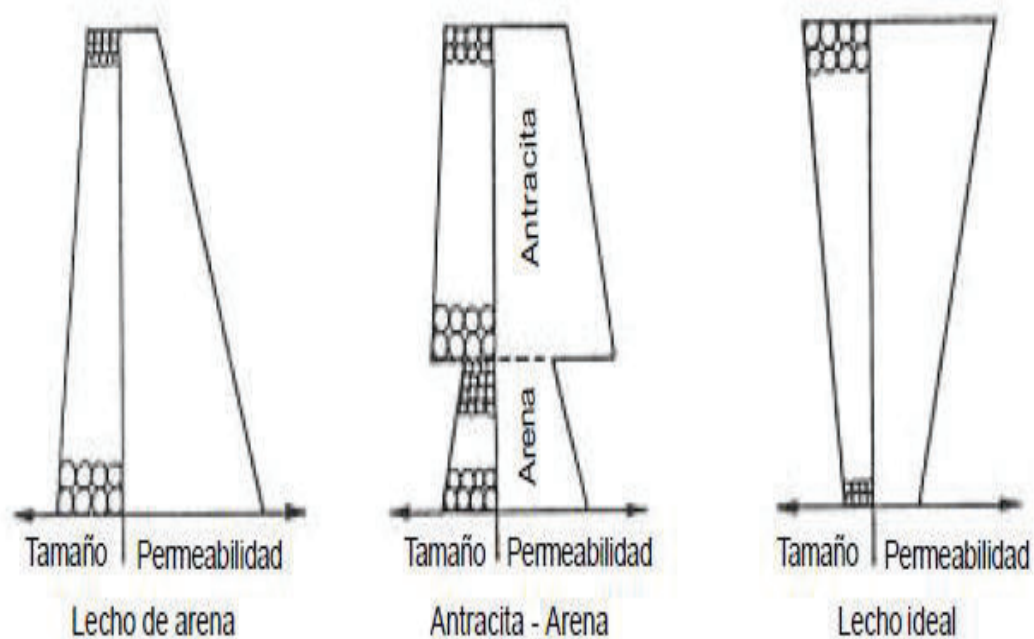


Figura 1.7 Variación de la permeabilidad para diferentes tipos de lecho filtrante

Si se quiere una mejor calidad del filtrado se pueden añadir en la base del lecho de arena 0,10 m de carbón activado.

1.1.6.3 Sistema de drenaje

Higuera, Arroyave y Florez (2008) manifiestan que la función del sistema de drenaje es otorgar un soporte físico al medio filtrante y facilitar la evacuación del fluido tratado con baja resistencia. Además se menciona que la sección inferior del sistema de drenaje está formado por un dren principal y un conjunto de drenes secundarios, comúnmente perpendiculares al dren principal. En filtros grandes filtros pequeños este conjunto de drenes se construye con hormigón, mientras que para filtros pequeños se destinan tuberías perforadas (p.107).

Con la finalidad de brindar un soporte del lecho de arena y para impedir que una porción de la arena se arrastre al sistema de drenaje y obstruya la salida del efluente, se colocan varias capas de material granular de diversa granulometría sobre el conjunto de drenes.

National Environmental Services Center (2009) hace énfasis en que el nivel ubicado en la parte inferior poseerá una distribución de diámetros de grano más gruesos mientras que a medida que se colocan capas, el tamaño de grano irá decreciendo. Es necesario que las capas posteriores a ser colocadas mantengan una relación de diámetros entre sí con la finalidad de impedir el aglutinamiento de finos. Es recomendable que los diámetros pequeños (d_{10}) deben guardar una relación no mayor a 4 veces del diámetro correspondiente a la capa inmediatamente inferior (p. 6).

Es importante señalar que la grava a emplearse en el sistema de drenaje debe presentar un peso específico aproximado de 2500kg/m^3 , de preferencia dura y redondeada; y exentas de arcilla, lodos, arena o impurezas orgánicas de cualquier clase (Barrientos, 2009, p. 60).

Es necesario realizar con mucha atención la colocación de las diferentes capas de grava, ya que una mala colocación implica la generación de orificios durante la puesta en marcha del filtro

1.1.6.4 Caja del filtro

En cuanto a la caja del filtro, para su construcción los materiales más utilizados son piedras u hormigón (en masa o armado) para las paredes y el hormigón para el piso y ladrillos.

Arboleda (1981) menciona que para disminuir el costo inicial se puede levantar paredes inclinadas, pese a que esto involucra la ocupación de un mayor espacio como también una mayor cantidad de material a medida que avanza la caja del filtro. De dicha manera se logra reducir la tensión estructural a favor de aumentarla capacidad portante del suelo (p. 41).

Las paredes del filtro deben ser impermeables, tanto para evitar las pérdidas de agua tratada como para impedir el ingreso de agua cruda y afectar la calidad final del agua. La forma de los filtros usualmente es rectangular aunque en ciertos casos pueden ser circular.

En la construcción de la caja del filtro se puede agregar elementos que evitan la filtración del agua desde el lecho de arena hacia la pared. Dicho fenómeno provoca la falta de contacto arena-pared en la zona de filtración produciendo un filtrado de baja calidad. De acuerdo con Barrientos (2009) para evitar esta erosión hay tres posibilidades a realizar en la pared interior y en la zona donde estará la arena: crear canales, crear rugosidades y/o inclinar ligeramente la pared interior hacia la parte exterior (p. 63). En la Figura 1.8 se muestra algunas opciones para evitar la percolación.

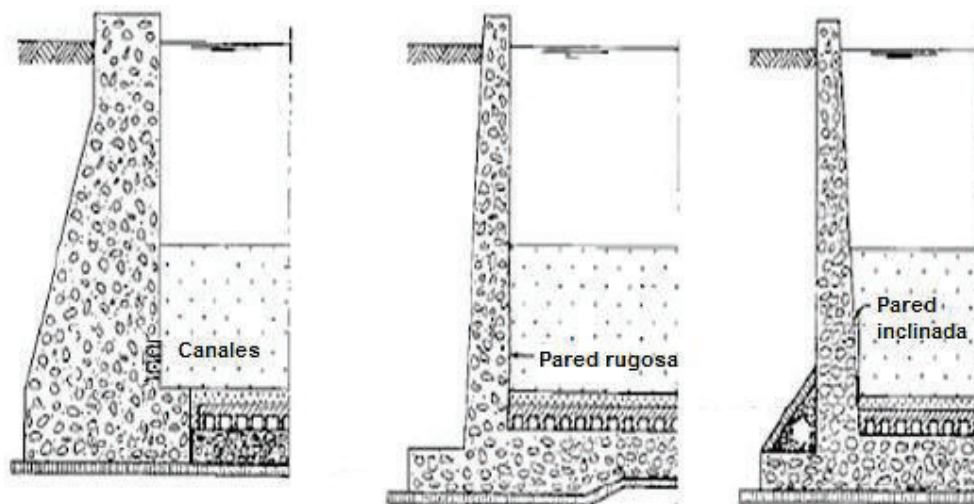


Figura 1.8 Opciones para evitar la percolación

1.2 EFLUENTES DE LA INDUSTRIA LICORERA

El etanol es un alcohol cuya fórmula química es C_3H_5OH . Es producto de la fermentación de productos que poseen azúcares como la remolacha o la caña de azúcar o de aquellos que pueden ser transformados en azúcares como por ejemplo los almidones que se encuentran en las papas, maíz o celulosa vegetal. (Toala, Astudillo y Tobalina, 2008, p. 2).

Comercialmente existen dos tipos de alcohol:

1. Alcohol hidratado: contiene alrededor de un 5% de agua y se obtiene por destilación convencional.

2. Alcohol anhidro: Se obtiene a partir del alcohol hidratado y contiene menos de 1% de agua.

1.2.1 PROCESOS PARA LA OBTENCIÓN DE ALCOHOL

El alcohol etílico o etanol, es el componente principal de las bebidas alcohólicas. Toala, Astudillo y Tobalina (2008) mencionan que se obtiene bien por medio de fermentación o descomposición de los azúcares contenidos en distintos granos y frutas o ya sea por destilación, consistente en la purificación de las bebidas fermentadas (p. 2).

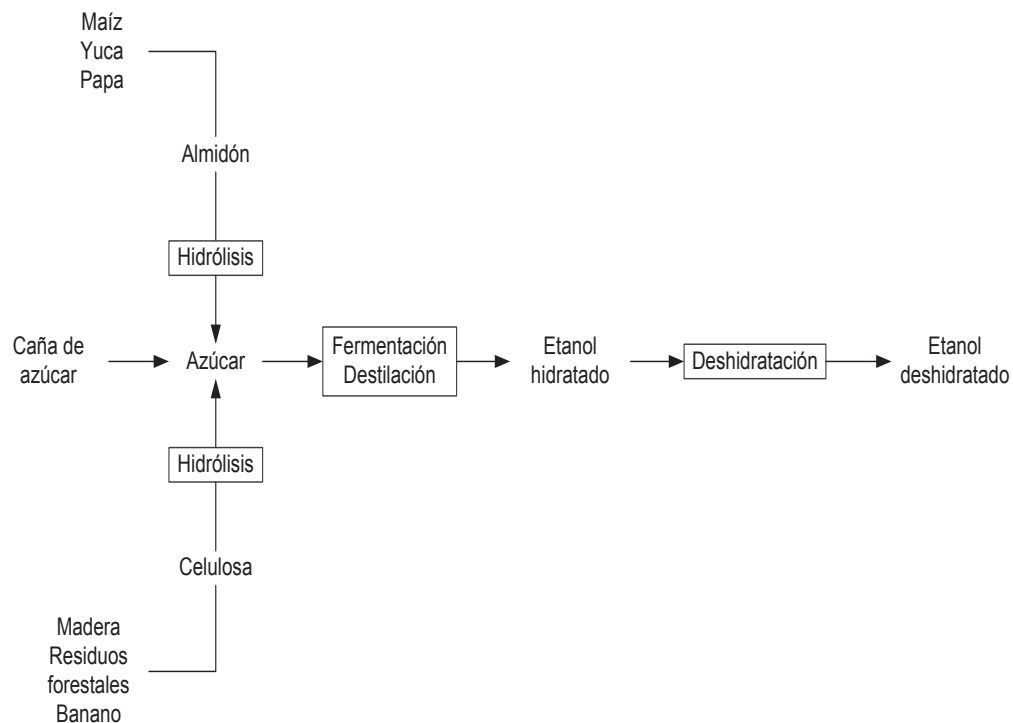


Figura 1.9 Proceso de producción de etanol

El etanol es una materia prima importante para síntesis y se puede obtener de dos maneras: por fermentación de melazas o por hidratación del etileno. Para la fermentación de melazas las principales fuentes son la caña de azúcar, la remolacha y el petróleo.

El producto específico se obtiene en función del material fermentado (uvas, maíz, centeno), la forma de fermentación y de la operación posterior a la fermentación, es decir si se destila o no.

De acuerdo a Toala, Astudillo y Tobalina (2008) debido a su estatus como bebida gravada y como reactivo industrial, el alcohol etílico plantea un problema especial. Debe estar al alcance de la industria en forma no bebible y así se le añade un desnaturalizante, una sustancia que le confiera muy mal sabor, o, incluso, eleve su toxicidad (p. 4) Cuando existe la necesidad, por ejemplo para propósitos químicos se hace uso de alcohol etílico puro, sin desnaturalizantes, pero su uso es estrictamente controlado.

1.2.1.1 Producción de efluentes de la Industria Licorera en el Ecuador

Datos recopilados por Benítez, Mielles y Mendieta (2010) mencionan que Ecuador produce diariamente 125.000 litros de alcohol para bebidas alcohólicas, especialmente. La producción privada de etanol está a cargo de tres fábricas: Producargo, asociada al ex Ingenio Azucarero Aztra (75000 L/día); Sideral S.A., asociada al Ingenio San Carlos (20000 L/día), y Codana S.A., asociada al Ingenio Valdez (30000 L/día); Ecuador exporta entre el 70 y el 80% del alcohol que se fabrica (p. 2).

De acuerdo con Perera (2009) el costo de producción en Ecuador está en la media de lo que cuesta en Brasil y Centroamérica, pues cada litro en Brasil se produce aproximadamente por \$0,23; en EE.UU. por \$0.35 y en Centroamérica por\$ 0.33; pero el precio internacional sobrepasa los \$0,65(p.4).

Según Perera (2009) innegablemente la producción de etanol directamente del jugo de la caña reduce la flexibilidad del ingenio en términos de producir diferentes productos y determinar una composición de mayor rentabilidad según las condiciones de mercado. Además, las inversiones se ven significativamente reducidas al producir únicamente etanol, pues ya no se necesitarían equipos de cocimiento que pueden representar hasta un 20% de las inversiones totales del ingenio.

1.2.1.2 Contaminantes de los efluentes de la industria licorera

Los efluentes de la obtención de alcohol etílico mediante la fermentación de las melazas se denomina vinaza. En términos del volumen producido, se estima que por cada litro de alcohol obtenido a partir de mosto de melaza, se generan alrededor de diez a quince litros de vinaza (Gómez, 1996, p. 2).

La vinaza presenta las siguientes características: son líquidos de color café y contaminante de las fuentes de agua; con un 6% – 7% de sólidos suspendidos, en su composición química presenta altos contenidos de materia orgánica, potasio y calcio y cantidades moderadas de nitrógeno y fósforo (Perera, 2009, p.6).

Hasta el momento no se ha encontrado un proceso técnico y económicamente adecuado para el tratamiento de vinazas. Los colorantes que contienen son del tipo polifenoles. Este efluente al entrar en contacto con agua de acequias, ríos o lagos facilita a los microorganismos su ataque produciendo sustancias tóxicas tanto líquidas como gaseosas. Las sustancias líquidas pueden ser ácidos orgánicos, alcoholes y sustancias gaseosas tales como gas sulfhídrico, metano, mercaptanos, dióxido de carbono, etc.

1.2.2 TRATAMIENTOS DE LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA LICORERA

Cuando se trata por derrame del efluente en cultivos de caña de azúcar como aguas de regadío, el efluente debe estar diluido en proporción 1:1, 1:2; este sistema se emplea en sitios donde existen cultivos intensivos de caña de azúcar y en terrenos cuyas aguas profundas presentan un nivel freático profundo de tal manera que no pueden ser contaminados.

También se suele poner los efluentes en lagunas especiales, en donde se someten a procesos de neutralización y oxidación por medio de surtidores; los materiales sólidos se sedimentan en 60 a 90 días, el lodo obtenido se separa para

tratarlo y utilizarlo como mejorador del suelo mientras que el agua se lo puede utilizar nuevamente. Este proceso si bien no es complicado requiere de extensiones grandes de terreno para formar las lagunas cuyas paredes y suelo deben estar impermeabilizados.

Los tratamientos con lodos activados en un proceso de fermentación aeróbica generan una vinaza diluida esperando obtener un efluente final con DQO menor a 1 000; en este proceso de la misma manera se necesita grandes volúmenes de piscinas de tratamiento y los lodos desechados deben ser a su vez tratados por otro sistema.

El tratamiento con lodos activados en un proceso de fermentación anaeróbica implica varias semanas de preparación del lecho con el producto de otro proceso o con estiércol de ganado; de este proceso se espera obtener una vinaza con DQO menor a 1 000, adicionalmente se obtiene metano y dióxido de carbono cuya mezcla se puede utilizar para combustión. El lodo de este tratamiento puede emplearse para agricultura. Se necesita recipientes de gran volumen y perfectamente cerrados.

Es posible utilizar procesos combinados aeróbico y anaeróbico después de los tratamientos de precipitación para mejorar el rendimiento de purificación y disminuir el tamaño de los recipientes.

2. PARTE EXPERIMENTAL

2.1 TRATAMIENTO Y ADECUACIÓN DEL CAUCHO PROVENIENTE DE NEUMÁTICOS USADOS

2.1.1 DIAGRAMA DE BLOQUE

Para el desarrollo de la parte experimental se siguió el siguiente procedimiento que se muestra en la Figura 2.1:

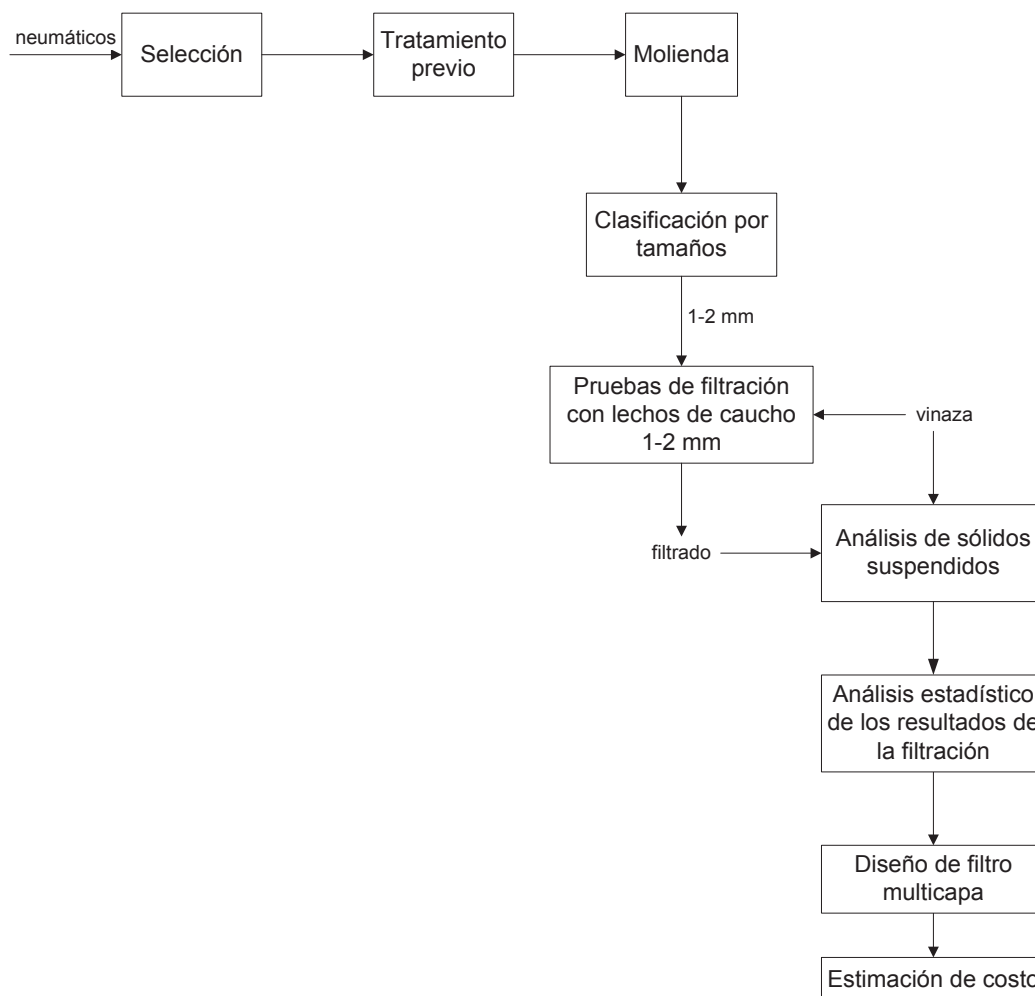


Figura 2.1 Esquema del procedimiento seguido para el diseño de un filtro para la retención de sólidos suspendidos de agua residual proveniente de una empresa licorera empleando caucho de neumáticos usados

2.1.1.1 Selección de neumáticos

El mercado de neumáticos es amplio y variado, así por ejemplo se encuentra neumáticos para automóviles, para maquinaria agrícola, bicicleta, autobuses, etc.; cada uno de ellos con características propias principalmente en lo referente a composición.

Los componentes básicos de un neumático se muestran a continuación (Castells, 2012, p.1080):

- Caucho: natural o sintético
- Agentes de vulcanización: azufre
- Aceleradores de vulcanización: tiozoles
- Promotores: óxidos de zinc
- Antioxidantes: aminos, fenoles, ceras
- Fibras de refuerzo: textiles, acero
- Cargas: negro de humo, sílice
- Plastificantes: aceites minerales

El caucho natural se emplea para brindar elasticidad mientras que el caucho sintético (estireno-butadieno, polibutadieno, polisopropenos) ofrece estabilidad térmica; aproximadamente la mitad del peso de un neumático está dado por el caucho. El azufre es otro elemento constituyente de los neumáticos, el cual funciona como agente vulcanizador ya que facilita el enlace entre las moléculas de los polímeros.

Adicionalmente se emplea óxido de zinc para acelerar o activar el proceso de vulcanización. Luego de la reacción de vulcanización se obtiene una estructura muy estable lo que conlleva a que los neumáticos requieran tiempos extensos para que se degrade. En la Figura 2.2 se muestra la estructura de un neumático.

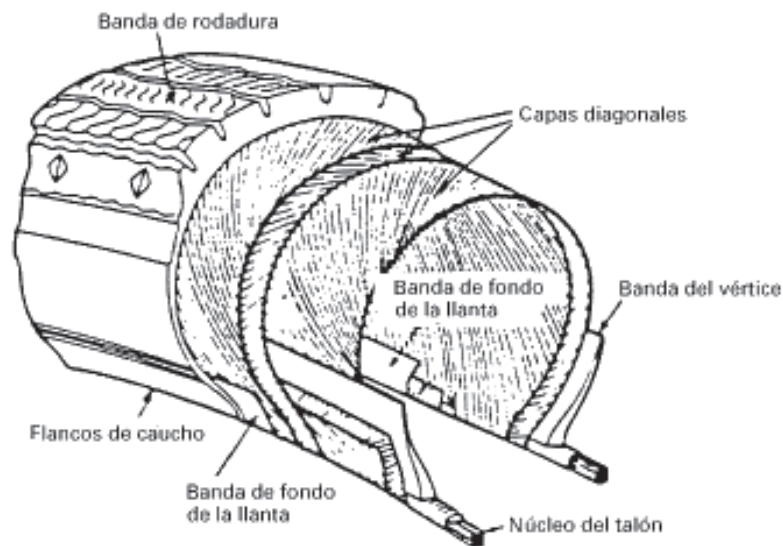


Figura 2.2 Estructura de un neumático

Para el desarrollo del presente trabajo se empleó una llanta de automóvil de marca BRIDGESTONE cuya composición se muestra en la Tabla 2.1:

Tabla 2.1 Formulación de neumáticos BRIDGESTONE

Compuesto	%
Cauchos	47
Negro de humo	22
Acero	16
Textiles	5
Óxido de zinc	1
Varios (antioxidantes)	9

(Castells, 2012, p.1081)

2.1.1.2 Tratamiento previo

El neumático usado de la marca antes mencionada se llevó a una vulcanizadora, en donde se retiró el aro metálico de la llanta y fue posible conseguir secciones rectangulares del neumático de aproximadamente $15 \times 10 \text{ cm}$ mediante corte del mismo con cuchillas afiladas, facilitando a la vez su manipulación.

