

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

***"DISEÑO DE UN SISTEMA LAVADOR DE VAPORES EN UNA PLANTA DE
ALIMENTO BALANCEADO"***

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Mecánico

Presentado por:

Joaquín Adolfo Decker Villegas

Wilson Andrés Huiracocha Sáenz

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2018

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios, a mi familia que amo con todo mi corazón, su apoyo incondicional y sacrificio ha permitido la culminación de mi carrera académica.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por guiar mi camino y llevarme a cumplir mis sueños y objetivos.

A mis padres por su paciencia, amor, permanente apoyo en mis decisiones.

A la Escuela Superior Politécnica del Litoral a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción por brindarme su apoyo permanente, de valores y formación académica para contribuir en favor a la sociedad como futuro profesional.

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Joaquín Adolfo Decker Villegas* y *Wilson Andrés Huiracocha Sáenz*, damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



Joaquin Decker



Wilson Huiracocha

EVALUADORES



Emérita Delgado PhD.

PROFESOR DE LA MATERIA



Gonzalo Zabala MSc.

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

En una planta de producción de balanceado a base de cabezas de camarón existe una alta concentración de malos olores y material particulado debido a que éstos se producen a lo largo del proceso de elaboración del balanceado. Las concentraciones de estos olores y partículas llegan a ser tan altas que se genera un ambiente no apto para laborar ni habitar en los alrededores de la planta.

Por lo que se ideó una solución, la cual consistió en el diseño de un tren lavador de vapores y material particulado que cumpla con las debidas normas y estándares técnicos, el lavador de vapores está formado por una tubería de succión para atraer los vapores y partículas productos del proceso de balanceado, para luego dirigir éstos a un tubo venturi que se encargará de eliminar partículas contaminantes en el fluido, por último, pasa a una torre de absorción rellena, la cual contiene filtros y una ducha de hipoclorito de sodio diluido con agua para eliminar los malos olores en los vapores, este químico se recircula por medio de una bomba en esta torre, al finalizar los vapores que ingresaron en este tren quedarán libres de partículas contaminantes y los malos olores serán reducidos a un rango aceptable. Se logró realizar el diseño del tren lavador de vapores, en el cual se obtuvo una eficiencia del 72% para remoción de partículas y del 90% para reducción de malos olores, estos datos se lograron comprobar con simulaciones realizadas en diferentes programas.

Palabras Clave: Venturi, absorción, vapores, partículas.

ABSTRACT

In a balanced production plant based on shrimp heads there is a high concentration of ugly odors and particulate material because these are produced throughout the process of making the balanced. The concentrations of these odors and particles become so high that it generates an environment that is not suitable for working or living in the vicinity of the plant.

So a solution was conceived which consisted in the design of a train washer of vapors and particulate material that complies with the proper standards and technical standards, the steam washer is formed by a suction pipe to attract vapors and particles products of the balancing process, to then direct these to a venturi tube that will be responsible for removing contaminating particles in the fluid, finally going to a filled absorption tower which contains filters and a sodium hypochlorite shower diluted with water to eliminate the bad odors in the vapors, this chemical is recirculated by means of a pump in this tower, at the end of the vapors that entered this train will be free of polluting particles and bad odors will be reduced to an acceptable range. The vapor washer train design was achieved, in which an efficiency of 72% was obtained for particle removal and 90% for reduction of bad odors, this data was verified with simulations carried out in different programs.

Keywords: Venturi, absorption, vapors, particles.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS	VI
SIMBOLOGÍA	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
CAPÍTULO 1.....	1
1. Introducción.....	1
1.1 Descripción del problema	2
1.2 Justificación del proyecto	3
1.3 Objetivos.....	3
1.3.1 Objetivo General.....	3
1.3.2 Objetivos Específicos	3
1.4 Marco teórico.....	4
1.4.1 Descripción del proceso productivo.....	4
1.4.2 Tecnologías aplicables para el control de olores.....	5
1.4.3 Tecnologías aplicables para el control de partículas.....	8
1.5 Estudio de Alternativas.....	11
CAPÍTULO 2.....	14
2. Metodología.....	14
2.1 Análisis de los diversos sistemas lavadores de vapores y vapores.....	14
2.2 Diseño de forma	17
2.3 Diseño detallado del lavador tipo Venturi	20
2.3.1 Dimensionamiento del lavador tipo Venturi	21
2.3.2 Líquido de lavado	23