Como tratamiento previo del neumático se procedió al lavado de los cortes rectangulares con agua para eliminar principalmente el polvo u otras impurezas superficiales. Luego del lavado se continuó con un proceso de reducción de tamaño hasta obtener caucho molido comprendido entre 1 y 2 mm, tamaño deseado para realizar las pruebas de filtración.

2.1.1.3 Molienda y clasificación de tamaño

Para obtener partículas de caucho entre 1 y 2 mm de diámetro se probó dos alternativas las mismas que se mencionan a continuación:

Primero se esmeriló las secciones rectangulares del neumático, como resultado de este proceso se obtuvo partículas de caucho finas cuyo tamaño era menor a 5 mm; para clasificar la granulometría requerida entre 1 y 2 mm para realizar las pruebas de filtración se tamizó las partículas de caucho esmerilado a través de las mallas 8, 12 y 16 norma ASTM.

Como segunda alternativa se probó moliendo el caucho de los neumáticos en un molino de cuchillas, debido a que la abertura de la boca del molino es aproximadamente de 1 cm fue necesario cortar las secciones rectangulares del neumático a aproximadamente dicha dimensión; para obtener estas secciones se empleó una guillotina de laboratorio. Una vez obtenidas las secciones de neumático de 1 cm se procedió a la molienda. En la Figura 2.3 se ilustra el proceso.



(a)



(b)

Figura 2.3 Fotografías de (a) Molienda del caucho en el molino de cuchillas y (b) obtención del caucho molido

El producto molido se pasó a una clasificación por tamaños empleando una serie de tamices con tamaños normalizados correspondientes a la malla 8, 12 y 16 norma ASTM. De esta manera fue posible separar las fracciones deseadas para efectuar las pruebas de filtración. El sistema de tamices y las fracciones obtenidas de indican en la Figura 2.4.



(a)



(b)



(c)

Figura 2.4 Fotografías de (a) Sistema de tamices, (b) operación del equipo de tamizado y (c) caucho clasificado por tamaño

En la Tabla 2.2 y Tabla 2.3 se muestran las características del molino de cuchillas y de los tamices empleados:

Tabla 2.2 Características del molino de cuchillas empleado en la molienda del caucho

MARCA	Atkin H. Thomas CO
MODELO	5KC42HC891K
# SERIE	720316
VOLTAJE	115
RPM	1125
HP	1/3

Tabla 2.3 Características del sistema de tamices empleados en la clasificación por tamaños del caucho molido

MARCA	U.S.A Standard Testing Sieve
ESPECIFICACION	A.S.T.M. E-11

2.2 EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA ALTURA DEL LECHO Y TAMAÑO DE LA PARTÍCULA SOBRE LA CANTIDAD DE SÓLIDOS SUSPENDISOS EN EL EFLUENTE

2.2.1 MONTAJE EXPERIMENTAL

Para evaluar el efecto de la altura del lecho y de la granulometría del mismo se procedió a instalar el sistema de filtración como se muestra en la Figura 2.5. El mismo que consta de un tanque de almacenamiento del efluente licorero desde donde se alimenta el líquido al filtro a través de una válvula manual. El filtro consiste de un tubo de vidrio de 50 cm de largo y 5 cm de diámetro. El filtro se adecuó con una capa de grava para sostener el lecho de caucho y finalmente se dispuso de un recipiente para almacenar el filtrado.

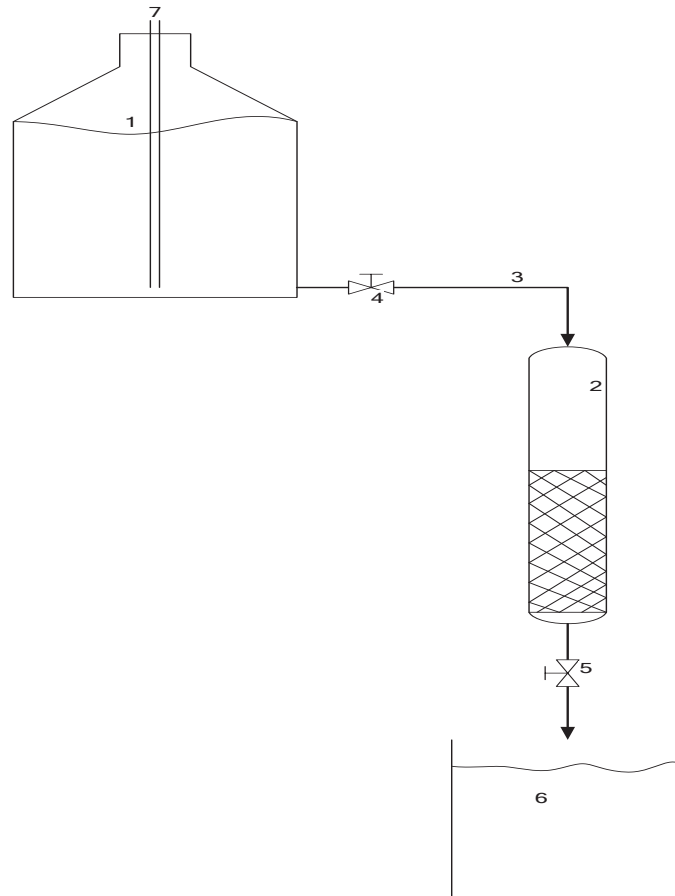


Figura 2.5 Esquema del proceso empleado en el laboratorio. (1) Recipiente de vinaza, (2) Filtro, (3) Conexión, (4,5) Válvulas, (6) Recipiente de recolección del filtrado y (7) Conducto a la atmósfera

En las Tablas 2.4, 2.5 y 2.6 se presentan las características de los materiales empleados para realizar las pruebas de filtración:

Tabla 2.4 Características del recipiente de vinaza

MATERIAL	Vidrio
MARCA	No específica
CAPACIDAD	5 L

Tabla 2.5 Características del filtro

MATERIAL	Vidrio
MARCA	No específica
DIÁMETRO	5 cm
ALTURA	50 cm

Tabla 2.6 Características del recipiente de recolección del filtrado

MATERIAL	PP polipropileno
MARCA	Kimble U.S.A
CAPACIDAD	4 L

2.2.2 DISEÑO EXPERIMENTAL

Para determinar la influencia de la altura del lecho y el tamaño de la partícula sobre la concentración de sólidos suspendidos en el efluente filtrado se desarrolló un diseño factorial 3×2 .

2.2.2.1 Variables de diseño

La filtración para retener sólidos suspendidos empleando lecho de caucho molido depende principalmente de la granulometría del lecho y de la altura del mismo, motivo por el cual se escogió estas dos variables como variables de diseño.

La altura del lecho se estudió dos niveles 10 cm y 15 cm, mientras que, para el estudio de la granulometría se probó tres niveles que son los correspondientes a las fracciones retenidas en las mallas # 8, # 12 y #16 norma ASTM. Por cada experimento efectuado se realizó dos repeticiones.

2.2.2.2 Variable de respuesta

Como variable de respuesta del diseño propuesto se fijó el contenido de sólidos suspendidos en el efluente filtrado. Para cuantificar los sólidos suspendidos que no fueron retenidos se aplicó el método gravimétrico de acuerdo a la norma estándar 2540 D (American Public Health Association, 1999, p.2). ANEXO VII

La ecuación [2.1] se utiliza para determinar la concentración de sólidos suspendidos:

$$[SS] = \frac{(A - B) \times 1000}{V} \quad [2.1]$$

Donde:

A = Peso del residuo seco + filtro (mg)

B = peso del filtro (mg)

SS = concentración de sólidos suspendidos

V: Volumen de la muestra a filtrarse al vacío, mL

2.2.2.3 Combinaciones de los niveles de las variables de diseño

Se realizó una prueba de filtración diaria de manera aleatoria, las combinaciones de las variables de diseño se obtuvo empleando un diseño estadístico factorial multinivel en el software Statgraphics Centurion XV, estas combinaciones se presentan en la Tabla 2.7. El bloque representa las repeticiones de cada combinación.

Tabla 2.7 Pruebas experimentales para un diseño factorial 3x2

Experimento	Bloque	Altura (cm)	Malla #
1	1	10	16
2	1	10	12
3	1	10	8
4	1	15	8
5	1	15	12
6	1	15	16
7	2	15	8
8	2	10	12
9	2	15	16
10	2	15	12
11	2	10	16
12	2	10	8
13	3	15	8
14	3	15	16
15	3	10	8
16	3	10	12
17	3	10	16
18	3	15	12

2.2.3 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.2.3.1 Operación del filtro con lecho de caucho molido

A continuación se detalla el procedimiento seguido para el desarrollo experimental de la filtración a través del lecho de caucho molido:

- Se llenó el recipiente de almacenamiento de vinaza, desde el cual se distribuyó el efluente al filtro propuesto.
- Se colocó el lecho de caucho dentro del filtro con la altura y granulometría a probar.
- Se abrió válvula de paso desde el tanque que contiene la vinaza hacia el filtro

- Se tomó datos de tiempo y volumen filtrado de las combinaciones antes presentadas para su posterior tratamiento
- Se tomó 1 litro de la vinaza y del efluente filtrado, este volumen se filtró al vacío empleando papel filtro cuantitativo previamente pesado, kitasato, embudo de cerámica y bomba de vacío.
- Se secó el papel filtro cuantitativo en una mufla a aproximadamente 105 °C durante una hora.
- Luego de la hora se retiró papel cuantitativo se dejó ambientar en un desecador.
- Se pesó papel filtró una vez alcanzada la temperatura ambiente
- Se aplicó la ecuación [2.1] para la determinación de la concentración de sólidos suspendidos.

Las características de los equipos usados para la determinación de sólidos suspendidos se indican en las Tablas 2.8, 2.9 y 2.10.

Tabla 2.8 Características de la bomba de vacío

MARCA	ExpectQualityPump
MODELO	AVP 501
VOLTAJE	115 V - 127 V
POTENCIA	1/3 HP
VACÍO MÁXIMO	150 μm

Tabla 2.9 Características de la balanza analítica empleada en el pesado

MARCA	ADAM
MODELO	PW 125
MÁXIMO	120 g
SENSIBILIDAD	0,0001 g

Tabla 2.10 Características de la mufla

MARCA	BarnsteadThermolyne
MODELO	Furnace 1300
T. MÁXIMA	500 °C

2.2.4 DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LAS VARIABLES DE DISEÑO: ALTURA Y GRANULOMETRÍA DEL LECHO

El tratamiento estadístico de los datos obtenidos de las pruebas experimentales se realizó mediante la utilización del software Statgraphics Centurion XV, obteniéndose la tabla de análisis de varianza con un 95 % de confianza y gráficas que permitieron interpretar los resultados de la experimentación realizada a escala de laboratorio.

2.2.5 DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES ÓPTIMAS DE OPERACIÓN

Para determinar las condiciones óptimas de operación del filtro con lecho de caucho molido se consideró la combinación de los niveles de las variables de diseño con las que se obtuvo un mayor porcentaje de remoción de sólidos o lo que equivale a un menor contenido de sólidos suspendidos en el efluente filtrado. Este criterio se obtuvo de la gráfica de interacción que proporcionó el software Statgraphics Centurion XV.

2.3 DISEÑO DE UN FILTRO MULTICAPA A ESCALA PILOTO

2.3.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS PARTÍCULAS DE CAUCHO MOLIDO

2.3.1.1 Coeficiente de uniformidad

Por definición el coeficiente de uniformidad (CU) viene dado por la siguiente relación (McCabe, Smith y Harriott, 1991, p. 175):

$$CU = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad [2.2]$$

El d_{60} representa la abertura del tamiz que deja pasar el 60% en (mm), y el d_{10} está dado por la abertura del tamiz que deja pasar el 10% en (mm).

El coeficiente de uniformidad es un indicador de la uniformidad del tamaño de partícula de un material determinado. Cuando éste es menor o igual a 1 se dice que el material es uniforme en cuanto a su tamaño.

A continuación en la Tabla 2.11 se muestra los datos obtenidos de la molienda del caucho:

Tabla 2.11 Datos experimentales del caucho molido en el laboratorio entre mallas 8, 12 y 16

# Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido (g)
8	2.38	831
12	1.68	707
16	1.19	214
20	0.841	65
Fondo	-	134
Total		1951

2.3.1.2 Porosidad

La porosidad (p) para lecho de caucho molido se determinó aplicando la ecuación [2.3]:

$$p = \frac{V_{\text{huecos}}}{V_{\text{total soporte}}} \quad [2.3]$$

2.3.1.3 Esfericidad y tamaño de poro

La esfericidad se determinó a partir de la Figura 3. que relaciona la porosidad con la esfericidad para lechos con partículas de tamaño uniforme arregladas sin un orden específico, es decir arreglo al azar de las partículas del lecho.

El tamaño de poro se determinó empleando la ecuación [2.4]:

$$\phi_p = \frac{1}{7} E \quad [2.4]$$

2.3.1.4 Permeabilidad

La permeabilidad de las partículas de caucho molido se determinó empleando la siguiente relación:

$$k = \frac{g \times (\emptyset)^2}{32} \times \frac{F_{Re}}{F_f} \quad [2.5]$$

Donde:

g : gravedad $9,8 \text{ m/s}^2$

\emptyset : diámetro promedio de partículas de caucho

F_{Re} : Factor correctivo del numero de Reynolds

F_f : Factor correctivo de frotamiento

Los valores correspondientes a F_{Re} y F_f se determinan a partir de la Figura 3.8 y Figura 3.9.

2.3.1.5 Filtración a presión constante

La filtración que se desarrolló en el laboratorio empleando lecho de caucho molido se trata de una filtración a presión constante, por lo tanto debido a que el tamaño de los sólidos suspendidos en la vinaza es pequeño y a la vez que el flujo del efluente a través del lecho es laminar, el modelo experimental se ajustó a la ecuación de Ergun simplificando el término que corresponde a la turbulencia:

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu_f}{D^2 g} v_s \quad [2.6]$$

A continuación en la Tabla 2.12 se muestra los datos de volumen filtrado en función del tiempo que se tomó al realizar las pruebas de filtración para la mejor combinación de altura y granulometría del caucho molido y para otras dos combinaciones más:

Tabla 2.12 Velocidad de filtración de diferentes lechos: altura 15 cm

	Granulometría: 1,19 mm		Granulometría: 1,68 mm		Granulometría: 2,38 mm	
	V (L)	θ (s)	V (L)	θ (s)	V (L)	θ (s)
0	0	0	0	0	0	0
1	0,25	1,7	0,25	1,5	0,25	1.5
2	0,5	3,1	0,5	2,9	0,5	3.1
3	0,75	4,5	0,75	4,4	0,75	4.8
4	1	6,3	1	6,3	1	6.5
5	1,25	9,1	1,25	8,8	1,25	9.2
6	1,5	12,5	1,5	11,9	1,5	12.3
7	1,75	16,8	1,75	15,2	1,75	15.7
8	2	21,3	2	19,6	2	19.2
9	2,25	26,8	2,25	24,9	2,25	23.6
10	2,5	32,2	2,5	31,3	2,5	29.5

Tabla 2.12 Velocidad de filtración de diferentes lechos: altura 15 cm (continuación...)

11	2,75	38,5	2,75	37,8	2,75	35.5
12	3	45,1	3	44,7	3	42.4
13	3,25	51,6	3,25	51,2	3,25	50.2
14	3.5	58,7	3.5	58,3	3.5	57.6
15	3,75	66,7	3,75	66,1	3,75	65.2
16	4	75,5	4	75,0	4	74.4
17	4,25	84,3	4,25	84,6	4,25	83.4
18	4.5	93,6	4.5	94,2	4.5	92.2
19	4,75	104,3	4,75	103,6	4,75	101.4
20	5	115,5	5	113,6	5	111.6
21	5,25	127,4	5,25	123,7	5,25	122.6

2.3.2 DISEÑO DEL FILTRO A ESCALA PILOTO

2.3.2.1 Diseño preliminar

Para el diseño de un filtro a escala piloto se tomó en consideración el tratamiento del 10% de la vinaza producida a nivel nacional por Producargo, Sideral S.A., y Codana S.A.

El filtro se diseñó con base a los resultados del análisis estadístico para una carga superficial de 300 m³/m²-día. Y para un tiempo de funcionamiento del filtro de ocho horas por día (Brown, 1955, p. 347).

2.3.2.2 Número de filtros

Con lo mencionado anteriormente se determinó el número de filtros requeridos para tratar dicho caudal con la siguiente relación:

$$n = \frac{1}{4} \sqrt{Q} \quad [2.7]$$

Donde:

n : número de filtros

Q : Caudal, m^3/s

De todas maneras, el mínimo número de filtros es de 2 pero es recomendable usar 4 (Maldonado, 2005, p. 132).

2.3.2.3 Área de filtración y dimensiones del filtro

El área de filtración se determinó mediante:

$$A_f = \frac{Q}{v_f} \quad [2.8]$$

Donde:

A_f : Área de filtración, m^2

v_f : Velocidad de filtración, m/s

Con el área de filtración se determinó el diámetro del filtro para una forma cilíndrica:

$$A_f = \frac{\pi}{4} \times \Phi^2 \quad [2.9]$$

Donde:

Φ : Diámetro del filtro, m

Para determinar la altura total del filtro se necesitó considerar la altura de cada lecho, el agua sobrenadante y el sistema de drenaje, como se especifica en los resultados.

El sistema de drenaje estará constituido por un falso fondo con piedra pómez que sostiene una capa de grava cuya finalidad es que sirva de soporte para los lechos. Para determinar la altura de la grava se empleó la siguiente relación:

$$\frac{L_{grava}}{\phi_{grava (cm)}} \geq 3 \quad [2.10]$$

Donde:

L_{grava} : Altura de grava, cm

ϕ_{grava} : Diámetro de grava, cm

2.3.2.4 Pérdidas de carga

Otro parámetro que se consideró es la pérdida de carga la misma que se determina mediante:

$$\Delta h = \frac{1}{2} v \times \left(\phi \frac{6}{d}\right)^2 \times \frac{(1-p)^2}{p^2} \times L \quad [2.11]$$

Donde:

Δh : Pérdida de carga, m

v : Velocidad de filtración, m/s

ϕ : Coeficiente de superficie específica (tabla 10)

d : Diámetro de la partícula, mm

p : Porosidad del medio (tabla 10)

L : Longitud del filtro o del medio, m

En la Tabla 2.13 se muestra los valores del coeficiente de superficie específica y de la porosidad para un lecho de arena:

Tabla 2.8 Coeficiente de superficie específica φ y porosidad ε para lechos de arena

Grano	φ	ε
Esférico	1,00	0,38
Redondeado con aristas	1,06	0,39
Triturado	1,43	0,48

(McCabe, Smith y Harriott, 1991, p. 175)

2.3.2.5 Soportes del filtro

Se diseñó cuatro soportes para el filtro de 10 cm de longitud de acero A – 36, para esto se consideró el peso total del filtro incluyendo los lechos, sistema de drenaje, agua sobrenadante, determinando la fuerza ejercida por todos los elementos del filtro estos elementos:

$$F = m \times g \quad [2.12]$$

Donde:

F : Fuerza, N

m : Masa total del filtro, Kg

g : Gravedad, 9,8 m/s²

La presión ejercida (Pa) por dicha fuerza se calcula mediante:

$$P = \frac{F}{A_f} \quad [2.13]$$

Como se trata de cuatro soportes la fuerza se dividió para cuatro y se determinó la presión ejercida por dicha fuerza, para esta fuerza individual se determinó la presión nuevamente para acero A – 36 de 1 ¼ in (0,032 m), asegurando que esta presión sea menor al límite de ruptura mínimo del mismo acero A – 36, es decir menor a 400 MPa (American Institute of Steel Construction, 1986, p. 5).

2.3.2.6 Retrolavado del filtro

Para el retrolavado se empleará agua que ingrese desde la parte inferior. Para conocer el caudal requerido se determinó la velocidad de lavado mediante (ACS Medio Ambiente, 2012):

$$v_{lavado} = 4 \times v_f \quad [2.14]$$

Con la siguiente relación se determinó el caudal teórico de lavado:

$$Q_{teórico} = v_{lavado} \times A_f \quad [2.15]$$

Para determinar el caudal de lavado se empleó:

$$Q_{lavado} = Q_{teórico} + (\%_{expansión} \times Q_{teórico}) \quad [2.16]$$

Una vez conocido el caudal de lavado se determinó la altura necesaria para descargar el lodo producido del lavado, mediante la siguiente relación:

$$H_{lavado} = (1 + \%_{expansión}) \times H_{lechos} \quad [2.17]$$

Para dimensionar las bombas a emplearse en la filtración de la vinaza, se utilizó la ecuación de Bernoulli, según sea el caso dichas ecuaciones se muestran en el capítulo de resultados.

2.4 ESTIMACIÓN DEL COSTO DEL FILTRO MULTICAPA A ESCALA PILOTO

Para determinar el costo del filtro multicapa a escala piloto se consideró los costos directos que se presentan en la Tabla 2.14 y el costo de operación que se refiere al costo de obtención de caucho molido.

Tabla 2.14 Costos directos para la implementación del filtro multicapa

Designación	Precio unitario (\$)
Tubería 1" PVC (\$/m)	3,75
Tubería 2" PVC (\$/m)	7,45
Tubería 1 1/4" PVC (\$/m)	4,50
Codo 1" PP	1,46
Codo 2" PP	5,26
Codo 1 1/4" PP	2,75
Válvula compuerta 2" PP	11,36
Válvula compuerta 1" PP	5,71
Válvula compuerta 1 1/4" PP	10,51
Filtro	50,00
Caucho	3,58
Bomba ¼	96,60
Bomba 1/50	42,98
Bomba 1/30	57,46

(Comercial Kywi S.A, 2015)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 TRATAMIENTO Y ADECUACIÓN DEL CAUCHO PROVENIENTE DE NEUMÁTICOS USADOS

3.1.1 RESULTADOS DE LA MOLIENDA DE NEUMÁTICOS USADOS

La obtención de las partículas de caucho molido representó un factor importante para el desarrollo de las pruebas experimentales de filtración, se requiere el equipo apropiado para cortar el neumático en fracciones de fácil manipulación como la maquinaria que se encuentra en una vulcanizadora en donde fácilmente es posible retirar la parte metálica.

De las pruebas preliminares de filtración efectuadas se observó que el paso del efluente por medio del lecho de caucho esmerilado es demasiado lento, es decir, las partículas de caucho esmerilado presentaban una resistencia al paso del líquido por tal motivo pese a que el caucho esmerilado retenía los sólidos suspendidos se descartó esta posibilidad debido a los grandes tiempos de filtración requeridos. La resistencia que ofrecía el caucho esmerilado al paso del efluente de las observaciones realizadas, se debe a que por acción del calor entregado por el esmeril las partículas de caucho se compactan entre si dificultando el paso a través de las mismas.

Así mismo de las pruebas preliminares de filtración empleando lecho de caucho molido como medio de filtración se observó que no se tiene resistencia alguna al paso del efluente a través del mismo; los sólidos suspendidos quedaron retenidos a la largo del lecho en la parte superior del mismo sin la formación de torta.

En la Tabla 3.1 se muestra el tratamiento de los datos de la molienda del caucho:

Tabla 3.1 Tratamiento de datos experimentales del caucho molido en el laboratorio entre mallas 8, 12 y 16

# Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido (g)	Porcentaje retenido	Porcentaje retenido pasado	Porcentaje pasado acumulado
8	2.38	831	42.59	42.59	57.41
12	1.68	707	36.24	78.83	21.17
16	1.19	214	10.97	89.80	10.20
20	0.841	65	3.33	93.13	6.87
Fondo	-	134	6.87	100.00	0.00
Total		1951	100.00		

De ser necesario, se debe realizar una separación magnética si como producto de la molienda se obtiene partículas de caucho y metal antes de realizar el tamizado respectivo. Para este estudio luego de la molienda de las secciones del neumático se obtuvo parte textil - caucho, luego del tamizado la parte textil se forma una capa sobre el caucho fácil de retirar manualmente.

Las llantas usadas acumuladas en los botaderos de basura ocupan gran espacio debido a que son difíciles de compactarse, constituyendo un hábitat de roedores e insectos y adicionalmente acumulan gases o lixiviados presentes en los botaderos. Debido a la problemática mencionada con los desechos de neumáticos este trabajo pretende ser aplicable a cualquier tipo de llanta por lo que no se realizó pruebas con neumáticos de diferentes marcas.

3.2 EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA ALTURA DEL LECHO Y TAMAÑO DE LA PARTÍCULA SOBRE LA CANTIDAD DE SÓLIDOS SUSPENDISOS EN EL EFLUENTE

3.2.1 RESULTADOS EXPERIMENTALES

Los resultados de las pruebas experimentales del diseño factorial 3x2 con dos repeticiones se presentan a continuación en la Tabla 3.2:

Tabla 3.2 Resultados de las pruebas experimentales de filtración

Experimento	Bloque	Altura (cm)	Malla #	$[SS]_{final}$ (mg/L)
1	1	10	16	19.4
2	1	10	12	21.4
3	1	10	8	28.8
4	1	15	8	18.8
5	1	15	12	18.2
6	1	15	16	10.9
7	2	15	8	18.5
8	2	10	12	21.7
9	2	15	16	13.8
10	2	15	12	18.6
11	2	10	16	24.9
12	2	10	8	26.6
13	3	15	8	15
14	3	15	16	11.4
15	3	10	8	26.5
16	3	10	12	24.4
17	3	10	16	28.6
18	3	15	12	16.6

De la Tabla 3.2 se puede observar por simple inspección que el caucho si retuvo los sólidos suspendidos de la vinaza ya que a partir de una concentración inicial de sólidos de aproximadamente 500 mg/L se llega a concentraciones que van en un rango de 10 - 30 mg/L; por tanto el caucho si sirve como lecho de filtración.

3.2.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El análisis estadístico permite determinar cuál de los factores afecta significativamente el proceso de filtración y si existe interacción entre ellos.

3.2.2.1 Modelo Estadístico 3x2

El modelo al que se ajusta un diseño factorial 3x2 es:

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ij} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad [3.1]$$

Donde:

Y_{ij} : Observaciones (datos)

μ : Media global poblacional

α_i : Efecto del nivel i del Factor A

β_j : Efecto del nivel j del Factor B

$(\alpha\beta)_{ij}$: Efecto de la interacción

ε_{ij} : Error aleatorio

a : Niveles del Factor A

b : Niveles del Factor B

n : Número de réplicas

De la regresión realizada de los datos experimentales se presenta la Tabla 3.3:

Tabla 3.3 Regresión ajustada al diseño factorial 3x2

R-cuadrado	80,16 %
Error estándar estimado	3.08 %
Error absoluto medio	1.91 %

De la Tabla 3.3 se deduce que el modelo explica en un R-cuadrado 80,16 % la variabilidad de la variable de respuesta. También se aprecia que la desviación estándar de los residuos, es decir la diferencia entre la respuesta observada y la respuesta predicha por el modelo es 9,64 %; mientras que el error medio absoluto es 1,91 %.

3.2.2.2 Verificación de los supuestos del modelo

El modelo estadístico de un diseño factorial comprende ciertos supuestos los mismos que deben cumplirse. Estos supuestos son: supuesto de normalidad, supuesto de varianza constante y supuesto de independencia. La verificación de dichos supuestos se muestra en las Figuras 3.1, 3.2 y 3.3.

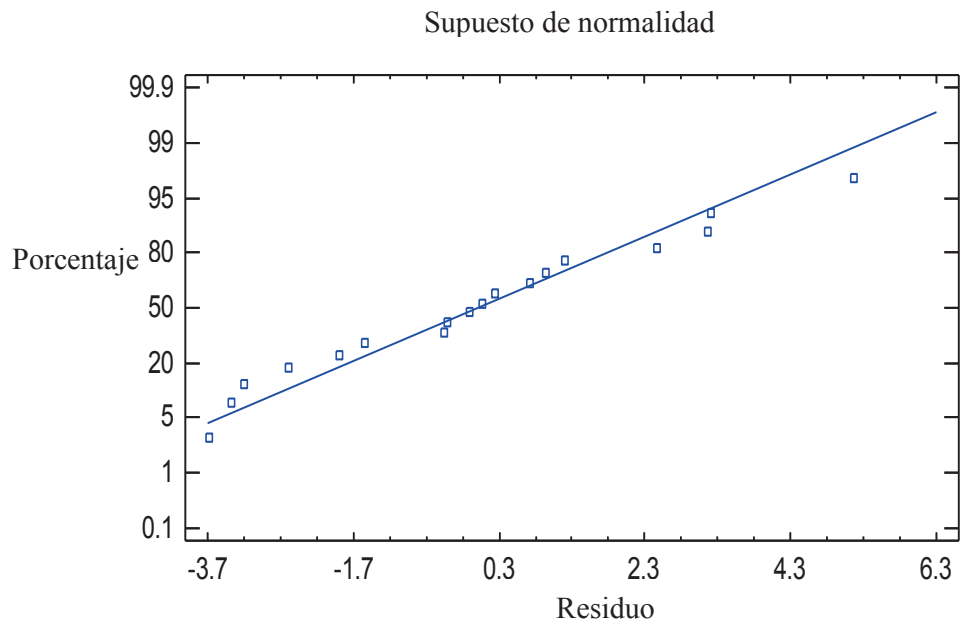


Figura 3.1 Verificación del supuesto de normalidad

La Figura 3.1 indica el cumplimiento del supuesto de normalidad ya que como se aprecia los residuos graficados tienden a quedarse alineados a una línea recta.

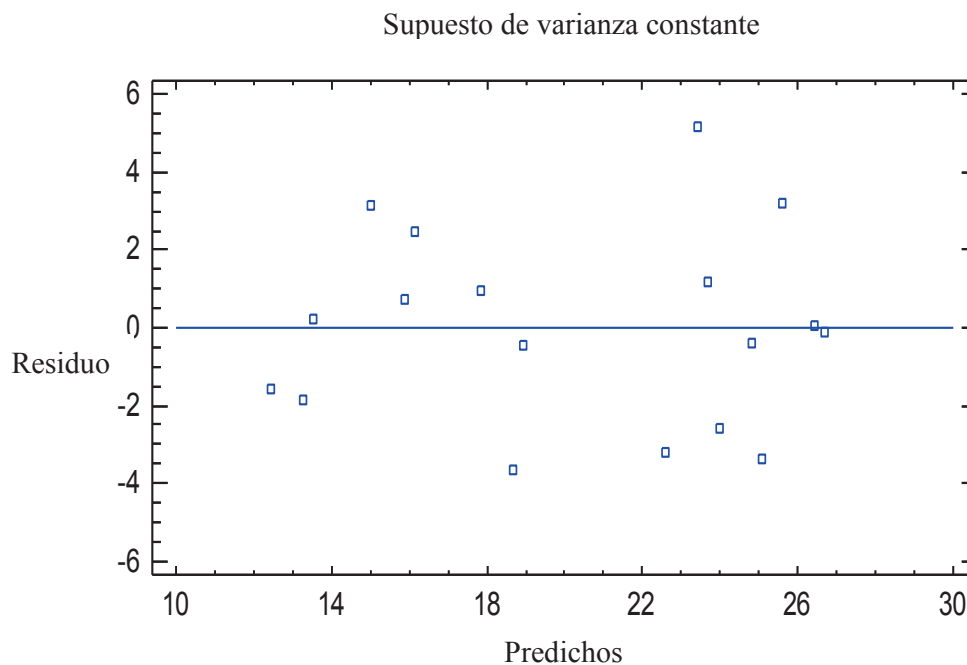


Figura 3.2 Verificación del supuesto de varianza constante

La Figura 3.2 residuos vs predichos, muestra que el supuesto de varianza constante se cumple debido a que los puntos se distribuyen de manera aleatoria sobre la banda horizontal sin ningún patrón o tendencia clara. Por lo tanto al cumplirse este supuesto significa que los tratamientos tienen o presentan varianzas similares.

Como se mencionó el diseño desarrollado para evaluar un filtro con partículas de neumáticos usados corresponde a un diseño factorial 3×2 , con dos repeticiones; se realizó 18 pruebas experimentales, las mismas que se desarrollaron una por día pero de manera totalmente aleatoria. Debido a esto la Figura 3.3 permite observar que la gráfica residuos vs orden de experimentos no tiene ninguna tendencia es totalmente aleatoria por lo cual se asegura el supuesto de independencia.

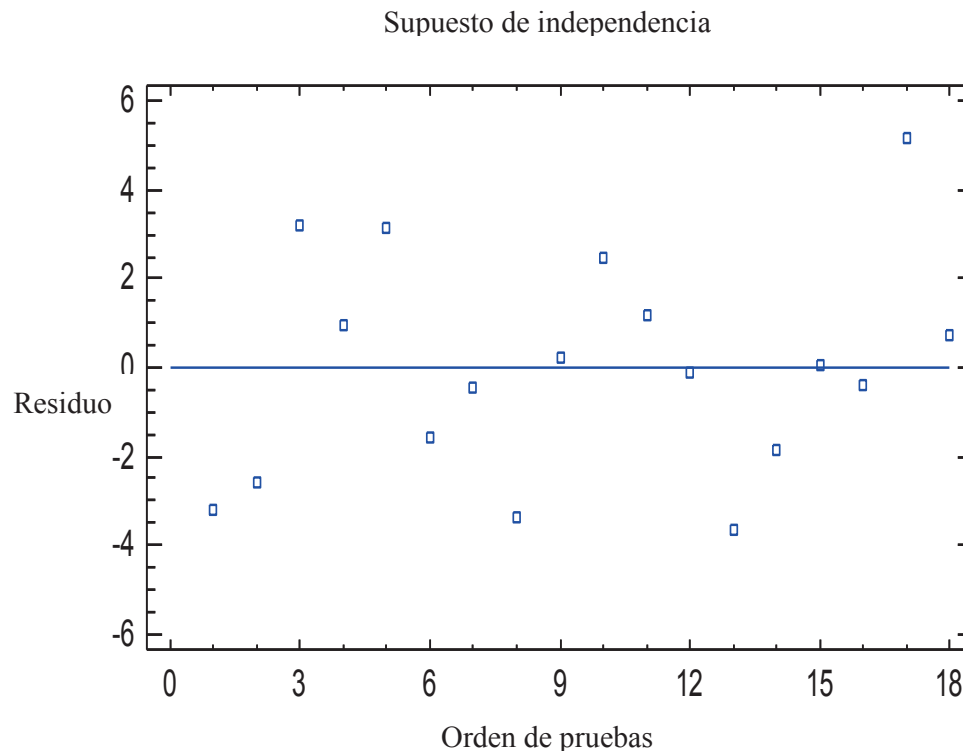


Figura 3.3 Verificación del supuesto de independencia

3.2.3 INFLUENCIA DE LAS VARIABLES DE DISEÑO SOBRE LA VARIABLE DE RESPUESTA

3.2.3.1 Tabla ANOVA

Para evaluar la influencia de la altura y granulometría del lecho de caucho sobre la concentración final de sólidos suspendidos en el filtrado se realizó el análisis de varianza al 95 % de confianza mediante el programa Statgraphics.

Para el diseño factorial 3 x 2 la hipótesis nula H_0 y la hipótesis alternativa H_a para las variables de diseño y su interacción son:

Para el **Factor A**: Altura del lecho de caucho

H_{0A}: No existe ningún efecto de la altura del lecho de caucho sobre la concentración de sólidos suspendidos después de la filtración.

H_{aA}: Si hay efecto de la altura del lecho de caucho sobre la concentración de sólidos suspendidos después de la filtración.

Para el **Factor B:** Granulometría del material filtrante

H_{0B}: No existe ningún efecto de la granulometría del material filtrante sobre la concentración de sólidos suspendidos después de la filtración.

H_{aB}: Si hay efecto de la de la granulometría del material filtrante sobre la concentración de sólidos suspendidos después de la filtración.

Para la **interacción AB:** Interacción de la altura del lecho de caucho y la granulometría del material filtrante

H_{0AB}: No existe ningún efecto de la interacción altura del lecho de caucho y granulometría del material filtrante sobre la concentración de sólidos suspendidos después de la filtración.

H_{aAB}: Si hay efecto de la interacción altura del lecho de caucho y granulometría del material filtrante sobre la concentración de sólidos suspendidos después de la filtración.

En la Tabla 3.4 se presentan los resultados del análisis de varianza.

Tabla 3.4 Análisis de Varianza (ANOVA) para la retención de sólidos suspendidos

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Razón F	Valor p
A:Altura	360.014	1	360.014	37.98	0.0001
B:Granulometria	52.92	1	52.92	5.58	0.0376

Tabla 3.4 Análisis de Varianza (ANOVA) para la retención de sólidos suspendidos (continuación...)

AB	4.32	1	4.32	0.46	0.5135
BB	0.0544444	1	0.0544444	0.01	0.9409
Bloques	3.95111	2	1.97556	0.21	0.8150
Total error	104.257	11	9.47788	-	-
Total (corr.)	525.516	17			

La tabla ANOVA muestra el efecto por separado de cada factor respecto a la variable concentración de sólidos suspendidos totales. Valores de p menores a 0,05 tienen una influencia estadísticamente significativa, en este caso según la Tabla 3.4 muestra que tanto el factor A como el factor B que representan la altura del lecho y la granulometría del mismo tienen una influencia estadísticamente significativa respecto a la concentración de sólidos suspendidos, descartando así la hipótesis nula para ambos casos. Mientras que la hipótesis nula en el caso de la interacción de la altura y granulometría del lecho es aceptada dado que como se aprecia es mayor a 0,05 por tal motivo no existe influencia estadísticamente significativa de la interacción de altura y granulometría del caucho sobre la concentración final de sólidos suspendidos.

3.2.3.2 Diagrama de Pareto

El mismo efecto se muestra gráficamente en la Figura 3.4 que corresponde al Diagrama de Pareto. En dicho diagrama las barras que pasan el límite de la línea vertical indican las variables que tienen una influencia significativa sobre la variable de respuesta.

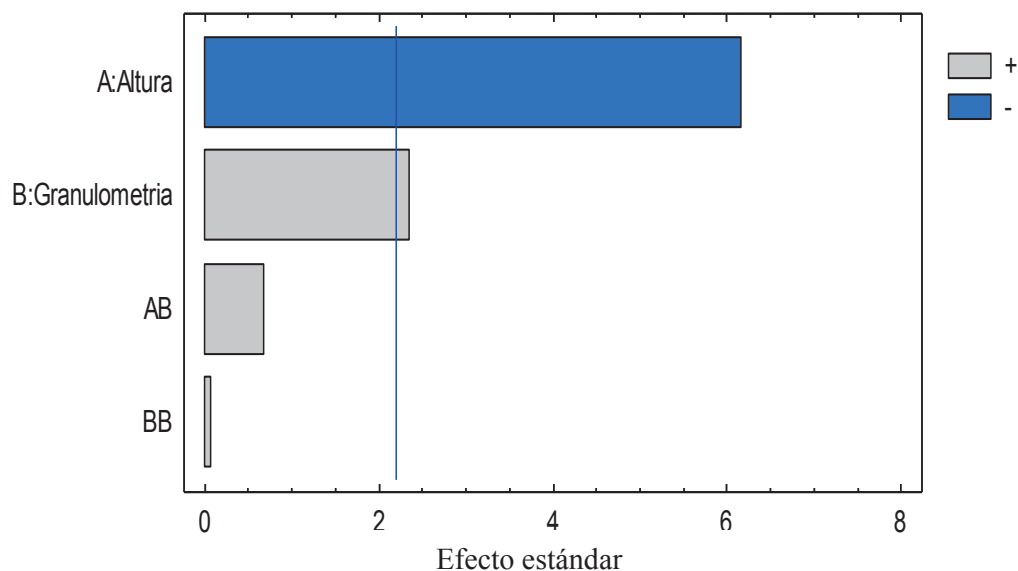


Figura 3.4 Diagrama de Pareto

Claramente se aprecia que la altura del lecho si influye significativamente sobre la retención de los sólidos suspendidos de la vinaza con signo negativo lo que significa que al aumentar la altura del lecho disminuye la concentración de sólidos suspendidos a la salida, por lo tanto para aumentar la retención de sólidos se debe trabajar a la mayor altura. La granulometría del medio (ANEXO I) tiene una influencia sobre la concentración de sólidos a la salida pero con un signo positivo esto se refiere a que si la una variable aumenta pues la variable de respuesta también aumenta, por lo tanto en este caso la granulometría se refiere específicamente a la abertura del tamiz es decir que se consigue menor concentración de sólidos a la salida con la menor abertura de malla.

3.2.4 CONDICIONES ÓPTIMAS DE OPERACIÓN

A continuación, la Figura 3.5 permite discutir la combinación de las variables de diseño que permite obtener la mayor remoción de solidos suspendidos en el filtrado.

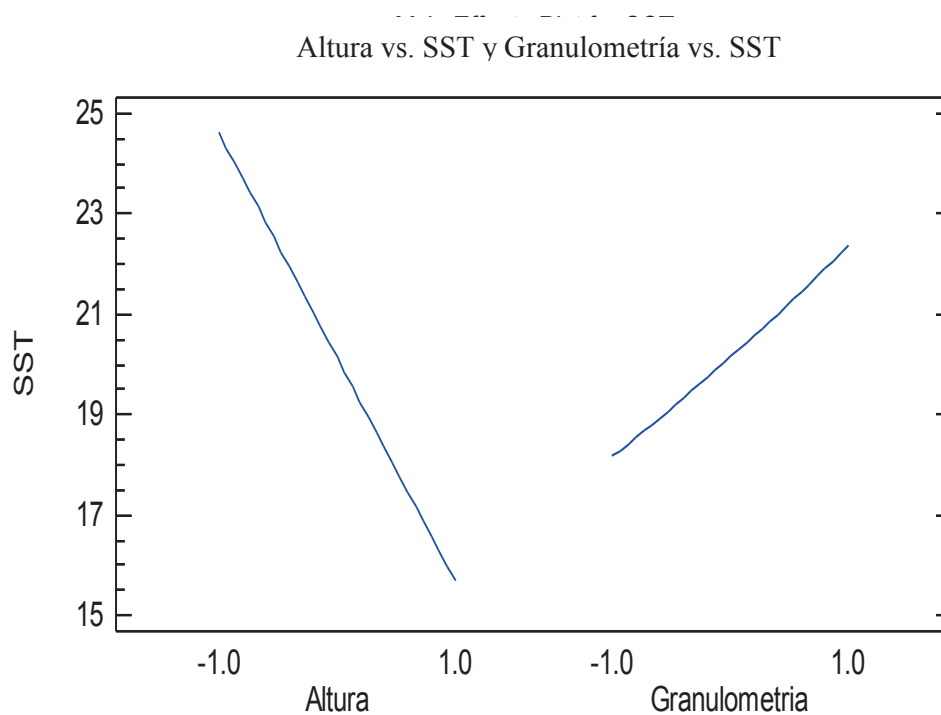


Figura 3.5 Efecto de la altura y granulometría del lecho sobre los sólidos suspendidos finales

En la Figura 3.5 se puede apreciar el efecto de cada variable sobre la variable de respuesta, así por ejemplo respecto a la altura de lecho se observa que se obtiene una menor concentración de sólidos suspendidos a un nivel 1 que corresponde a la mayor altura en este caso 15 cm, refiriéndose a la granulometría se logra una menor concentración de sólidos a la salida cuando se trabaja a un nivel -1 el mismo que pertenece a una malla # 16. A un mayor número de malla (menor abertura) es decir a menor diámetro de las partículas de caucho se logra retener más sólidos debido a que estos tamaños pequeños permiten retener sólidos más finos y al trabajar a la mayor altura pues el líquido a filtrar va a tener mayor trayecto que recorrer y esto asegura que se retengan más sólidos en su recorrido.