2.3.3	Caída de presión en el lavador Venturi	24
2.3.4	Tamaño de partícula y eficiencia de remoción	25
2.4	Sistema Hidráulico.....	28
2.4.1	Selección de bomba.	28
2.5	Diseño de torre de absorción rellena para el control de olores	30
2.5.1	Balance de masas	31
2.5.2	Caída de presión	32
2.5.3	Diámetro de torre de absorción	32
2.5.4	Altura de empaque	34
2.6	Sistema de Aspiración.....	35
2.6.1	Verificación de la Potencia del motor	36
CAPÍTULO 3.....		38
3.	Resultados y Análisis	38
3.1	Diseño de lavador Venturi	38
3.1.1	Dimensiones lavador Venturi.....	38
3.1.2	Caída de presión en el lavador Venturi	39
3.1.3	Tamaño de partícula y eficiencia de remoción	39
3.1.4	Selección de Bomba.....	40
3.2	Torre de absorción	40
3.2.1	Caída de presión	41
3.2.2	Diámetro	42
3.2.3	Altura	42
3.3	Sistema de Aspiración.....	43
3.3.1	Verificación de la Potencia del motor	43
3.4	Simulación.....	44
3.4.1	Lavador Venturi	44
3.4.2	Torre de absorción	45

3.5	Análisis de costos.....	46
3.5.1	Costos Directos	46
3.5.2	Costos Indirectos.....	48
3.5.3	Costos Totales.....	48
CAPÍTULO 4.....		49
4.	Conclusiones y Recomendaciones.....	49
4.1	Conclusiones.....	49
4.2	Recomendaciones.....	50

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ABREVIATURAS

ESPOL Escuela Superior Politécnica del Litoral

FIMCP Facultad de Ingeniería mecánica y ciencias de la producción

EPA Environmental Protection Agency

SIMBOLOGÍA

mil	Milésima de pulgada
g	gramo
m	Metro
(CH ₃) ₃ N	Trimetilamina
H ₂ S	Sulfuro de Hidrogeno
Mol	Moles
H	Horas
Cfm	Pies cúbicos por minuto
Ft	Pies
Lb	Libras
NaOCl	Hipoclorito de sodio
Pa	Pascal
K	Kelvin
C	Centígrados
Atm	atmosfera
Cm	centímetro
Ppm	Partes por millón
mH ₂ O	metro de columna de agua
inH ₂ O	pulgadas de columna de agua

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Proceso de producción de balanceado	4
Figura 1.2 Técnica de absorción (ENQUIOL, s.f.)	6
Figura 1.3 Técnica de adsorción (Ecochimica, 2016)	7
Figura 1.4 Técnica de incineración	7
Figura 1.5 Ciclón colector de partículas (BARRAZA, 2013)	8
Figura 1.6 Filtro de mangas (EMISON, s.f.)	9
Figura 1.7 Precipitadores electrostáticos (Baldeon, 2007)	10
Figura 1.8 Lavadores húmedos (Baldeon, 2007)	10
Figura 2.1 Diseño de Forma (Fuente: propia)	18
Figura 2.2 Nomenclatura del lavador Venturi (Elaboración: propia)	22
Figura 2.3 Secciones para cálculos de pérdidas	29
Figura 2.4 Factor de capacidad vs factor de flujo	33
Figura 3.1 Dimensiones lavador venturi	38
Figura 3.2 Caída de Presión	44
Figura 3.3 Variación de velocidad	45
Figura 3.4 Torre de absorción	45

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Alternativas para control de olores	12
Tabla 1.2 Alternativas para control de partículas.....	13
Tabla 2.1 Matriz de evaluación de criterios	15
Tabla 2.2 Evaluación de alternativas Control del Olores	15
Tabla 2.3 Evaluación de alternativas Control de partículas	16
Tabla 2.4 Selección de alternativas Control de olores.....	16
Tabla 2.5 Selección de alternativas Control de partículas.....	17
Tabla 2.6 Valores óptimo para diseño de lavador Venturi	22
Tabla 2.7 Característica del líquido de lavado.....	24
Tabla 2.8 Medición de velocidad de extracción	36
Tabla 3.1 Dimensión del lavador tipo Venturi	39
Tabla 3.2 Eficiencia de remoción lavador de partícula	40
Tabla 3.3 Parámetros de Diseño de la Torre de Absorción	41
Tabla 3.4 Propiedades de las sustancias involucradas	41
Tabla 3.5 Parámetros para el cálculo de la Caída de presión	42
Tabla 3.6 Descripción detallada de materiales para construcción del proyecto	47
Tabla 3.7 Costos por construcción e instalación	47

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

El presente proyecto se desarrollará en una planta de balanceado, cuya naturaleza es de una empresa seca, es decir, no produce efluentes de ningún tipo. Los impactos ambientales que ocasionan las plantas industriales procesadoras de alimentos balanceados no difieren en lo absoluto de aquellos producidos por plantas similares que trabajen en cualquier parte del mundo, y están asociadas a los procesos de almacenamiento de materia prima y de producto terminado, así como también con la producción de vapores emanados desde los secadores y enfriadores, equipos utilizados en estas industrias.