La Tabla 3.5 presenta el óptimo que asegura la mayor remoción de sólidos de la vinaza.

Tabla 3.5 Óptimo para la operación de filtración

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Altura	-1.0	1.0	1.0
Granulometría	-1.0	1.0	-1.0

En la Tabla 3. se presenta la combinación de los niveles de cada variable con el que se obtiene la menor concentración de sólidos suspendidos en el filtrado, este óptimo corresponde a trabajar con la malla # 16 (1,19 mm) y a su mayor altura de lecho (15 cm).

3.3 DISEÑO DEL FILTRO MULTICAPA

3.3.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS PARTÍCULAS DE CAUCHO MOLIDO

3.3.1.1 Coeficiente de uniformidad

En la Tabla 3.1 se muestra la cantidad de caucho que se obtuvo de las pruebas experimentales realizadas en el laboratorio, así como su porcentaje acumulado el mismo que sirve para generar la Figura 3.6 en la cual se muestra el coeficiente de uniformidad (CU) para las partículas molidas de caucho.

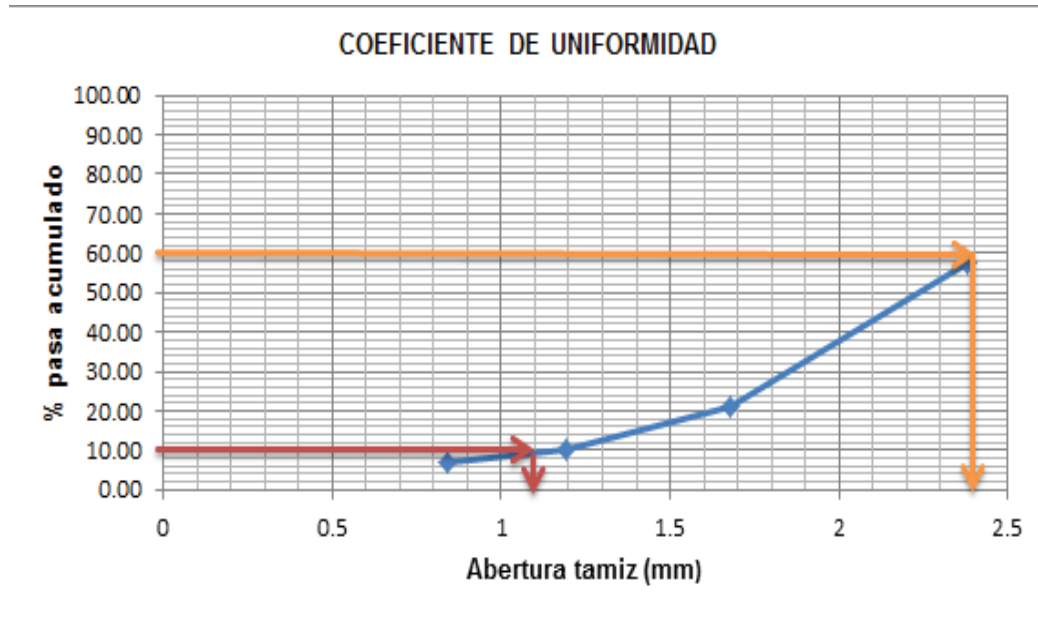


Figura 3.6 Coeficiente de uniformidad del caucho molido entre las mallas 8, 12 y 16

$$CU = \frac{2,4 \text{ mm}}{1,1 \text{ mm}} = 2,18$$

Como CU es mayor a 1 entonces es posible deducir que las partículas de caucho no son uniformes en cuanto a su tamaño se refiere.

3.3.1.2 Porosidad

Para determinar la porosidad (p) del caucho molido para lo cual se colocó 1 g de caucho molido en un recipiente con 50 mL de etanol, desplazando 2 mL de etanol.

Se determinó el volumen ocupado por 1 g de caucho, para determinar la densidad del caucho se utilizó la siguiente relación:

$$S_{caucho4^{\circ}C} = \frac{\delta_{caucho}}{\delta_{agua4^{\circ}C}} \quad [3.2]$$

$$S_{caucho4^{\circ}C} = 0,92 - 096 \text{ (Perry, 2001, p. 2-126)}$$

$$\delta_{agua4^{\circ}C} = 999,972 \text{ Kg/m}^3 \text{ (Perry, 2001, p. 2-98)}$$

Considerando un promedio de la gravedad específica del caucho se determina la densidad del mismo:

$$0,94 = \frac{\delta_{caucho}}{999,972 \text{ Kg/m}^3}$$

$$\delta_{caucho} = 939,97 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0,94 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

Con la densidad del caucho se determinó el volumen ocupado por 1 g:

$$V_{total\ soporte} = \frac{1\text{g}}{0,94 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} = 1,06 \text{ cm}^3$$

Reemplazando datos se determinó la porosidad del caucho molido.

$$p = \frac{(2 - 1,06) \text{ mL}}{1,06 \text{ mL}} = 0,88$$

La densidad del caucho se muestra en el Anexo V.

Por lo tanto, el caucho si tiene una estructura porosa lo cual le da las características de ser lecho de filtración. Gracias a su estructura porosa es que se facilita la filtración porque es aquí en los poros en donde se ven retenidos una gran cantidad de sólidos.

3.3.1.3 Esfericidad y tamaño de poro

Para una porosidad de las partículas de caucho de 0,88 se tiene esfericidad (E) correspondiente a 0,2; según Figura 3.7 que se muestra a continuación:

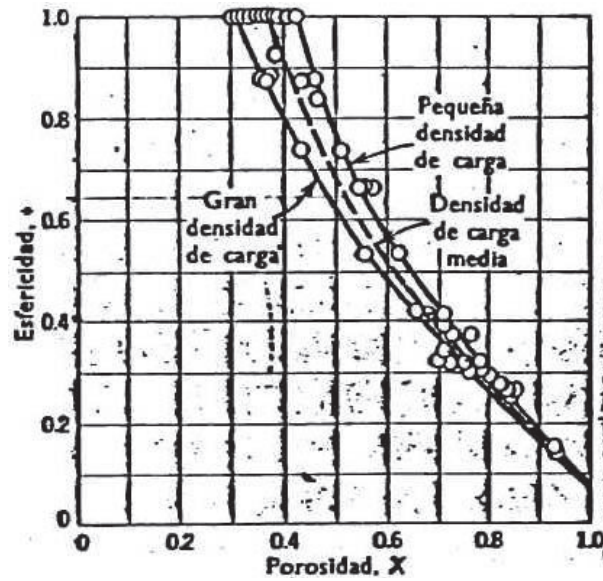


Figura 3.7 Esfericidad del lecho de caucho en función de la porosidad
(Brown, 1955, p. 214)

Una vez determinado la esfericidad se calculó el tamaño de poro a partir de la ecuación [3.2], por lo tanto se tiene:

$$\phi_p = \frac{1}{7}(0,2) = 0,03 \text{ (mm)}$$

3.3.1.4 Permeabilidad

A continuación se muestran las Figuras 3.8 y 3.9 de las que se determina F_{Re} y F_f :

$$F_{Re} = 34 \text{ y } F_f = 700$$

$$k = \frac{(9,8 \frac{m}{s^2}) \times (1,19 \text{ mm})^2 \times \frac{1 \text{ m}^2}{1000^2 \text{ mm}^2}}{32} \times \frac{34}{700} = 2,11 \times 10^{-8} \text{ (m/s)}$$

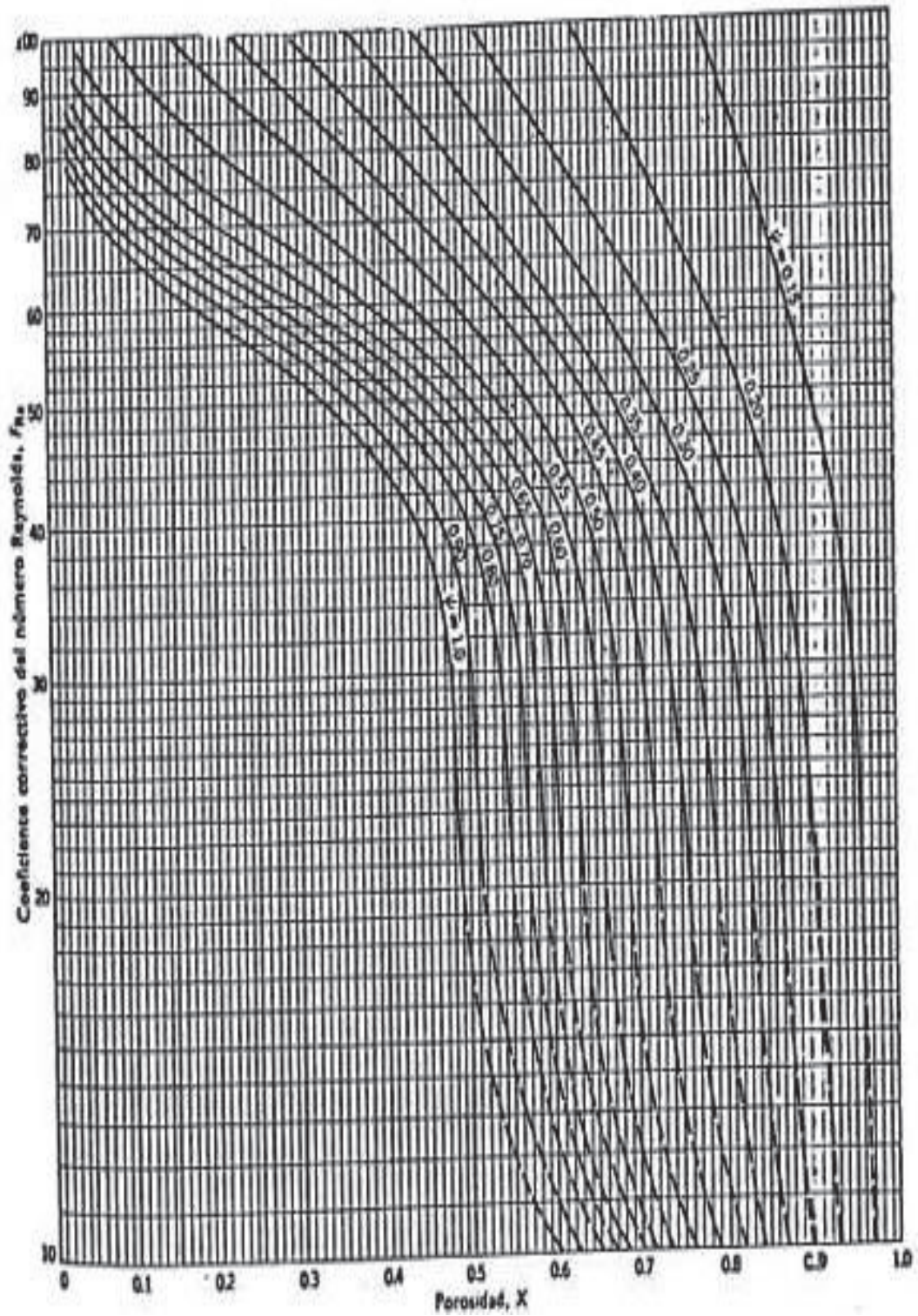


Figura 3.8 Valores del coeficiente correctivo del número de Reynolds en función de la porosidad y esfericidad
(Brown, 1955, p. 211)

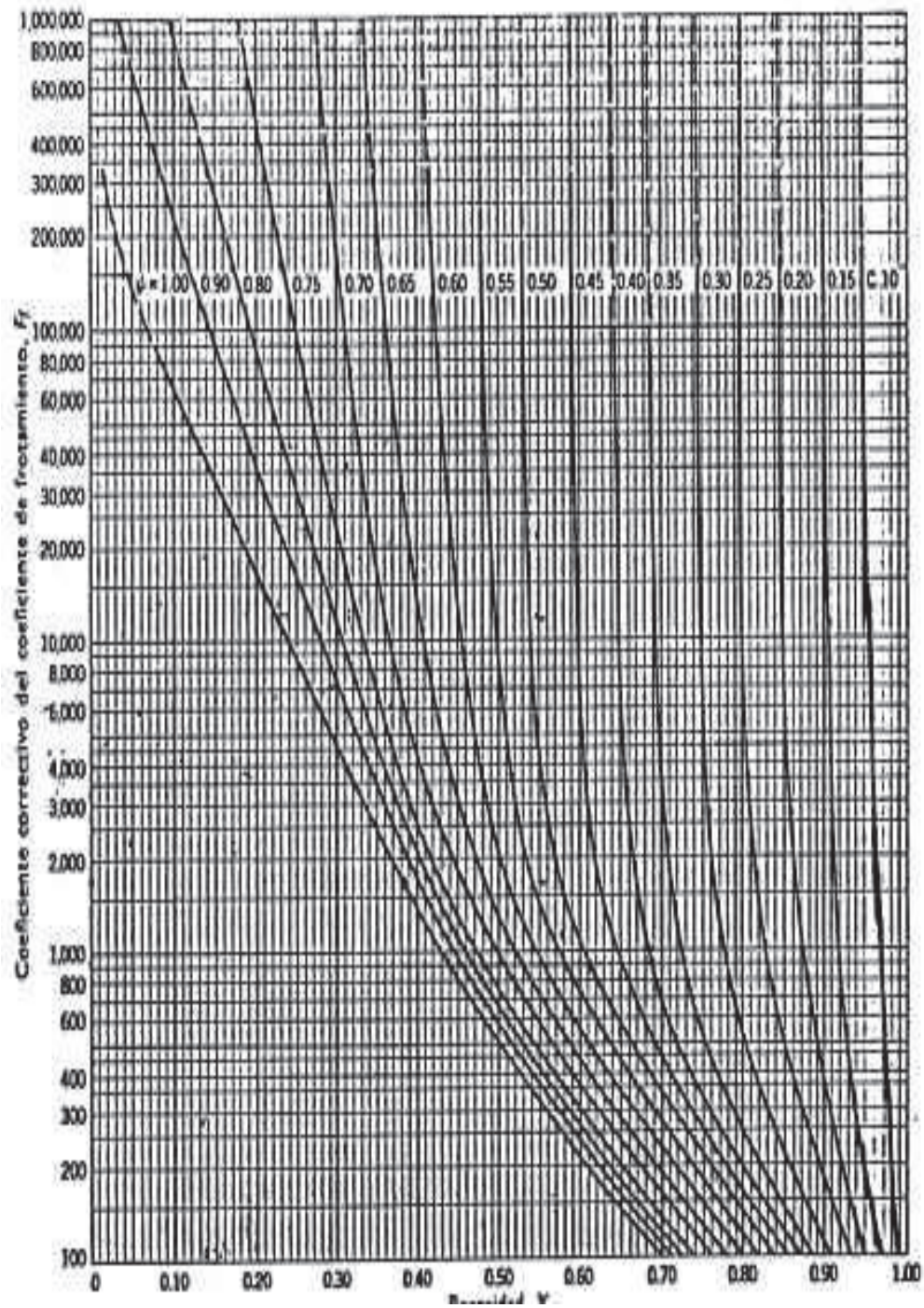


Figura 3.9 Valores del coeficiente correctivo de fricción en función de la porosidad y esfericidad

(Brown, 1955, p. 212)

Cuanto más permeable sea el medio, mayor es la filtración. El tamaño de los poros es de gran importancia con respecto a la tasa de infiltración (movimiento de agua dentro del medio) y a la tasa de percolación (movimiento del agua a través del medio). El tamaño de poro y el número de poros se relacionan estrechamente con la textura y estructura del medio, y también influyen en su permeabilidad.

Para una mejor explicación del valor obtenido de permeabilidad se muestra la Figura 3.10 y la Tabla 3.6.

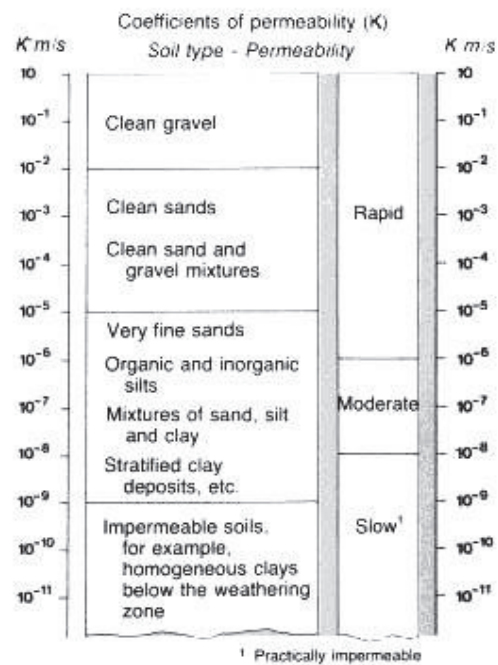


Figura 3.10 Rango de permeabilidad y su relación con el proceso de filtración (FAO, 2011)

Tabla 3.6 Tipos de permeabilidad y valores K

Tipos de permeabilidad	Coeficiente de permeabilidad (K en m/s)	
	Límite bajo	Límite alto
Permeable	2×10^{-7}	2×10^{-1}
Semi-permeable	1×10^{-11}	1×10^{-5}
Impermeable	1×10^{-11}	5×10^{-7}

(FAO, 2011)

El valor de permeabilidad para el caucho molido está en el rango de 10^{-8} considerando lo que muestra la Figura 3.10 para un medio semipermeable y proporciona una filtración moderada por lo que se combina con un lecho de arena fina que presenta mayor permeabilidad con la finalidad de retener los sólidos más finos; y con esta combinación garantizar que la tasa de filtración sea alta y el filtro no se obstruya.

En la Tabla 3.7 se muestra un resumen de los valores determinados:

Tabla 3.7 Caracterización de las partículas de caucho molido entre las mallas 8, 12 y 16

Denominación	Valor
d_{60} (mm)	2,40
d_{10} (mm)	1,10
CU	2,18
ε	0,88
E	0,20
ϕ_p (mm)	0,03
F_{Re}	34
F_f	700
k (m/s)	$2,11 \times 10^{-8}$

3.3.1.5 Filtración a presión constante

Las pruebas de filtración realizadas a escala de laboratorio se ajustan a un proceso de filtración a presión constante, por lo tanto, se desarrolla el tratamiento de datos experimentales ajustando al modelo mencionado.

En la Tabla 3.8 se presenta el tratamiento de los datos experimentales de la filtración de vinaza a través del lecho de caucho molido en sus condiciones óptimas.

Tabla 3.8 Filtración a presión constante para la mejor combinación del lecho: altura 15 cm y granulometría 1,19 mm

Lecho de caucho: granulometría: 1,19 mm y altura: 15 cm					
	V (L)	ΔV (L)	θ (s)	$\Delta\theta$ (s)	$\Delta\theta/\Delta V$
0	0	0,25	0	1,7	6,8
1	0,25	0,25	1,7	1,4	5,6
2	0,5	0,25	3,1	1,4	5,6
3	0,75	0,25	4,5	1,8	7,2
4	1	0,25	6,3	2,8	11,2
5	1,25	0,25	9,1	3,4	13,6
6	1,5	0,25	12,5	4,3	17,2
7	1,75	0,25	16,8	4,5	18,0
8	2	0,25	21,3	5,5	22,0
9	2,25	0,25	26,8	5,4	21,6
10	2,5	0,25	32,2	6,3	25,2
11	2,75	0,25	38,5	6,6	26,4
12	3	0,25	45,1	6,5	26,0
13	3,25	0,25	51,6	7,1	28,4
14	3,5	0,25	58,7	8,0	32,0
15	3,75	0,25	66,7	8,8	35,2
16	4	0,25	75,5	8,8	35,2
17	4,25	0,25	84,3	9,3	37,2
18	4,5	0,25	93,6	10,7	42,8
19	4,75	0,25	104,3	11,2	44,8
20	5	0,25	115,5	11,9	47,6
21	5,25		127,4		

De la Tabla 3.8 se generó las Figura 3.11 y Figura 3.12:

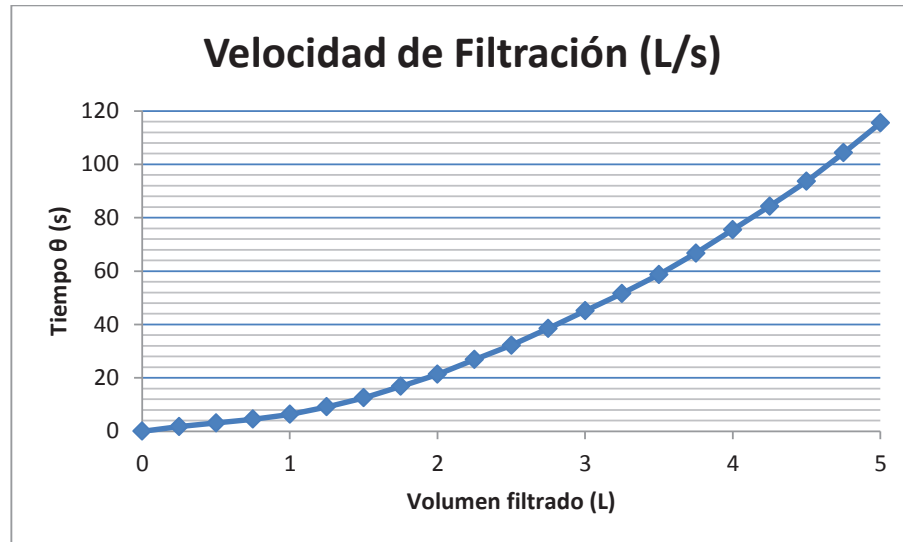


Figura 3.11 Volumen filtrado (L) en función del tiempo empleado (s)

La Figura 3.11 muestra la velocidad de filtración a las condiciones mencionadas altura de 15 cm y granulometría de 1,19 mm; de la gráfica mencionada fácilmente se puede deducir que al aumentar el volumen filtrante va disminuyendo la velocidad de salida del filtrado esto debido a que paulatinamente los sólidos quedan retenidos en la profundidad del lecho y a su vez ocurre la formación de una torta con el material suspendido presente en la vinaza.

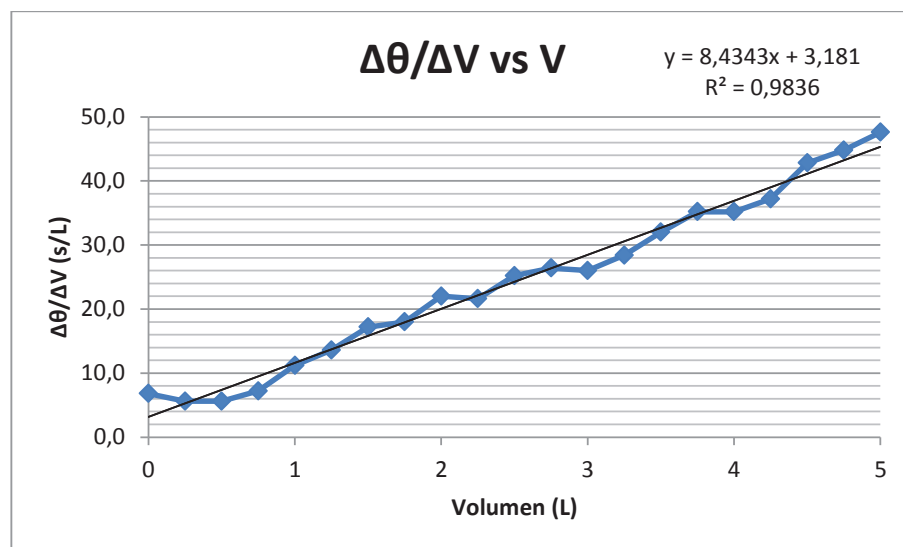


Figura 3.12 Filtración a presión constante para lecho: altura 15 cm y granulometría 1,19 mm

La Figura 3.12 permite la integración de la ecuación de Ergun [1.2] para la filtración a presión constante, y así determinar el volumen filtrado para la formación de torta (V_e) y el volumen total filtrado (V).

Ajustando la curva de la Figura 3.12 a la ecuación [1.25] se tiene:

$$\frac{d\theta}{dV} = k_1V + k_2 = 8,4343V + 3,1810$$

$$k_1 = 8,4343 \text{ (s/L}^2\text{)}$$

$$k_2 = k_1V_e = 3,2273 \text{ (s/L)}$$

$$3,2273 = 8,7745V_e \Rightarrow V_e = 0,368 \text{ (L)}$$

Para determinar el volumen total filtrado se emplea ecuación [1.31]:

$$V = \sqrt{(0,368 \text{ L})^2 + \frac{2(115,5 \text{ s})}{8,4343 \text{ s/L}^2}} - 0,368 \text{ L} \Rightarrow V = 4,878 \text{ (L)}$$

Se realizó otras pruebas para analizar la filtración a presión constante, los resultados se muestran a continuación:

Tabla 3.9 Filtración a presión constante el lecho: altura 15 cm y granulometría 1,68 mm

Lecho de caucho: granulometría: 1,68 mm y altura: 15 cm					
	V (L)	ΔV (L)	θ (s)	$\Delta\theta$ (s)	$\Delta\theta / \Delta V$
0	0	0,25	0	1,5	6,0
1	0,25	0,25	1,5	1,4	5,6
2	0,5	0,25	2,9	1,5	6,0
3	0,75	0,25	4,4	1,9	7,6
4	1	0,25	6,3	2,5	10,0
5	1,25	0,25	8,8	3,1	12,4
6	1,5	0,25	11,9	3,3	13,2

Tabla 3.9 Filtración a presión constante el lecho: altura 15 cm y granulometría 1,68 mm (continuación...)

7	1,75	0,25	15,2	4,4	17,6
8	2	0,25	19,6	5,3	21,2
9	2,25	0,25	24,9	6,4	25,6
10	2,5	0,25	31,3	6,5	26,0
11	2,75	0,25	37,8	6,9	27,6
12	3	0,25	44,7	6,5	26,0
13	3,25	0,25	51,2	7,1	28,4
14	3,5	0,25	58,3	7,8	31,2
15	3,75	0,25	66,1	8,9	35,6
16	4	0,25	75,0	9,6	38,4
17	4,25	0,25	84,6	9,6	38,4
18	4,5	0,25	94,2	9,4	37,6
19	4,75	0,25	103,6	10,0	40,0
20	5	0,25	113,6	10,1	40,4
21	5,25		123,7		

De la Tabla 3.9 se generó las Figura 3.13:

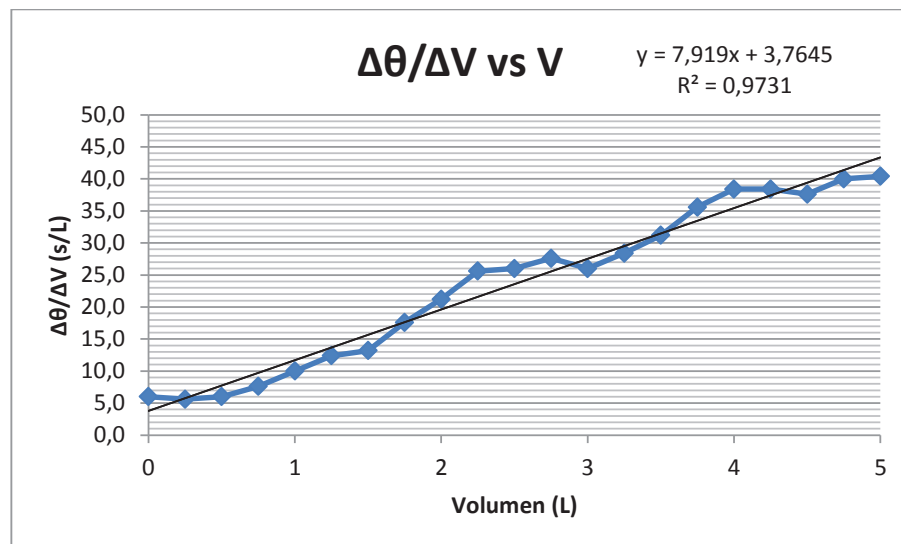


Figura 3.13 Filtración a presión constante para lecho: altura 15 cm y granulometría 1,68 mm

Igual que en la filtración de la mejor combinación se tiene:

$$\frac{d\theta}{dV} = k_1V + k_2 = 7,9190V + 3,7645$$

$$k_1 = 7,9190 \text{ (s/L}^2\text{)}$$

$$k_2 = k_1V_e = 3,7645 \text{ (s/L)}$$

$$3,7645 = 7,9190V_e \Rightarrow V_e = 0,475 \text{ (L)}$$

$$V = \sqrt{(0,475 \text{ L})^2 + \frac{2(113,6 \text{ s})}{7,9190 \text{ s/L}^2}} - 0,475 \text{ L} \Rightarrow V = 4,902 \text{ (L)}$$

Tabla 3.10 Filtración a presión constante el lecho: altura 15 cm y granulometría 2,38 mm

Lecho de caucho: granulometría: 2,38 mm y altura: 15 cm					
	V (L)	ΔV (L)	θ (s)	Δθ (s)	Δθ/ ΔV
0	0	0,25	0	1.5	6.0
1	0,25	0,25	1.5	1.6	6.4
2	0,5	0,25	3.1	1.7	6.8
3	0,75	0,25	4.8	1.7	6.8
4	1	0,25	6.5	2.7	10.8
5	1,25	0,25	9.2	3.1	12.4
6	1,5	0,25	12.3	3.4	13.6
7	1,75	0,25	15.7	3.5	14.0
8	2	0,25	19.2	4.4	17.6
9	2,25	0,25	23.6	5.9	23.6
10	2,5	0,25	29.5	6	24.0
11	2,75	0,25	35.5	6.9	27.6
12	3	0,25	42.4	7.8	31.2
13	3,25	0,25	50.2	7.4	29.6
14	3.5	0,25	57.6	7.6	30.4
15	3,75	0,25	65.2	9.2	36.8
16	4	0,25	74.4	9	36.0
17	4,25	0,25	83.4	8.8	35.2

Tabla 3.10 Filtración a presión constante el lecho: altura 15 cm y granulometría 2,38 mm (continuación...)

18	4.5	0,25	92.2	9.2	36.8
19	4,75	0,25	101.4	10.2	40.8
20	5	0,25	111.6	11	44.0
21	5,25		122.6		

De la Tabla 3.10 se generó las Figura 3.14:

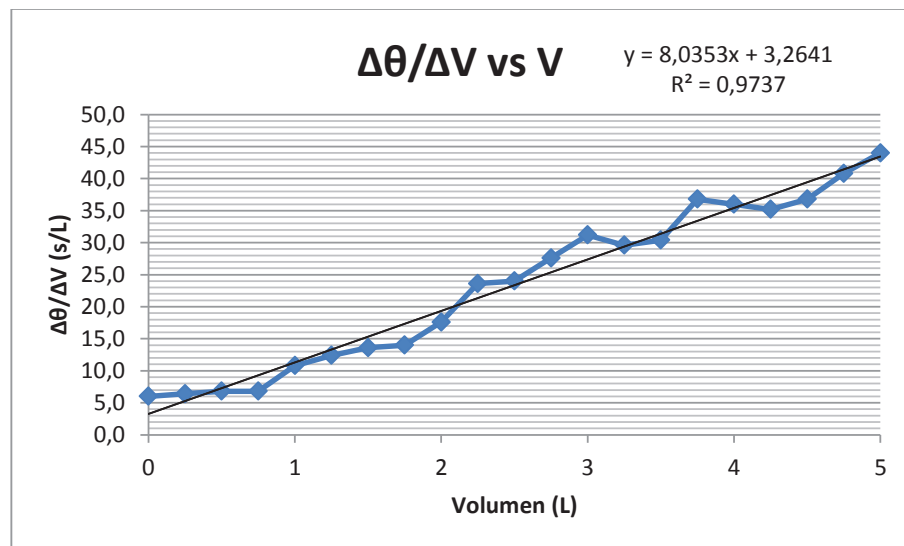


Figura 3.14 Filtración a presión constante para lecho: altura 15 cm y granulometría 2,38 mm

Igual que en la filtración de la mejor combinación se tiene:

$$\frac{d\theta}{dV} = k_1V + k_2 = 8,0353V + 3,2641$$

$$k_1 = 8,0353 \text{ (s/L}^2\text{)}$$

$$k_2 = k_1V_e = 3,2641 \text{ (s/L)}$$

$$3,2641 = 8,0353V_e \Rightarrow V_e = 0,406 \text{ (L)}$$

$$V = \sqrt{(0,406 L)^2 + \frac{2(111,6 s)}{8,0353 s/L^2}} - 0,406 L \Rightarrow V = 4,880 (L)$$

3.3.2 DISEÑO DE UN FILTRO MULTICAPA A ESCALA PILOTO

3.3.2.1 Diseño preliminar

En la Tabla 3.11 se presenta la cantidad de vinaza producida por Sideral S.A.:

Tabla 3.11 Producción de etanol y vinaza por Sideral S.A.

Caudal	ETANOL	VINAZA
L / día	20 000	200 000

A partir de la Tabla 3.11 se obtiene el caudal de vinaza a tratar, como se va a trabajar a escala piloto se toma como referencia el 10 % de todo el volumen de vinaza producida a escala industrial, se decide operar el filtro 8 horas por día.

$$V = 200\,000 \frac{L}{día} * \frac{1\,día}{8\,h} * \frac{1\,m^3}{1\,000\,L} * 0,1$$

$$V = 2,5 \frac{m^3}{h}$$

A partir de la ecuación [2.1], se obtuvo la concentración final de sólidos suspendidos para cada prueba experimental, se determinó porcentaje de remoción para la mejor combinación de los parámetros, los mismos que de acuerdo al análisis estadístico corresponde a 15 cm de altura de lecho y granulometría correspondiente a la malla # 16 (1,19 mm).

El porcentaje de remoción se determinó mediante la siguiente relación:

$$\%_{remoción} = \frac{[SS]_{inicial} - [SS]_{salida}}{[SS]_{inicial}} * 100\% \quad [3.7]$$

En la Tabla 3.12 se muestran los resultados mencionados:

Tabla 3.12 Porcentaje de remoción para la mejor combinación de los parámetros de las variables de entrada

Parámetros	Tratamiento	[SS] _{salida} (mg/L)	Porcentaje de remoción
h = 15 cm Ø = 1,19 mm	1	10,9	97,82
	2	13,8	97,24
	3	11,4	97,72
Promedio		12,0	97,60

Por lo tanto, para desarrollar el balance de masa se considera un porcentaje de remoción equivalente al 97%. Sobre el esquema de la Figura 3.15 se efectúa el balance de masa.

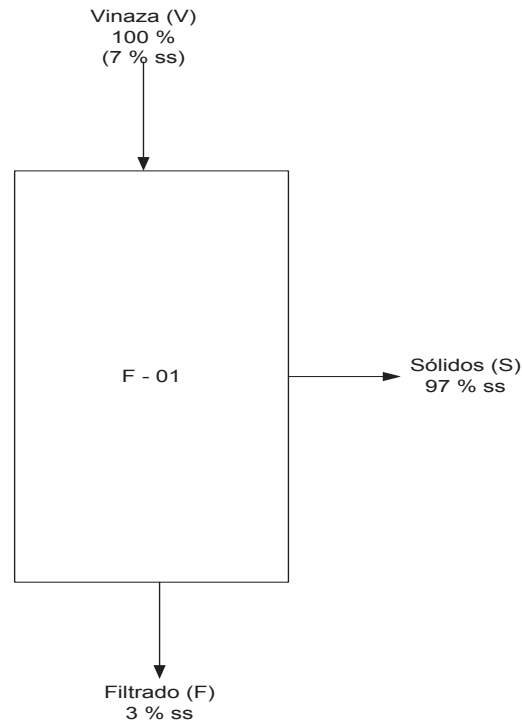


Figura 3.15 Esquema para realizar el balance de masa en el filtro con caucho, considerando el 97% de remoción de sólidos

Realizando un balance de la parte líquida se obtiene el filtrado producido:

$$0,93 * V = 0,97 * F + 0,03 * S \quad [3.8]$$

De un balance global se tiene:

$$V = F + S \quad [3.9]$$

Reemplazando la ecuación [3.9] en la ecuación [3.8] se tiene:

$$0,93 * V = 0,97 * F + 0,03 * (V - F) \quad [3.10]$$

Sustituyendo datos en ecuación [3.10]:

$$0,93 * 2,5 \frac{m^3}{h} = 0,97 * F + 0,03 * \left(2,5 \frac{m^3}{h} - F\right) \Rightarrow F = 2,39 \frac{m^3}{h}$$

De la misma manera se realiza el balance para los sólidos contenidos en la vinaza. Resumiendo se presenta la Tabla 3.13 con los resultados del balance de masa:

Tabla 3.5 Resumen del balance de masa para un 10 % de la producción industria

Corriente	Total	Líquido	Sólido
V ($\frac{m^3}{h}$)	2,5	2,325	0,175
F ($\frac{m^3}{h}$)	2,39	2,325	0,065
S ($\frac{m^3}{h}$)	0,11	-	0,11

3.3.2.2 Determinación del número de filtros

Para un caudal de $2,5 \text{ m}^3/\text{h}$ se determina el número de filtros empleando la ecuación [2.2]:

$$n = \frac{1}{4} \sqrt{2,5} = 0,40$$

Por lo tanto se requiere de un filtro para dicho caudal.

3.3.2.3 Área de filtración y dimensionamiento del filtro

Para el dimensionamiento del filtro multicapa se propone determinar el diámetro, altura total y altura de cada lecho.

Con el caudal obtenido anteriormente se determina el área de filtración mediante la ecuación [6], para una carga superficial de filtración de $300 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \cdot \text{día}$.

$$A_f = \frac{2,5 \frac{\text{m}^3}{h}}{300 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \text{ día}} * \frac{1 \text{ día}}{8 h}} \Rightarrow A_f = 0,07 \text{ m}^2$$

La forma del filtro es cilíndrica, por lo tanto el diámetro se determina mediante la ecuación [2.5].

Reemplazando datos se tiene:

$$0,07 \text{ m}^2 = \frac{\pi}{4} \Phi^2 \Rightarrow \phi = 0,3 \text{ m}$$

Para la determinación de la altura total se considera la altura del lecho de caucho, el agua sobrenadante y el sistema de drenaje grava y arena fina de 2 mm como soporte del caucho.

El sistema de drenaje se considera constituido por un falso fondo de 8 cm en el cual se coloca piedra pómez la misma que sostiene una capa de grava de 4 cm de diámetro con la finalidad de que sostenga al lecho de arena fina, para determinar la altura de la grava se emplea la ecuación [2.6], por lo tanto reemplazando datos se tiene:

$$\frac{L_{grava}}{4_{cm}} \geq 3 \Rightarrow L_{grava} = 12 \text{ cm}$$

Se va a emplear un lecho de caucho molido de tamaño malla # 16 correspondiente a 20 cm y un lecho de 10 cm de arena fina 2 mm.

Finalmente se considera como nivel de agua sobrenadante 0,40 m y 0,05 m adicionales de reserva, siendo en total 0,45 m y 0,05 m de vacío desde el borde para evitar que se desborde el filtro.

La altura total del filtro resulta de la suma de cada una de las alturas mencionadas anteriormente.

$$H = h_{falsofondo} + h_{arenaje} + h_{arena} + h_{caucho} + h_{as}[26]$$

$$H = 0,08 \text{ m} + 0,12 \text{ m} + 0,10 \text{ m} + 0,20 \text{ m} + 0,50 \text{ m} \Rightarrow H = 1,00 \text{ m}$$

En la Tabla 3.14 se presenta el resumen de las dimensiones y parámetros a operar del filtro multicapa.

Tabla 3.14 Características del filtro multicapa caucho-arena

	Valor	Unidad
Número de filtros	1	-
Diámetro	30	cm
Falso fondo	8	cm
Piedra pómez	12	cm
Lecho de arena	10	cm
Lecho de caucho	20	cm
Agua sobrenadante	45	cm
Vacío	5	cm
Altura total	100	cm

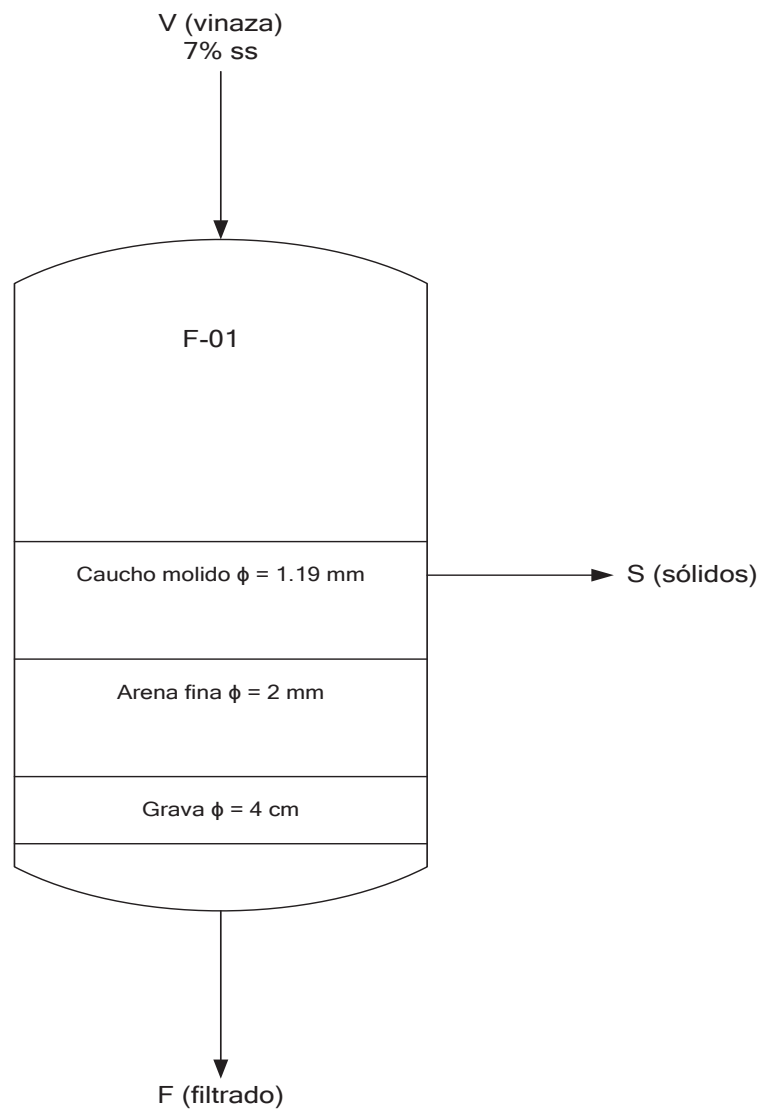


Figura 3.16 Esquema del filtro multicapa caucho-arena

3.3.2.4 Pérdidas de carga a través de los lechos de filtración

Para determinar las pérdidas de carga a través del lecho de caucho y del lecho de arena se emplea la ecuación [2.7].

Por lo tanto reemplazado datos se tiene:

$$v_f = \frac{2,5 \frac{m^3}{h}}{\frac{\pi}{4}(0,3)^2} * \frac{1 h}{3600 s} \Rightarrow v_f = 9,82 \times 10^{-3} \frac{m}{s}$$

3.3.2.4.1 Pérdidas a través del lecho de caucho

La porosidad y esfericidad del material molido son las que se aprecia en la Tabla 3.7.

Por lo tanto la pérdida de carga a través del caucho mediante la ecuación [2.7]:

$$\Delta h_{caucho} = \frac{1}{2} 9,82 \times 10^{-3} * \left(0,20 \frac{6}{1,19}\right)^2 * \frac{(1 - 0,88)^2}{0,88^2} * 0,2$$

$$\Delta h_{caucho} = 1,83 \times 10^{-5} m \cong 0,002 cm$$

3.3.2.4.2 Pérdidas a través del lecho de arena

Para la arena fina de 2 mm se considera como coeficiente de esfericidad y porosidad los valores que corresponden a grano esférico como se muestra en la Tabla 2.13.