Estos impactos ambientales son la emanación de olores desagradables y emisión de material particulado (finos) propios del proceso productivo.

Ciertas empresas fabricantes de alimentos balanceados utilizan diferentes métodos para contrarrestar estos tipos de emisiones y son: sistemas de chorro de agua pulverizado a gran velocidad que retiene las partículas finas que llevan los olores, luego se filtra y el agua se vuelve a usar. En otra fábrica que elabora harina de pescado y camarón, las partículas finas cargadas de mal olor van a una piscina con madera y aserrín en forma de filtro, ingresan por la parte más baja de la piscina a través de tuberías para cubrir toda el área de la piscina y al subir las burbujas de aire entran en contacto con el aserrín y el flujo de aire se desodoriza.

El proceso principal es la elaboración de harina y solubles de pescado y otros animales acuáticos para alimento de animales, no aptos para el consumo humano.

La planta de balanceado como consecuencia de sus operaciones productivas puede generar, impactos ambientales significativos y consecuentemente un riesgo ambiental.

En sus procesos tiene implementado el uso de ciclones y filtros de mangas, los cuales ayudan para la retención de sólidos o partículas que se puedan estar emitiendo hacia la atmósfera. Se han establecido Medidas de Prevención y Mitigación dentro de los principales procesos realizados y el estudio de control de emisiones contaminantes.

1.1 Descripción del problema

Las plantas de balanceado que existen actualmente tienen fuentes de vapores orgánicos con olores desagradables, y normalmente no poseen un sistema para captación y control de olores eficiente.

De esta misma manera existe una emisión de material particulado en los interiores de la planta, el esparcimiento de polvo en el interior del lugar, y la precipitación de estas en sitios inaccesibles, se presentan también como parte complementaria del problema, con estos antecedentes, este material tiene un elevado potencial de entrar en un posterior estado de descomposición.

De acuerdo a esto, el problema consiste en establecer medidas técnicas que permitan principalmente captar los vapores orgánicos generados en la planta y direccionarlos hasta un dispositivo que permita minimizar su impacto ambiental al entorno.

De forma complementaria, se deberá también establecer medidas adecuadas para mejorar la captación de polvos y reducir su generación al interior de la planta; además se deberán recomendar acciones que contribuya a la solución del problema.

Como condiciones a la solución más viable que se logre establecer, se ha impuesto que esta no deberá demandar inversiones excesivas, espacio físico limitado y además de que será lo suficientemente capaz de limitar los olores, por lo menos al perímetro de la planta.

1.2 Justificación del proyecto

La generación de emisiones a la atmósfera afecta a todos los sectores y todavía en nuestro país no existe un buen nivel de conocimiento sobre este tema, ni a nivel de legislación, ni de las tecnologías de tratamiento. Cabe indicar que la medida ambiental válida para evitar molestias a la ciudadanía por causa de estas emisiones consiste en ubicar estas plantas en zonas alejadas de la ciudad y de los centros poblados, pero no es suficiente para evitar la contaminación ambiental. Por lo que se propone realizar el diseño de un tren lavador de vapores y de un separador de partículas que, mediante equipos, ductos de transporte, y torre de lavado reducir los niveles de contaminación dentro de la planta, así como en sus alrededores para alcanzar mejores niveles de calidad de aire.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Diseñar un sistema lavador de vapores que cumplan con el requerimiento de reducir las concentraciones de material particulado y vapores contaminantes, los cuales se producen por el Secador Spray y que son descargados a la atmósfera, cumpliendo con todas las normas de diseño y políticas ambientales.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Diseñar los componentes que forman parte del sistema como son: Torre, ductos, cámara de vapores, cámara rociadora, sistema Venturi, y demás equipos auxiliares.

- Seleccionar los diferentes componentes de los sistemas mecánicos, hidráulicos siguiendo los procedimientos, normas y estándares técnicos.