Por lo tanto la pérdida de carga a través del lecho de arena según la ecuación [2.7]:

$$\Delta h_{arena} = \frac{1}{2} 9,82 \times 10^{-3} * \left(1,00 \frac{6}{2,00}\right)^2 * \frac{(1 - 0,38)^2}{0,38^2} * 0,1$$

$$\Delta h_{caucho} = 0,012 m \cong 1,18 cm$$

En total la pérdida de carga a través de los dos lechos es:

$$\Delta h_{total} = 0,002 + 1,18 = 1,182 cm$$

3.3.2.5 Soportes para el filtro multicapa

Se diseñó cuatro soportes con la finalidad de elevar al filtro para que no haya inconveniente con las tuberías que salen por la parte inferior del equipo. Los soportes deben soportar el peso del filtro vacío como también el peso del filtro con los lechos y vinaza.

El peso total del filtro es la suma del peso de cada uno de los lechos y del agua sobrenadante.

La Tabla 3.15 muestra las densidades para los lechos y la vinaza.

Tabla 3.15 Densidades de los materiales empleados en el filtro

Material	Densidad (kg/m ³)
Arena	1600
Caucho	950
Agua sobrenadante (vinaza)	1200
Grava	2700

(Perry, 2001, p.2-119)

El peso de arena en una altura de 10 cm es:

$$m_{arena} = V_{arena} * \delta_{arena}$$

V representa el volumen ocupado por la arena y siendo un cilindro este volumen se calcula así:

$$V_{arena} = \frac{\pi}{4} \phi^2 h$$

Reemplazando datos, el peso de arena es:

$$m_{arena} = \frac{\pi}{4} (0,3 \text{ m})^2 (0,1 \text{ m}) * 1600 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \Rightarrow m_{arena} = 11,31 \text{ kg}$$

El peso del caucho que se tiene en una altura de 20 cm es:

$$m_{caucho} = V_{caucho} * \delta_{caucho}$$

Reemplazando la ecuación [3.12] en ecuación [3.13] se tiene:

$$m_{caucho} = \frac{\pi}{4} (0,3 \text{ m})^2 (0,2 \text{ m}) * 950 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \Rightarrow m_{caucho} = 13,43 \text{ kg}$$

Peso de la vinaza que se tiene en una altura de 45 cm es:

$$m_{vinaza} = V_{vinaza} * \delta_{vinaza}$$

Reemplazando se tiene:

$$m_{vinaza} = \frac{\pi}{4} (0,3 \text{ m})^2 (0,45 \text{ m}) * 1200 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \Rightarrow m_{vinaza} = 38,17 \text{ kg}$$

Peso generado por la capa de grava.

$$m_{grava} = V_{grava} * \delta_{grava}$$

Reemplazando datos se tiene:

$$m_{grava} = \frac{\pi}{4} (0,3 \text{ m})^2 (0,12 \text{ m}) * 2700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \Rightarrow m_{grava} = 22,90 \text{ kg}$$

Por lo tanto la masa total del filtro es:

$$M_T = 11,31 + 13,43 + 38,17 + 22,90 = 85,81 \text{ kg}$$

Aproximando, los soportes deben resistir 100 kg.

A continuación se determina la fuerza ejercida por dicha masa mediante la ecuación [2.8]:

$$F = 100 \text{ kg} * 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 980 \text{ N}$$

La presión ejercida por dicha fuerza es:

$$P = \frac{980 \text{ N}}{\frac{\pi}{4}(0,3)^2 \text{m}^2} = 13\,864,16 \text{ Pa}$$

Al utilizar cuatro soportes la fuerza también se divide para cuatro:

$$F_{c/s} = \frac{980}{4} = 245 \text{ N}$$

Para los soportes se va a utilizar barras de Acero A-36.

El acero A-36 tiene un límite de ruptura mínimo de 400 MPa (PRAMSI, 2013, p.1).
Ver ANEXO II.

Para un diámetro de 1 ¼ in (0,032 m) se determina la presión que soporta cada soporte mediante la ecuación [2.9].

$$P_{c/s} = \frac{245 \text{ N}}{\frac{\pi}{4}(0,032)^2 \text{m}^2} = 3,05 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$3,05 \times 10^5 \text{ Pa} < 400 \text{ MPa}$$

Por lo tanto al ser la presión que debe soportar cada base menor al límite mínimo de ruptura se asegura que los soportes van a resistir tranquilamente dicho peso.

Finalmente se fija que los soportes son de 1 ¼ in de diámetro y 10 cm de alto.

3.3.2.6 Retrolavado de filtro multicapa

Con la ecuación [2.14] se determina la velocidad necesaria para el retrolavado del filtro.

$$v_{lavado} = 4 * 9,48 * 10^{-3} \frac{m}{s}$$

$$v_{lavado} = 0,038 \frac{m}{s}$$

Mediante la ecuación [2.15] se determina el caudal teórico requerido para el retrolavado:

$$Q_{teórico} = 0,038 \frac{m}{s} * 0,07 m^2 * \frac{3600 s}{1 h}$$

$$Q_{teórico} = 9,58 \frac{m^3}{h}$$

Para la ecuación [2.16] se considera un porcentaje de expansión para los lechos de caucho y arena de 30%.

$$Q_{lavado} = 9,58 \frac{m^3}{h} + 0,30 * 9,58 \frac{m^3}{h}$$

$$Q_{lavado} = 12,45 \frac{m^3}{h}$$

Tiempo recomendado para lavado de un filtro está entre 5 – 10 minutos, para este caso se toma un tiempo de lavado de 7 minutos, por tanto se requiere del siguiente volumen de agua:

$$V_{lavado} = 12,45 \frac{m^3}{h} * \frac{1 h}{60 min} * 7 min$$

$$V_{lavado} = 1,45 m^3$$

Adicional a conocer el caudal o volumen a emplearse en el retrolavado del filtro es necesario conocer la altura de descarga de lodo producido en el lavado del mismo:

$$H_{lavado} = (1 + 0,30) (0,20 + 0,12 + 0,08 + 0,10)$$

$$H_{lavado} = 0,65 m$$

Aproximando se propone una descarga de los lodos del retrolavado a 0.60 m desde la base del filtro.

En la Figura 3.17 se muestra el PFD del proceso incluido el balance respectivo.

3.3.2.7 Dimensionamiento de los accesorios primarios y secundarios para el funcionamiento del filtro

En todo el proceso se requiere de tres bombas: una para alimentar la vinaza hacia el filtro, otra para descargar el filtrado al tanque de recepción del filtrado y una última para el sistema de retrolavado del filtro.

Para el dimensionamiento de cada bomba se utilizó la ecuación de Bernoulli con las simplificaciones debidas para cada caso, de manera general:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 + H_B = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_f + h_{loc}$$

Donde:

P_1, P_2 : Presión en el punto 1 y 2, Pa

v_1, v_2 : Velocidades en los puntos 1 y 2, m/s

$\gamma = \delta * g$: Peso específico

z_1, z_2 : Posición punto 1 y 2, m

g : Gravedad; 9,8 m/s²

H_B : Altura de bomba, m

h_f : Pérdidas por fricción, m

h_{loc} : Pérdidas localizadas por accesorios, m

Las pérdidas de fricción se determinaron mediante:

$$h_f = f * \frac{L_t}{\phi_t} * \frac{v_i^2}{2g}$$

Donde:

f : Factor de Darcing

L_t : Longitud de la tubería, m

ϕ_t : Diámetro de la tubería, m

v_i : Velocidad a través de la tubería en la posición i, m/s

Para determinar el valor del factor de Darcing se empleó el Diagrama de Moody (ANEXO VI) para lo cual es necesario conocer la relación ϵ / ϕ_t y el número de Reynolds, ϵ representa la rugosidad del material.

$$Re = \frac{v_t * \delta * \phi_t}{\mu}$$

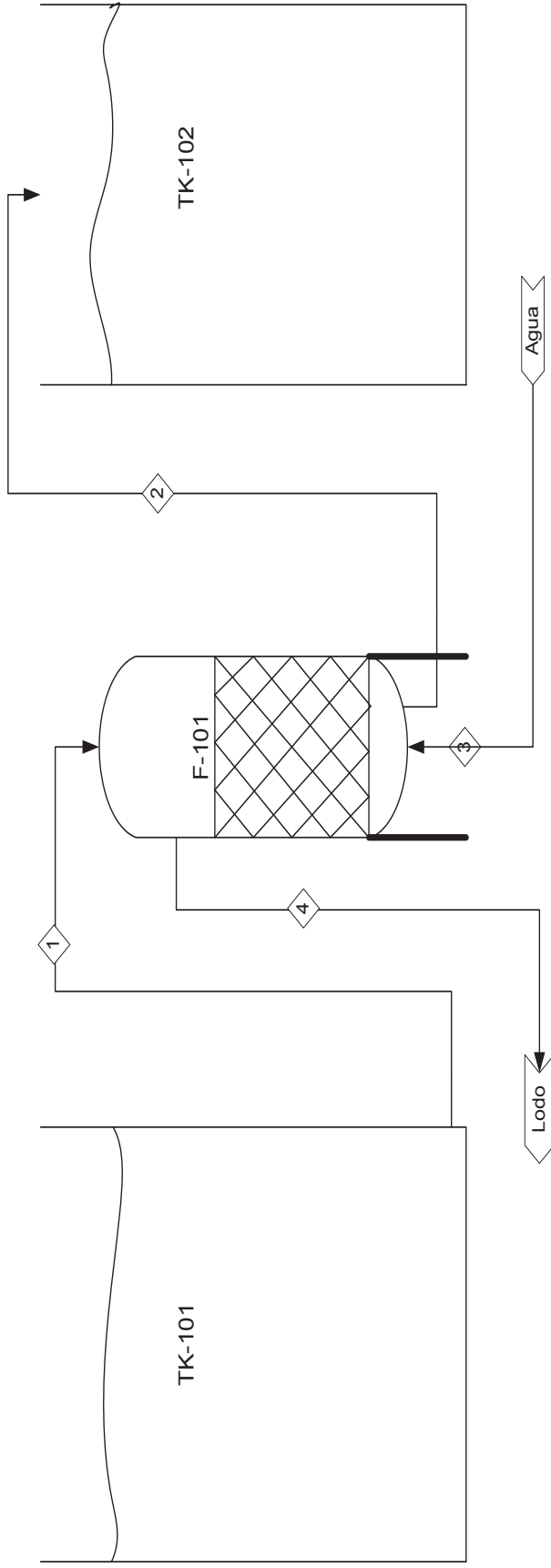
Donde:

Re : Número de Reynold

v_t : Velocidad a través de la tubería, m/s

δ : Densidad del fluido transportado, Kg/m³

μ : Viscosidad del fluido transportado, Kg/m.s



	1	2	3	4
Filtración (m³/h)	2,5	2,39	-	0,11
Retrolavado (m³/h)	-	-	12,45	-

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA	
NOMBRE DEL PROYECTO: Diseño de un filtro multicapa caucho-arena Línea de alimentación, filtración y lavado	
ELABORADO POR: Delgado Ma. Fernanda.	PÁGINAS: 1 de 1 PFD
FECHA: 10 de diciembre de 2015	

Figura 3.17 PFD del proceso de filtración

Las pérdidas localizadas se determinaron empleando la siguiente relación:

$$h_{loc} = K_{accesorios} * \frac{v_i^2}{2g}$$

Los $K_{accesorios}$ se muestran en el Anexo III y son los siguientes (Geankoplis, 1998, p. 107):

$$K_{codo90^\circ} = 0,75$$

$$K_{válvulaabierta} = 0,17$$

$$K_{globo} = 6,0$$

$$K_{entradaconducción} = 0,5$$

Con la altura de bomba encontrada se determinó la energía que se requiere mediante la siguiente relación:

$$E_B = H_B * W$$

Donde:

E_B : Energía de la bomba, W

H_B : Altura de bomba en, m

W : Peso, N

Considerando un rendimiento del 60 % para las bombas se obtuvo la potencia real de la bomba:

$$Pot_{real} = \frac{E_B}{rendimiento}$$

De catálogo se escogió la bomba que se aproxime lo más cercano a la potencia real calculada.

3.3.2.7.1 Bomba para el filtrado

De acuerdo a los datos experimentales obtenidos en laboratorio y como se muestra en la Tabla 19 se tiene una eficiencia del 97 %, es decir el filtrado que se logra luego de la filtración cuenta con un 3 % de sólidos suspendidos respecto al contenido inicial.

Del balance de masa mostrado en la Tabla 3.5 se obtiene 2,39 m³/h de filtrado, para esta capacidad se diseña un tanque de recolección del mismo.

$$V_{filtrado} = 2,39 \frac{m^3}{h} * 8 h \Rightarrow V_{filtrado} = 19,12 m^3$$

Para dicho volumen y considerando $\emptyset = 2h$ se tiene:

$$V_{filtrado} = \frac{\pi}{4} \phi^2 h$$

$$19,12 m^3 = \frac{\pi}{4} 4h^2 h \Rightarrow h = 1,82 m$$

y por lo tanto

$$\phi = 2 * 1,82 m = 3,64 m$$

Redondeando valores se tiene:

$$h = 2 m \text{ y } \phi = 3,5 m$$

En la Figura 3.18 se muestra el esquema sobre el cual se efectúa Bernoulli:

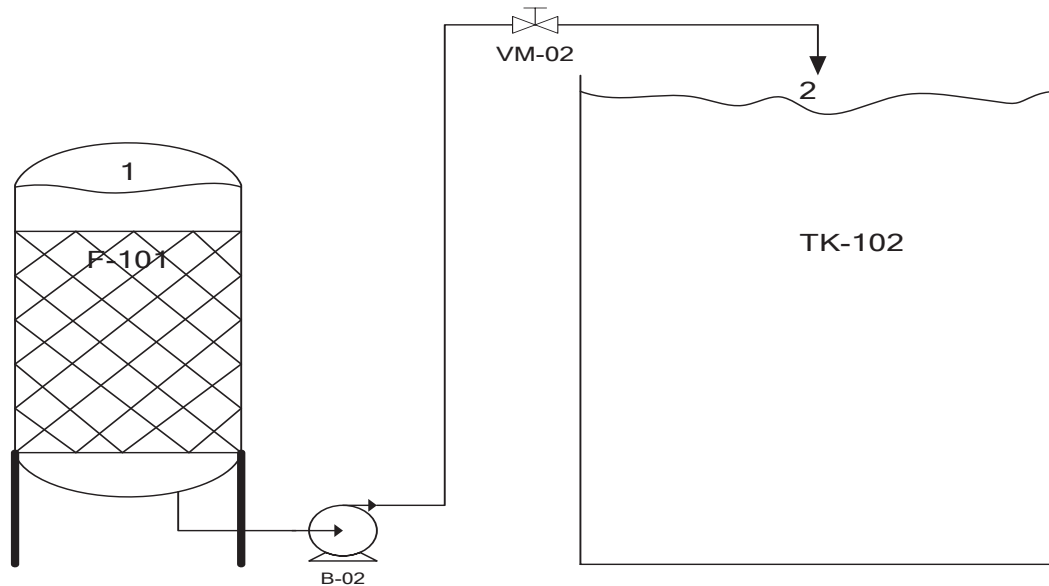


Figura 3.18 Esquema para el dimensionamiento de la bomba B-02

Simplificando la ecuación de Bernoulli entre los puntos 1 y 2 queda:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 + H_B = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2 + h_f + h_{loc}$$

Para poder realizar la determinación de Reynolds se asume una tubería de PVC de 1 in, para la misma que se determina la velocidad, 4 codos de 90° y una válvula de compuerta:

$$v = \frac{2,39 \frac{m^3}{h} * \frac{1 h}{3600 s}}{\frac{\pi}{h} * (0,0254)^2 m^2}$$

$$v = 1,31 \frac{m}{s}$$

Reemplazando datos se procede a determinar el número de Reynolds mediante la ecuación [3.18]:

$$Re = \frac{1,31 \frac{m}{s} * 1000 \frac{kg}{m^3} * 0,0254m}{1x10^{-3} \frac{kg}{m.s}}$$

$$Re = 3,3x10^4$$

De acuerdo al ANEXO VI se obtiene un valor del factor de fricción correspondiente a $f = 0,023$.

Para determinar las pérdidas localizadas se emplea la ecuación [3.19]:

Reemplazando datos se tiene:

$$1,40 + H_B = 2,00 + \left(\frac{1,31^2}{2 * 9,8} \right) \left(0,023 * \frac{2,8}{0,0254} + 4 * 0,75 + 0,17 + 0,5 \right)$$

$$H_B = 1,14 m$$

La energía de bomba para esta altura de acuerdo a la ecuación [3.20] es:

$$E_B = 1,14 m * \left(2,39 \frac{m^3}{h} * \frac{1 h}{3600 s} * \frac{1000 kg}{m^3} \right) * 9,8 \frac{m}{s^2}$$

$$E_B = 7,42 W * \frac{1 HP}{746 W} = 0,01 HP$$

Considerando un rendimiento del 60 % de la bomba se obtiene la potencia real de la bomba mediante la ecuación [3.21]:

$$Pot_{real} = \frac{0,01}{0,6} = 0,016 HP$$

De catálogo la bomba que se encuentra es la equivalente a 1/50 HP.

3.3.2.7.2 Bomba para el retrolavado

A continuación se muestra la dimensión de la bomba que se requiere para realizar esta operación con el caudal antes encontrado de acuerdo a la Figura 3.19.

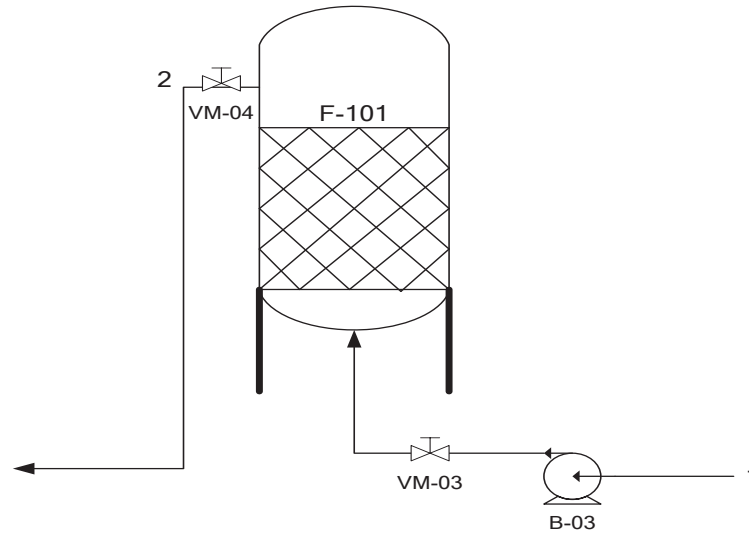


Figura 3.19 Esquema para el dimensionamiento de la bomba B-03

La ecuación de Bernoulli simplificada para este caso es:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 + H_B = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2 + h_f + h_{loc}$$

Para las pérdidas de carga se considera una tubería de PVC de 3 m de longitud, y para las pérdidas localizadas se toma en consideración 1 codos de 90°, 1 válvula abierta y la entrada a conducción.

ε representa la rugosidad del material, la misma que dado el caso del PVC $\varepsilon = 0$

$$v = \frac{12,45 \frac{m^3}{h} * \frac{1 h}{3600 s}}{\frac{\pi}{4} * (0,0254)^2 m^2}$$

$$v = 6,82 \frac{m}{s}$$

Una velocidad correspondiente a $6,82 (m/s)$ se considera alta para el flujo a través de una tubería, por lo tanto, se propone trabajar con una tubería de 2 in de diámetro para disminuir dicha velocidad a través de la misma.

$$v = \frac{12,45 \frac{m^3}{h} * \frac{1 h}{3600 s}}{\frac{\pi}{4} * (0,0508)^2 m^2}$$

$$v = 1,71 \frac{m}{s}$$

Esta velocidad es más fácil de conseguir, por lo que se continúa con los cálculos.

Reemplazando datos se procede a determinar el número de Reynolds:

$$Re = \frac{1,71 \frac{m}{s} * 1000 \frac{kg}{m^3} * 0,0508 m}{1 \times 10^{-3} \frac{kg}{m \cdot s}}$$

$$Re = 8,7 \times 10^4 m/s$$

Con este valor de Reynolds y la intersección en la curva más suave en el Diagrama de Moody (ANEXO VI) se obtiene $f = 0,020$.

Reemplazando todo en la ecuación de Bernoulli se tiene:

$$0 + H_B = 0,80 + \left(\frac{1,71^2}{2 * 9,8} \right) \left(0,020 * \frac{3,0}{0,0508} + 1 * 0,75 + 0,17 + 0,5 \right)$$

$$H_B = 1,88 m$$

Con la altura de bomba encontrada se encuentra la energía que se requiere por:

$$E_B = 1,88 \text{ m} * \left(12,45 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} * \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} * \frac{1000 \text{ kg}}{\text{m}^3} \right) * 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$E_B = 63,72 \text{ W} * \frac{1 \text{ HP}}{746 \text{ W}} = 0,09 \text{ HP}$$

Considerando un rendimiento del 60 % de la bomba se obtiene la potencia real de la bomba según la ecuación [3.21]:

$$Pot_{real} = \frac{0,09}{0,6} = 0,15 \text{ HP}$$

De catálogo la bomba que se encuentra es la equivalente a 1/4 HP.

3.3.2.7.3 Bomba para la vinaza

El diagrama que facilita la dimensión de la bomba para alimentar la vinaza al filtro es la Figura 3.20:

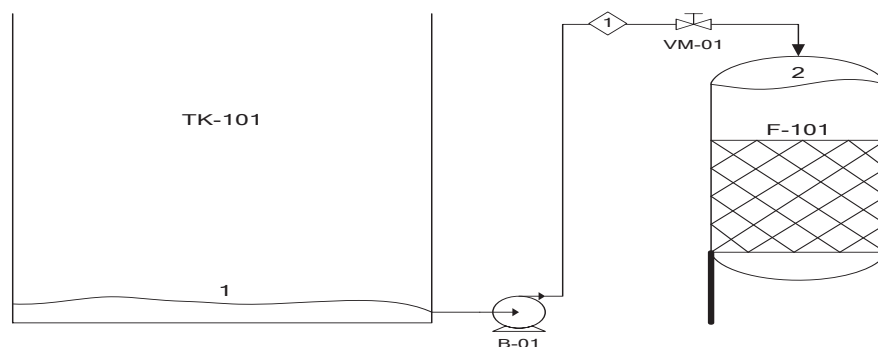


Figura 3.20 Esquema para el dimensionamiento de la bomba B-01

Para las pérdidas de carga se considera una tubería de PVC de 2 m de longitud, y para las pérdidas localizadas se toma en consideración 3 codos de 90°, 1 válvula de compuerta abierta y la entrada a conducción.

Para poder determinar la altura de la bomba se va a suponer el peor de los casos que sería cuando el nivel en el tanque que contiene la vinaza esté lo más vacío según la Figura 3..

Los datos para la vinaza son (Perry, 2001, p. 2-119):

δ : Densidad de la vinaza, 1 200 kg/m³

μ : Viscosidad vinaza 2,5*10⁻³ kg/m.s a 20°C

Para poder realizar la determinación de Reynolds se asume una tubería de 1 1/4 in, para la misma que se determina la velocidad:

$$v = \frac{2,5 \frac{m^3}{h} * \frac{1 h}{3600 s}}{\frac{\pi}{4} * (0,0317)^2 m^2}$$

$$v = 0,88 \frac{m}{s}$$

Reemplazando datos se procede a determinar el número de Reynolds utilizando la relación [3.18]:

$$Re = \frac{0,88 \frac{m}{s} * 1200 \frac{kg}{m^3} * 0,0317 m}{2,5 \times 10^{-3} \frac{kg}{m.s}}$$

$$Re = 1,4 \times 10^4 m/s$$

Con este valor de Reynolds y la intersección en la curva de finos en el Diagrama de Moody se obtiene $f = 0,027$.

En el esquema se observa que dada la ubicación del punto 1 y punto 2 para efectuar Bernoulli las presiones se eliminan dado que P_1 y P_2 representan la presión ambiental.

Simplificando la ecuación de Bernoulli se tiene:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 + H_B = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2 + h_f + h_{loc}$$

Reemplazando datos la altura de bomba es:

$$H_B = 1,35 + \left(\frac{0,88^2}{2 * 9,8} \right) \left(0,027 * \frac{2,0}{0,0317} + 3 * 0,75 + 0,17 + 0,5 \right)$$

$$H_B = 1,53 \text{ m}$$

Con la altura de bomba encontrada se encuentra la energía que se requiere mediante la relación [3.20]:

$$E_B = 1,53 \text{ m} * \left(2,5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} * \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} * \frac{1200 \text{ kg}}{\text{m}^3} \right) * 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$E_B = 12,50 \text{ W} * \frac{1 \text{ HP}}{746 \text{ W}} = 0,017 \text{ HP}$$

Considerando un rendimiento del 60 % de la bomba se obtiene la potencia real de la bomba según ecuación:

$$Pot_{real} = \frac{0,017}{0,6} = 0,028 \text{ HP}$$

De catálogo la bomba que se encuentra es la equivalente a 1/30 HP.

Como se puede observar en cada uno de los casos del dimensionamiento de bombas, estas resultan ser pequeñas debido al caudal y altura que se requiere

para elevar el fluido. En el país no se encuentra este tipo de bombas sin embargo para analizar el costo se ha tomado valores referenciales de estos equipos en otros países.

A continuación se muestra el P&ID del proceso en la Figura 3.21 y en la Tabla 3.16, Tabla 3.17 y Tabla 3.18 se presenta un resumen de los accesorios secundarios.

Tabla 3.16 Resumen de accesorios secundarios

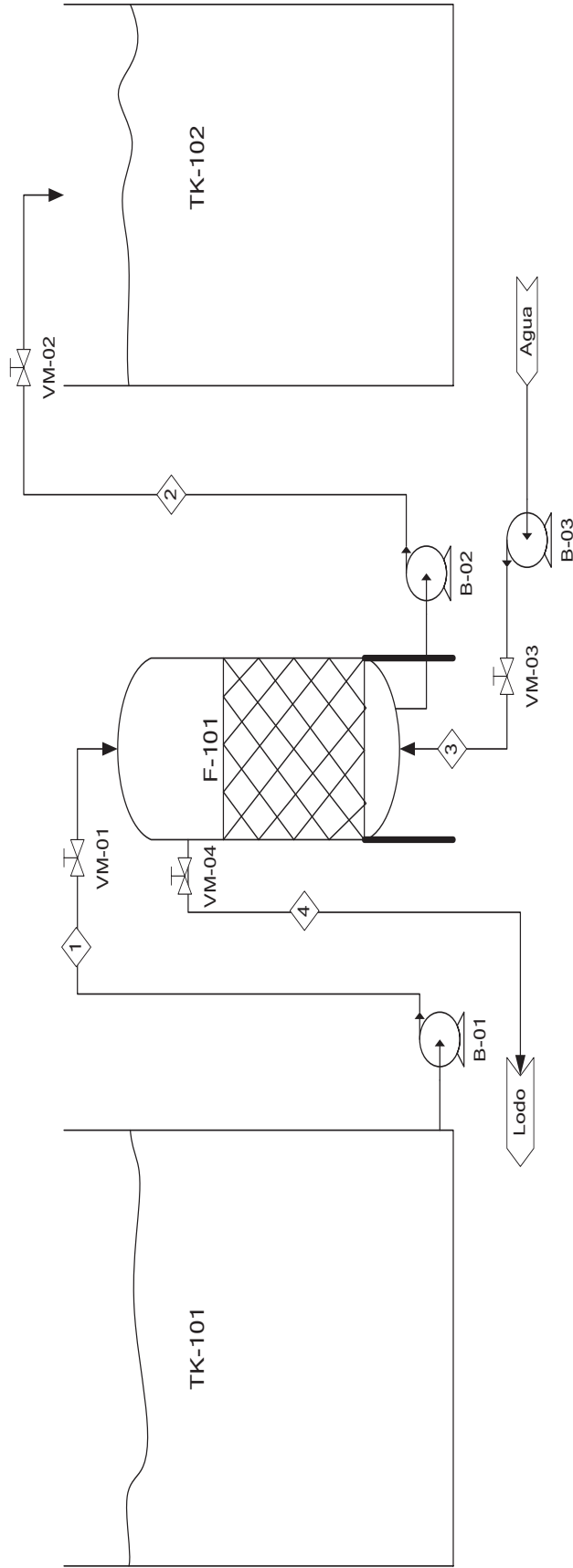
# corriente	nomenclatura línea	Accesorio	Número	D nominal (in)	D interno (in)
1	1 1/4-VI-01-PP SA	codo 90°	3	1 1/4	1,380
2	1-FI-02-PP SA	codo 90°	4	1	1,049
3	2-RE-03-PP SA	codo 90°	2	2	2,067
4	1 1/4-LO-04-PP SA	codo 90°	1	1 1/4	1,380

Tabla 3.17 Resumen de accesorios primarios-válvulas

Nomenclatura	Tipo
VM-01	Compuerta
VM-02	Compuerta
VM-03	Compuerta
VM-04	Compuerta

Tabla 3.18 Resumen de accesorios primarios-bombas

Nomenclatura	Tipo	Diámetro (in)	Flujo de operación (m ³ /h)	Potencia HP
B-01	Centrífuga	1 1/4	2,5	1/30
B-02	Centrífuga	1	2,39	1/50
B-03	Centrífuga	2	12,45	1/4



Corriente	Nomenclatura	Dnominal (in)	Fluido	Material
1	1 1/4-VI-01-PP SA	1 1/4	Vinaza	PP
2	1-FI-02-PP SA	1	Filtrado	PP
3	2-RE-03-PP SA	2	Retrolavado	PP
4	1 1/4-LO-04-PP SA	1 1/4	Lodo	PP

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA	
NOMBRE DEL PROYECTO: Diseño de un filtro multicapa caucho-arena Línea de alimentación, filtración y lavado	
ELABORADO POR: Delgado Ma. Fernanda.	PÁGINAS: 1 de 1 P&ID
FECHA: 10 de diciembre de 2015	

Figura 3.21 P&ID del proceso de filtración

3.4 ANÁLISIS DEL COSTO DEL FILTRO MULTICAPA

Para cumplir con el objetivo propuesto se calcula únicamente el costo del equipo considerando costos fijos de los accesorios como el costo de la obtención del caucho.

3.4.1 COSTO DE OPERACIÓN

3.4.1.1 Costo de obtención de las partículas de caucho molido

En el laboratorio el volumen y masa empleada de caucho molido para las pruebas de filtración considerando un lecho de 15 cm de altura y que la base del filtro es 5 cm se tiene:

$$V_{caucholab} = \pi(2,5 \text{ cm})^2(15 \text{ cm}) = 294,52 \text{ cm}^3 = 0,000294 \text{ m}^3$$

$$m_{caucholab} = \left(950 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}\right) \times 0,000294 \text{ m}^3 = 0,2793 \text{ Kg} = 279,3 \text{ g}$$

A escala piloto considerando que se necesita un lecho de 20 cm de caucho y que la base del filtro es de 30 cm, la masa requerida de caucho es:

$$V_{cauchopiloto} = \pi(15 \text{ cm})^2(20 \text{ cm}) = 14\,137,17 \text{ cm}^3 = 0,0141 \text{ m}^3$$

$$m_{caucholab} = \left(950 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}\right) \times 0,0141 \text{ m}^3 = 13,43 \text{ Kg} = 13\,430 \text{ g}$$

De las pruebas realizadas en el laboratorio se tiene que durante 2 horas de molienda en el molino de cuchillas se obtiene 150 g de caucho comprendido entre las mallas 8, 12 y 16, el molino cuya potencia es 1/3 HP.

El molino de 1/3 HP tiene 4 cuchillas de 5 cm cada una dando un total de 20 cm con el que se logra moler en un tiempo de 2 horas, para un molino de 4 cuchillas de 30 cm cada una se emplearía 20 minutos para la molienda

$$\begin{array}{ll}
 20 \text{ cm cuchillas} & 2 \text{ h} \\
 120 \text{ cm cuchillas g} & X = \left(\frac{20}{120} \times 2 \right) = 0.33 \text{ h} = 20 \text{ min}
 \end{array}$$

A escala piloto se requiere el siguiente molino:

$$\begin{array}{lll}
 1/3 \text{ HP} & 120 \text{ min} & \\
 X & 20 \text{ min} & X = \left(\frac{120}{20} \times \frac{1}{3} \right) = 2 \text{ HP}
 \end{array}$$

Por lo tanto, se empleará un molino de 2 HP cuyo costo es \$ 3 900 en los Estados Unidos.

Considerando un 40 % adicional del precio para el transporte, gasto de aduana e instalación del equipo se tiene un costo aproximado de:

$$Costo_{molino} = \$ 3\,900 \times 1,4 = \$ 5\,400$$

$$2HP \times \frac{746 \text{ W}}{1 \text{ HP}} \times 20 \text{ min} \times \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} \times \frac{1 \text{ KW}}{1000 \text{ w}} = 0,5 \text{ KW} \cdot h$$

Considerando un costo de la energía de \$0,08 el kilovatio se tiene el costo del caucho molido:

$$Costo_{molienda} = 0,5 \text{ KW} \cdot h * \frac{\$ 0,08}{1 \text{ KW} \cdot h} = \$ 0,05$$

3.4.1.2 Costo de agua potable para el retrolavado

El metro cúbico de agua potable tiene un costo de \$0,55 (EPMAPS, 2015)

De acuerdo al estudio realizado se requiere para lavar el filtro 12,45 m³ de agua, por lo tanto el costo del lavado es:

$$\text{Costo}_{\text{caucho}} = 0,55 \frac{\$}{\text{m}^3} * 12,45\text{m}^3 = \$ 6,85$$

Recordar que el lavado se realizará por un tiempo aproximado de 7 minutos.

3.4.2 COSTO DIRECTO DE ACCESORIOS PRIMARIOS Y SECUNDARIOS

La Tabla 3.19 muestra un resumen de los costos de los accesorios útiles para el filtro multicapa caucho-arena.

Tabla 3.19 Costos directos para la implementación del filtro multicapa caucho-arena

Designación	Unidades	Valor Unitario (\$)	Valor Total (\$)
Tubería 1" PVC (\$/m)	2,80 m	3,75	10,50
Tubería 2" PVC (\$/m)	3,00 m	7,45	22,35
Tubería 1 1/4" PVC (\$/m)	3,00 m	4,50	13,50
Codo 1" PP	4	1,46	5,84
Codo 2" PP	1	5,26	5,26
Codo 1 1/4" PP	5	2,75	13,75
Válvula compuerta 2" PP	1	11,36	11,36
Válvula compuerta 1" PP	1	5,71	5,71
Válvula compuerta 1 1/4" PP	1	10,51	10,51
Filtro	1	50,00	50,00
Caucho		3,58	3,58
Bomba 1/4	1	96,60	96,60
Bomba 1/50	1	42,98	42,98
Bomba 1/30	1	57,46	57,46
		TOTAL	349,50

(Comercial Kywi S.A, 2015)

Como se aprecia en los cálculos presentados, el costo de molienda resulta insignificativo respecto a lo que involucra el costo de adquisición del molino y los costos directos para la implementación del mismo.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

- Es posible la reducción de tamaño del caucho a granulometrías adecuadas empleando un molino de cuchillas para utilizar el caucho como lecho de un filtro a escala piloto. El caucho sustituye la arena filtrante que se emplea en los filtros convencionales pero se conserva el diseño usual de los filtros de arena.
- Mediante las pruebas experimentales por medio del filtro propuesto se concluyó que al trabajar a la mayor altura del lecho de caucho y con la menor granulometría, correspondientes respectivamente a 15 cm y a la malla # 16 (1,19 mm) se consiguió la mayor remoción de sólidos suspendidos equivalente al 97 %.
- El caucho presenta un valor de permeabilidad en el orden de 10^{-8} lo que significa que se trata de un medio semipermeable y en consecuencia proporciona una filtración moderada.
- La porosidad de las partículas de caucho molido es de 0.88. Con este dato se deduce que se trata de un medio de porosidad alta, facilitando el paso del efluente y disminuyendo la posibilidad de saturación del lecho.
- Del análisis estadístico de las variables de diseño se concluye que tanto la altura de lecho como la granulometría del mismo influyen separadamente en la eficiencia de la filtración, pero no se presentó influencia de la interacción entre ambos factores.
- Del análisis económico, se aprecia que en comparación al costo de los accesorios para la implementación del filtro, la obtención de caucho molido

no constituye un factor limitante y por lo tanto puede ser competitivo con filtros convencionales.

- El procedimiento empleado en el desarrollo experimental del presente trabajo es factible para todo tipo de neumático ya que todos contienen como constituyente principal caucho. Para residuos de neumáticos que contengan una parte metálica, antes de emplear el caucho como medio de filtración, se debe emplear un sistema de separación magnética.
- Prácticamente, los lechos porosos presentan una resistencia constante al flujo, los sólidos suspendidos son retenidos por el lecho lo que ocasiona que la resistencia al flujo aumente progresivamente, conforme se acumulan los sólidos sobre el lecho, ocasionando que el caudal del fluido a través del lecho disminuya a temperatura y diferencia de presión constantes.
- Con base en este estudio se infiere que el uso de caucho como medio de filtración representa una buena alternativa para minimizar los desechos de neumáticos.

4.2 RECOMENDACIONES

- Retirar previamente antes de la molienda la estructura metálica de los neumáticos en caso de existir, con la finalidad de evitar el desgaste prematuro de las cuchillas del molino.
- El proceso de obtención del caucho en tamaños adecuados para ser utilizado como lecho de filtración se probó varios mecanismos de reducción de tamaño presentándose dificultades por lo que para producción industrial habría que hacer estudios para encontrar el método más eficiente.
- Estudiar el desempeño del filtro en el tratamiento de otro tipo de efluentes.

- Para la utilización efectiva del caucho molido se requiere determinar otras aplicaciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ACS Medio Ambiente. (2012). *Filtro de arena de retrolavado continuo*. Recuperado de <http://www.acsmedioambiente.com/filtroarena.html> (Julio, 2013)
2. American Institute of Steel Construction. (1986). *Steel Construction Manual*. (8va ed.). Boston, Estados Unidos: AISC.
3. American Public Health Association. (1999). *Standard Methods for the examination of water and wastewater: Total Suspended Solids Dried at 103 – 105 °C*. Recuperado de <http://www.umass.edu/tei/mwwwp/acrobat/sm2540Dsuspendedsolids.PDF> (Agosto, 2013)
4. Araujo, N. (1995). *Proyecto Hidráulico para la Ampliación en la Capacidad de Tratamiento de la Planta Potabilizadora No. 1 del Municipio de H. Matamoros, Tamps.* (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Master en Ciencias con Especialidad en Ingeniería Ambiental). Universidad Autónoma de Nuevo León, Matamoros, México.
5. Arboleda, J. (1981). *Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua*. (2da edición). Madrid, España: CEPIS.
6. Barrientos, H. (2009). *Purificación de agua por medio de filtros lentos de arena en la comunidad de Kuichiro-Cusco*. Recuperado de <http://perusolar.org/16spesponencias/PURIFICACION%20DE%20AGUA%20POR%20MEDIO%20DE%20FILTROS%20LENTOS%20DE%20ARENA%20EN%20LA%20COMUNIDAD%20DE%20KUYCHIRO.pdf> (Julio, 2013)
7. Benítez, K., Mieles, J. y Mendieta, F. (2010). *Instalación de una planta de alcohol etílico a partir del jugo de caña*. Recuperado de http://www.espae.espol.edu.ec/images/documentos/Planes_De_Negocio/

2008/intalacion_de_una_planta_de_alcohol_etilico_a_partir_del_jugo_de_ca%C3%B1a.pdf (Octubre, 2013)

8. Brown, G. (1955). *Operaciones Básicas de la Ingeniería Química*. Barcelona, España: Manuel Marín.
9. Cánepa, L. (2010). *Filtración lenta como proceso de desinfección*. Recuperado de <http://www.itacanet.org/esp/agua/Seccion%206%20Tratamiento%20de%20agua/introduccionfiltracionarena.pdf> (Agosto, 2013)
10. Castells, X. (2012). *Reciclaje de residuos industriales: Residuos sólidos urbanos*. (1ra edición). Barcelona, España: Díaz de Santos.
11. Chen, P. (2004). *Ballast water treatment using crumb rubber filtration*. Recuperado de http://water.usgs.gov/wrri/02-03grants_new/prog-compl-reports/2003PA11B.pdf (Septiembre, 2013)
12. Degremont. (1979). *Manual Técnico del Agua*. (4ta edición). Bilbao, España: Degremont S.A.
13. Di Bernardo, L. (2009). *Filtración*. Recuperado de http://www.bvcooperacion.pe/biblioteca/bitstream/123456789/3938/2/BVCI0003303_6.pdf (Septiembre, 2013)
14. EPMAPS. (2014). *Tarifas vigentes en el Distrito Metropolitano de Quito*. Recuperado de <http://www.aguaquito.gob.ec/sites/default/files/documentos/pliegotarifariovigentemayo2008.pdf> (Enero, 2014)
15. FAO. (2011). *Soil permeability*. Recuperado de ftp://ftp.fao.org/fi/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706e/x6706e09.htm (Diciembre, 2014)

16. Geankoplis, C.J. (1998). *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. (3ra ed.). México D.F., México: Compañía Editorial Continental.
17. Glynn, J. y Heynke, G. (1999). *Ingeniería Ambiental*. (2da edición). México, México D.F: Prentice Hall Hispanoamericana S.A.
18. Gómez, J. (1996). *Efecto de la aplicación de vinaza en la producción y calidad de la caña de azúcar*. Recuperado de http://sian.inia.gob.ve/repositorio/revistas_ci/canadeazucar/cana1401/texto/efecto.htm (Octubre, 2013)
19. Gordon, R. (1972). *Conceptos modernos en la filtración de agua*. Recuperado de <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan/02554-conceptos.pdf> (Junio, 2013)
20. GuntHamburg. (2010). *Conocimientos básicos de filtración*. Recuperado de http://www.gunt.de/download/filtration_water_spanish.pdf (Agosto, 2013)
21. Higuera, O., Arroyave, J. y Florez, L. (2008). *Diseño de un biofiltro para reducir el índice de cromo generado en las industrias del curtido de cueros*. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/496/49612068001.pdf> (Julio, 2013)
22. Maldonado, V. (2005). *Filtración*. Recuperado de <http://cdam.minam.gob.pe:8080/bitstream/123456789/109/11/CDAM0000012-10.pdf> (Julio, 2013)
23. Martín, I., Salcedo, R. y Font, R. (2011). *Operaciones separación sólido-fluido*. Recuperado de http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/20299/11/tema5_operaciones%20separacion.pdf (Julio, 2013)

24. McCabe, W., Smith, J. y Harriott, P. (1991). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. (4ta edición). Madrid, España: McGraw-Hill.
25. NationalEnvironmentalServices Center. (2009). *Filtración lenta con arena*. Recuperado de http://www.nesc.wvu.edu/pdf/dw/publications/ontap/2009_tb/spanish/slow_sand_filtration_DWFSOM143.pdf (Julio, 2013)
26. Ondrey, G. (2006). Tires filter wastewater. *Chemical Engineering*. 2006. 13-15
27. Ondrey, G. (2011). Tires filter wastewater. *Chemical Engineering*. 2011. 17-18
28. Park, J., Ellis, T. y Lally, M. (2006). *Evaluation of tire derived rubber particles for biofiltration media*. Recuperado de <http://www.environmental-expert.com/Files/5306/articles/11538/257.pdf> (Septiembre, 2013)
29. Perera, J. (2009). *Concentración y combustión de vinazas*. Recuperado de <http://www.tucuman.gov.ar/variados/docs/ConcentracionYCombustionDeVinazas.pdf> (Octubre, 2013)
30. Pérez, J. (2006). *Avances en filtración*. Recuperado de <http://www.ingenieroambiental.com/4014/07926-16.pdf> (Julio, 2013)
31. Perry, H. (2001). *Manual del Ingeniero Químico*. (4ta edición en español). Madrid, España: Mc Graw Hill.
32. Peters, M., Timmerhaus, K. y West, R. (2003). *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*. (5ta edición). New York: McGraw-Hill. Recuperado de <https://drive.google.com/folderview?id=0Bwk1H4vZW1FkR2pTbzVvZIk5N3c&usp=sharing>
33. PRAMSI. (2013). *Aceros Comerciales*. Recuperado de <http://www.acerospramsi.com/aceros-comerciales.html> (Diciembre, 2013)

- 34.** Rocha, E. (2008). *Sistemas alternos de tratamiento de aguas residuales*. Recuperado de <http://www.oocities.org/edrochac/residuales/sistemasalternos6.pdf> (Febrero, 2013)
- 35.** Tang, Z., Butkus, M. y Xie, Y. (2006). Crumb rubber filtration: A potential technology for ballast water treatment. *Marine Environmental Research*, 61(4), 410-423. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.marenvres.2005.06.003> (Septiembre, 2013)
- 36.** Toala, G., Astudillo, I. y Tobalina, C. (2008). *Proyecto de implementación de una planta productora de etanol en base a la caña de azúcar en la Península de Santa Elena, Provincia del Guayas*. Recuperado de <http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/1463/1/2937.pdf> (Octubre, 2013)
- 37.** United States Environmental Protection Agency. (1999). *Folleto informativo de tecnología de aguas residuales: Filtros intermitentes de arena*. Recuperado de http://water.epa.gov/aboutow/owm/upload/2004_07_07_septics_septic_fs_intermittent_sp.pdf (Julio, 2013)

ANEXOS

ANEXO I

ABERTURA DE TAMICES

Figura AI.1 Tabla de abertura de tamices

ASTM	Sieve Opening		$d_{i-1}=d_i/(2^{0.25})$
	(in)	(mm)	(in)
4	0.187	4.76	
5	0.157	4	0.15724763
6	0.132	3.36	0.132020737
7	0.111	2.83	0.110998327
8	0.0937	2.38	0.093339502
10	0.0787	2	0.078791994
12	0.0661	1.68	0.066178548
14	0.0555	1.41	0.055583253
16	0.0469	1.19	0.046669751
18	0.0394	1	0.039438042
20	0.0331	0.84	0.033131319
25	0.028	0.71	0.027833671
30	0.0232	0.589	0.0235451
35	0.0197	0.5	0.019508797
40	0.0165	0.42	0.016565659
45	0.0138	0.351	0.013874791
50	0.0117	0.297	0.011604371
60	0.0098	0.25	0.009838488
70	0.0083	0.21	0.008240785
80	0.007	0.177	0.00697944
100	0.0059	0.149	0.005886275
120	0.0049	0.124	0.004961289
140	0.0041	0.104	0.004120392
170	0.0035	0.088	0.003447675
200	0.0029	0.074	0.002943137

ANEXO II

CARACTERÍSTICAS DEL ACERO A-36



Aceros Comerciales

GALVANIZADOS

1010

A-36

El **acero A36** es una aleación de acero al carbono de propósito general muy comúnmente usado en los Estados Unidos, aunque existen muchos otros aceros, superiores en resistencia, cuya demanda está creciendo rápidamente.

Como la mayoría de los aceros, el A36, tiene una densidad de 7850 kg/m³ (0.28 lb/in³). El acero A36 en barras, planchas y perfiles estructurales con espesores menores de 8 plg (203,2 mm) tiene un límite de fluencia mínimo de 250 MPA (36 ksi), y un límite de rotura mínimo de 410 MPA (58 ksi). Las planchas con espesores mayores de 8 plg (203,2 mm) tienen un límite de fluencia mínimo de 220 MPA (32 ksi), y el mismo límite de rotura.

PRESENTACIONES : ANGULO, SOLERA, REDONDO, CUADRADO, CANAL, VIGA, PTR, MONTEN, TUBERIA EN GENERAL, LAMINA, PLACA ANTIDERRAPANTE Y LISA, LAMINA NEGRA Y GALVANIZADA.

ANEXO III

PÉRDIDAS POR FRICCIÓN DE ACCESORIOS

Figura AIII.1 Tabla de pérdidas por fricción de accesorios

<i>Tipo de accesorio o válvula</i>	<i>Pérdida por fricción, número de cargas de velocidad K_f</i>	<i>Pérdida por fricción, longitud equivalente de tubería recta en diámetros de tubería L_e/D</i>
Codo, 45°	0.35	17
Codo, 90°	0.75	35
Te	1	50
Retorno en U	1.5	75
Manguitos de acoplamiento	0.04	2
Manguitos de unión	0.04	2
Válvulas de compuerta		
Abiertas	0.17	9
Semiabiertas	4.5	225
Válvulas de globo		
Abiertas	6.0	300
Semiabiertas	9.5	475
Válvulas de ángulo, abiertas	2.0	100
Válvula de retención		
De bola	70.0	3500
De bisagra	2.0	100
Medidor de flujo	7.0	350

(Geankoplis, 1998, p. 107)

ANEXO IV

COMPARACIÓN ENTRE DIFERENTES TIPOS DE FILTROS

Figura AIV.1 Tabla de comparación entre diferentes tipos de filtros

CARACTERÍSTICAS	FILTRO RÁPIDO CON LECHO MIXTO (Arena y arcilla)			FILTRO RÁPIDO CON LECHO DE ARENA			FILTRO LENTO CON LECHO DE ARENA					
	m ³ /m ² /día	235.0	350.0	500.0	m ³ /m ² /día	87.50	117.50	157.00	m ³ /m ² /día	7.00	9.33	14.00
Tasa o carga superficial de filtración	l/seg/m ²	2.72	4.05	6.87	l/seg/m ²	1.01	1.36	2.03	l/seg/m ²	0.081	0.08	0.162
Velocidad de filtración	cm/seg	0.272	0.405	0.683	cm/seg	0.101	0.136	0.203	cm/seg	0.0081	0.0108	0.0162
Profundidad del lecho filtrante	30 - 45 cms de grava 45 - 60 cms de arcilla 15 - 30 cms de arena			30 - 45 cms de grava 60 - 75 cms de arena			30 cms de grava 90 - 110 cms de arena					
Dotaje	Falsos fondos o similares			Tuberías metálicas perforadas o placas porosas, falsos fondos, etc.			Tuberías perforadas de gris o cemento					
Lavado	Invertiendo el flujo con agua proveniente de un tanque elevado o una bomba. Velocidad de lavado: 0.60 - 1.00 mts/min ó 0.60 - 1.00 m ³ /m ² /min.			Invertiendo el flujo a presión con agua proveniente de un tanque de lavado o una bomba. Velocidad de lavado: 0.80-1.20 mts/min ó 0.80 - 1.2 m ³ /m ² /min.			Bajando la superficie de la arena.					
Pérdida de carga	De 20 cms hasta 2.70 cms máximo			De 30 cms hasta 2.70 cms máximo			De 16 cms hasta 1.20 cms máximo					
Tiempo entre limpiezas	12 - 48 horas			24 - 48 - 72 horas			30 - 30 - 60 días					
Penetración del flujo	Profunda			5 cms superiores (mayor cantidad)			Superficial					
Cantidad de agua usada en el lavado	1 - 3 % del agua filtrada			1 - 6 % del agua filtrada			0.2 - 0.6 % del agua filtrada					
Tratamiento previo del agua	Coagulación, floculación y sedimentación			Coagulación, floculación y sedimentación			Ninguno o aireación (para vez floculación y sedimentación).					
Costo de construcción	Más bajo que el de los filtros rápidos de arena			Más bajo que el de los filtros lentos			Alto					
Costo de operación	Igual al de los filtros rápidos de arena			Más alto que el de los filtros lentos			Bajo					
Área ocupada por los filtros	1/2 a 1/5 de la de los filtros rápidos de arena						Más grande que la de los filtros rápidos de arena (Aprox. 12 veces mayor)					

ANEXO V

DENSIDAD DE SÓLIDOS

Figura AV.1 Tabla de densidades de materiales sólidos

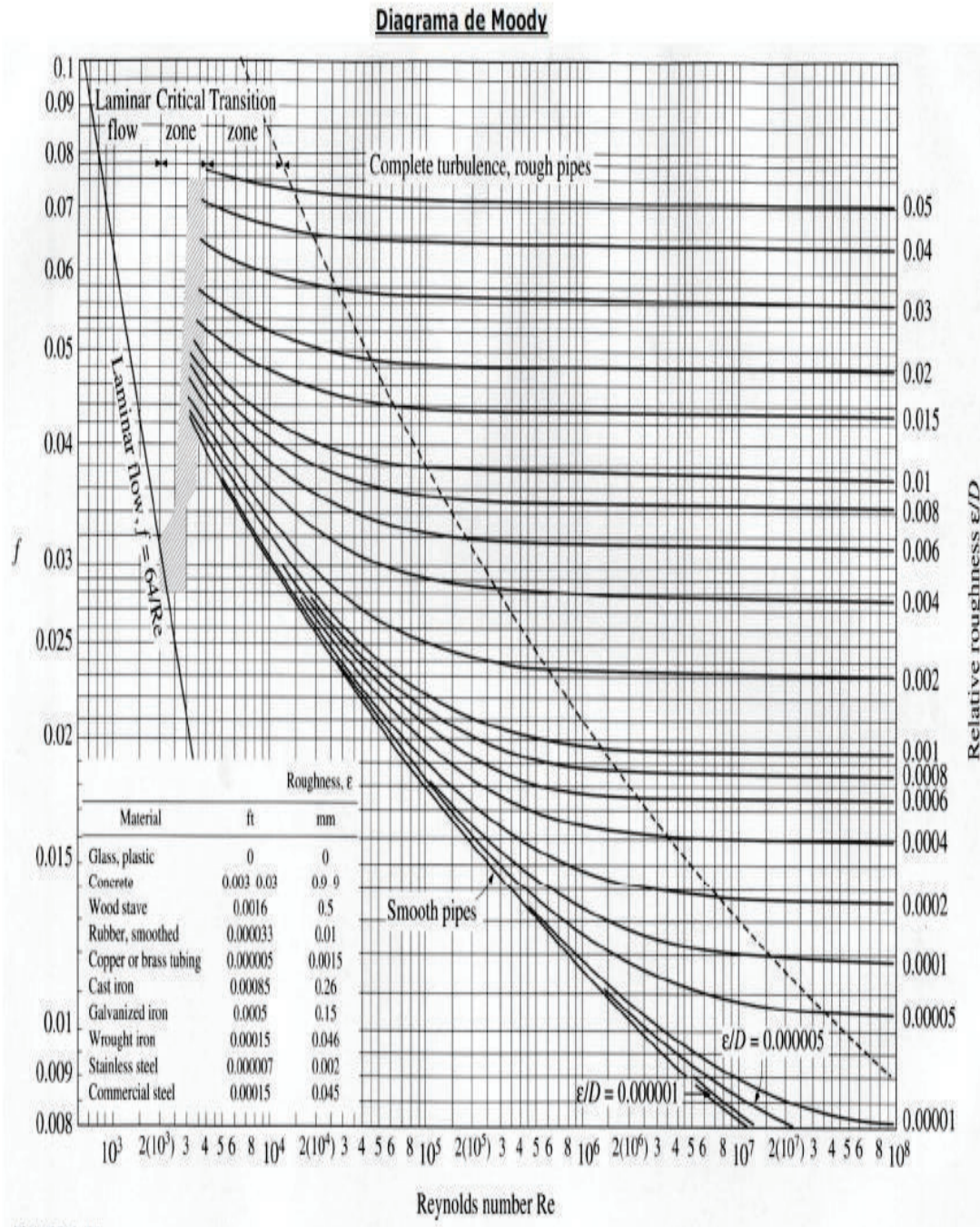
Substance	Sp. gr.	Aver. weight lb/ft ³
Various Solids		
Cereals, oats, bulk	0.51	26
barley, bulk	0.62	39
corn, rye, bulk	0.73	45
wheat, bulk	0.77	48
Cork	0.22–0.26	15
Cotton, flax, hemp	1.47–1.50	93
Fats	0.90–0.97	58
Flour, loose	0.40–0.50	28
pressed	0.70–0.80	47
Glass, common	2.40–2.80	162
plate or crown	2.45–2.72	161
crystal	2.90–3.00	184
dint	3.2–4.7	247
Hay and straw, bales	0.32	20
Leather	0.86–1.02	59
Paper	0.70–1.15	58
Potatoes, piled	0.67	44
Rubber, caoutchouc	0.92–0.96	59
goods	1.0–2.0	94
Salt, granulated, piled	0.77	48

(Perry, 2001, p. 2-119)

ANEXO VI

DIAGRAMA DE MOODY

Figura AVI.1 Diagrama de Moody



ANEXO VII

MÉTODO ESTÁNDAR PARA EL ANÁLISIS DE AGUA Y AGUAS RESIDUALES (APHA)

2540. SÓLIDOS

2540 A. Introducción

Los sólidos se refieren a las materias en suspensión o disueltas en el agua o aguas residuales. Los sólidos pueden afectar negativamente la calidad del agua o del efluente en varias maneras. Aguas con alto contenido de sólidos disueltos son generalmente de palatabilidad inferior y pueden inducir una reacción fisiológica desfavorable en el consumidor. Por estas razones, es deseable un límite de 500 mg de sólidos disueltos / L en agua para beber. Aguas altamente mineralizadas son adecuadas para aplicaciones industriales. Los análisis de sólidos son importantes donde se aplique tratamientos biológicos y físicos de aguas residuales y constituyen una herramienta para evaluar el cumplimiento de las normas de efluentes de acuerdo a un organismo regulador.

1. Definiciones

"Sólidos totales" es el término aplicado a los residuos de material que quedan en un recipiente después de la evaporación de una muestra y su posterior secado en un horno a una temperatura definida. Incluye a los "sólidos suspendidos totales", es decir la porción del total de los sólidos retenidos por un filtro , y a los "sólidos disueltos totales" que son la porción que pasa a través del filtro .

El tipo de soporte de filtro, el tamaño de poro, la porosidad, área , grosor del filtro y naturaleza física, tamaño de partícula y la cantidad de material depositado en el filtro son los principales factores que afectan a la separación de la suspensión de sólidos disueltos.

Los sólidos disueltos son la porción de sólidos que pasa a través de un filtro de tamaño de poro nominal igual a 2,0 micras (o menor) bajo condiciones especificadas. Los sólidos en suspensión son la parte retenida en el filtro.

"Sólido fijo" es el término aplicado al residuo de sólidos totales, suspendidos o disueltos después del calentamiento a sequedad por un tiempo determinado a una temperatura específica. Cuando la pérdida de peso es por ignición se denomina "sólido volátil". Las determinaciones de los sólidos fijos y volátiles no distinguen con precisión entre la materia inorgánica y orgánica, porque la pérdida por ignición no es exclusiva para la materia orgánica sino que incluye las pérdidas por descomposición o volatilización de algunas sales minerales. Una mejor caracterización de la materia orgánica se puede hacer mediante ensayos como el carbono orgánico total (TOC).

"Sólidos sedimentables" es el término aplicado al material de sedimentación de la suspensión dentro de un período definido. Se puede incluir material flotante dependiendo de la técnica.

2. Fuentes de error y variabilidad

A fin de introducir errores graves se recomienda:

- El muestreo de fluidos bifásicos o trifásicos puede introducir errores graves por lo que se recomienda mantener tales muestras homogéneas durante su transferencia.
- Mezclar muestras pequeñas con un agitador magnético.
- Si en una muestra donde existen sólidos en suspensión, parte de la muestra se adhiere al recipiente de análisis considere esto en la evaluación y notificación de los resultados.
- Se requiere un manejo especial para hacer frente a muestras que al secarse dan lugar a la formación de una costra que impide la evaporación del agua.
- Evite el uso de un agitador magnético con muestras que contienen partículas magnéticas.

- La temperatura a la que se seca el residuo tiene una influencia importante en los resultados, ya que las pérdidas de peso debidas a la volatilización de la materia orgánica, agua mecánicamente ocluida, agua de cristalización y gases de descomposición química inducida por el calor así como las ganancias de peso debido a la oxidación dependen de la misma y del tiempo de calentamiento.
- Cada muestra requiere una estrecha atención a su desecación. Es deseable minimizar la apertura del desecador porque entra aire húmedo. Algunas muestras pueden ser desecantes más fuertes que los que se utilizan en el desecador y pueden captar agua.
- Los residuos secados de 103 a 105 °C pueden no sólo retener agua de cristalización, sino también agua ocluida mecánicamente. La pérdida de CO₂ resultará en la conversión de bicarbonato a carbonato. La pérdida de materia orgánica por volatilización por lo general será muy ligera. Debido a que la eliminación de agua ocluida es marginal a esta temperatura, el logro de un peso constante puede ser muy lento.
- Los residuos secos a 180 ± 2 °C perderán casi toda el agua mecánicamente ocluida. Un poco de agua de cristalización puede permanecer, especialmente si están presentes sulfatos. La materia orgánica se puede perder por volatilización, pero no es completamente destruida. La pérdida de CO₂ procedente de la conversión de bicarbonatos a carbonatos puede descomponerse parcialmente a óxidos o sales básicas.
- Algunas sales de cloruro y nitrato pueden perderse. En general, la evaporación y el secado de las muestras de agua a 180 °C producen valores de sólidos disueltos más cerca de los que se obtienen a través de la suma de especies minerales determinados individualmente.
- Para enjuagar los filtros y los sólidos filtrados y para limpiar el material de laboratorio se debe usar agua tipo III. Algunas muestras especiales pueden requerir un agua de mayor calidad.
- Los resultados para residuos con alto contenido de aceite o grasa pueden ser cuestionables a causa de la dificultad de secado hasta alcanzar peso constante en un tiempo razonable.
- Para ayudar a asegurar la calidad, analizar las muestras por duplicado.

- Las muestras secas deben alcanzar un peso constante. Esto conlleva múltiples ciclos de secado - enfriamiento - pesaje para cada determinación.
- Los análisis realizados para algunos propósitos especiales pueden exigir desviación del procedimiento indicado para incluir un componente inusual con los sólidos medidos. Siempre que tales variaciones de la técnica, se registren y presenten con los resultados.

3. Tratamiento de muestras y conservación

- utilizar botellas resistentes de vidrio o plástico, siempre que el material en suspensión no se adhiera a las paredes del recipiente.
- realizar el análisis tan pronto como sea posible debido a la imposibilidad de preservar la muestra.
- Refrigerar la muestra a 4 °C hasta el momento del análisis para minimizar la descomposición microbiológica de sólidos. Preferiblemente no mantenga muestras más de 24 h. En ningún caso más de 7 días.
- Lleve Llevar las muestras a temperatura ambiente antes del análisis.

2540 D. Sólidos Suspendidos Totales secados a 103-105 ° C

1. Discusión general

a) Fundamento: Una muestra bien mezclada se filtra a través de un filtro estándar pesado y el residuo retenido en el filtro se seca hasta un peso constante a 103 a 105 ° C. El aumento en peso del filtro representa los sólidos totales en suspensión. Si el material en suspensión obstruye el filtro y prolonga la filtración, puede ser necesario aumentar el diámetro del filtro o disminuir el volumen de la muestra. Alternativamente para obtener una estimación de los sólidos suspendidos totales, se calcula la diferencia entre los sólidos disueltos totales y los sólidos totales.

b) Interferencias: Excluir partículas flotantes grandes o aglomerados de materiales no homogéneos de la muestra sumergida si se determina que su inclusión no es representativa. Debido a que un residuo excesivo en el filtro puede formar una corteza que atrapa agua, el tamaño de la muestra debe ser tal que dé lugar a no más de 200 mg de residuo. Para muestras altas en sólidos disueltos, lavar bien el filtro para asegurar la eliminación de material disuelto. Tiempos de filtración prolongada producen resultados altos debido a la obstrucción del filtro debido al aumento de materiales coloidales capturados en el filtro obstruido.

2. Equipo

- Platos de aluminio pesados
- Mufla
- Desecador
- Balanza analítica
- Probeta
- Kitasato
- Bomba de vacío
- Discos de filtrado
- Embudo de cerámica

3. Procedimiento

a) Preparación del disco de filtrado: insertar el disco en el equipo de filtración. Aplicar vacío y lavar el disco con tres porciones sucesivas de 20 ml de agua destilada. Continuar la succión para eliminar todos los rastros de agua y deseche los lavados. Quite el filtro y transfíralo a un plato pesado de aluminio. Secar en un horno a 103 a 105 °C durante 1 h. Si los sólidos volátiles se van a medir, operar a 550 °C durante 15 min. Enfriar en un desecador para equilibrar la temperatura y pesar. Repita el ciclo de secado, desecación y pesado hasta obtener un peso constante o hasta que el cambio de peso sea menos del 4 % del anterior pesaje o 0,5 mg.

b) Selección de los filtros y tamaño de la muestra: Elija un volumen de muestra para producir entre 2,5 y 200 mg de residuo seco. Si el volumen de filtrado no cumple con el mínimo, aumentar el volumen de la muestra hasta 1 L. Si la filtración completa tarda más de 10 minutos, aumentar o disminuir el diámetro de filtro.

c) Análisis de las muestras: Montar el equipo de filtración con el filtro y comenzar la succión. Humedecer el filtro con un pequeño volumen de agua destilada para asentarlos. Agitar la muestra para obtener un sistema más uniforme de partículas.

Lavar el filtro con tres volúmenes sucesivos de 10 ml de agua destilada, para permitir un drenaje total de sólidos disueltos. Continuar la succión durante unos 3 minutos después que la filtración se ha completado. Las muestras con alto contenido de sólidos disueltos pueden requerir lavados adicionales.

Transferir el filtro y transfiera a un plato de aluminio tarado como soporte. Secar durante al menos 1 hora a 103 a 105 ° C en una mufla, y colocar en un desecador para enfriar y pesar. Repetir el ciclo de secado, enfriamiento, desecación y pesado hasta alcanzar un peso constante.

4. Cálculo

$$[SS] = \frac{(A - B) \times 1000}{V}$$

Donde:

A = Peso del residuo seco + filtro (mg)

B = peso del filtro (mg)

SS = concentración de sólidos suspendidos

V: Volumen de la muestra a filtrarse al vacío, mL