- Analizar los costos de fabricación, montaje y equipos auxiliares, para tener una idea global del costo del proyecto.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Descripción del proceso productivo

La planta de balanceado realiza tareas de producción de harina de cabezas de camarón para la comercialización en el mercado interno y externo, regularmente desarrolla los siguientes procesos:

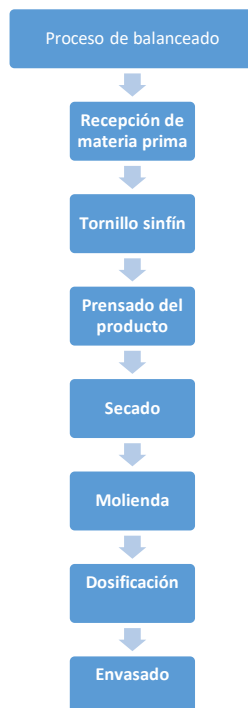


Figura 1.1 Proceso de producción de balanceado

Lo primero es recibir la materia prima las cuales son las cabezas de camarón residuales de las plantas empacadoras, una vez se tenga lista la materia prima en la planta pasan a un tornillo sin fin el cual las muele y transporta hasta una prensa y cocinado por vapor.

El producto cocinado se lo vuelve a prensar y el resultado de este será una masa espesa la cual contiene alto porcentaje de humedad, para poder eliminar la humedad se la lleva a un secador para evaporar las partículas de agua dentro del producto.

Una vez la mezcla esté libre de humedad se la pasa por una molina el cual disminuirá el tamaño de las partículas así mejorando su calidad, color y textura. Por último, a la harina se le agregan antioxidantes para evitar su pronta descomposición y tenerla lista para la venta.

1.4.2 Tecnologías aplicables para el control de olores

Existen varias técnicas para llevar a cabo la reducción de malos olores generados por diferentes procesos industriales, para poder realizar una reducción de concentración de olores exitosa es necesario usar una de estas técnicas y en ciertas ocasiones una combinación de estas. Aunque en la actualidad existen tecnologías relativamente nuevas, hay técnicas que han venido siendo utilizadas con éxito desde hace muchos años; las principales son:

- Absorción
- Adsorción
- Incineración

Para poder escoger entre una de estas técnicas es necesario mencionar que existe una descarga gaseosa que contiene vapores orgánicos y partículas dentro del proceso productivo de la planta, lo cual es un factor importante al escoger la opción más adecuada.

Absorción:

La absorción se lleva a cabo mediante la difusión del fluido en otro material, por lo que resulta más conveniente llevarlo a cabo en torres rellenas, ya que el material utilizado como relleno facilita una superficie bastante amplia para mejorar la transferencia de masa, también conocida como difusión, en este caso es el paso del componente gaseoso orgánico desde el gas hacia un líquido que se vierte sobre el relleno; en ciertos casos, es necesario añadir un reactivo químico al líquido con la finalidad de aumentar la capacidad de absorción del material. Uno de los problemas que se

presenta en el material de relleno, es la acumulación de sedimentos en éste, situación que se agrava cuando la utilización de reactivos químicos genera sales poco solubles, pues éstas se precipitan con facilidad en el relleno, causando la obstrucción del mismo.

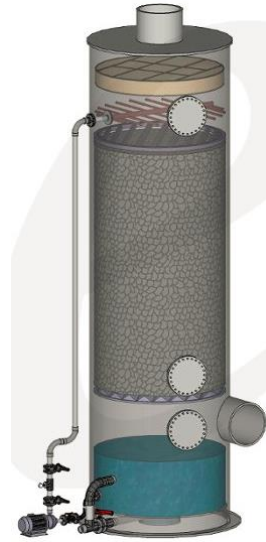


Figura 1.2 Técnica de absorción (ENQUIOL, s.f.)

Adsorción:

La adsorción, es una técnica en la que se atrapa las moléculas de los vapores responsables de los olores; para esto se utiliza una estructura que posee poros de tamaño microscópico. Por tal motivo, uno de los principales requisitos para utilizar la técnica de adsorción, es que los vapores estén libres de partículas que puedan ocasionar la obstrucción de la superficie adsorbente. Esta es una técnica costosa, ya que además del sistema necesario para el proceso, se necesita un sistema adicional para reactivar la superficie adsorbente una vez que ésta se ha saturado; por eso, esta técnica es recomendable cuando se quiere captar y recuperar vapores que pueden ser valiosos o venenosos.

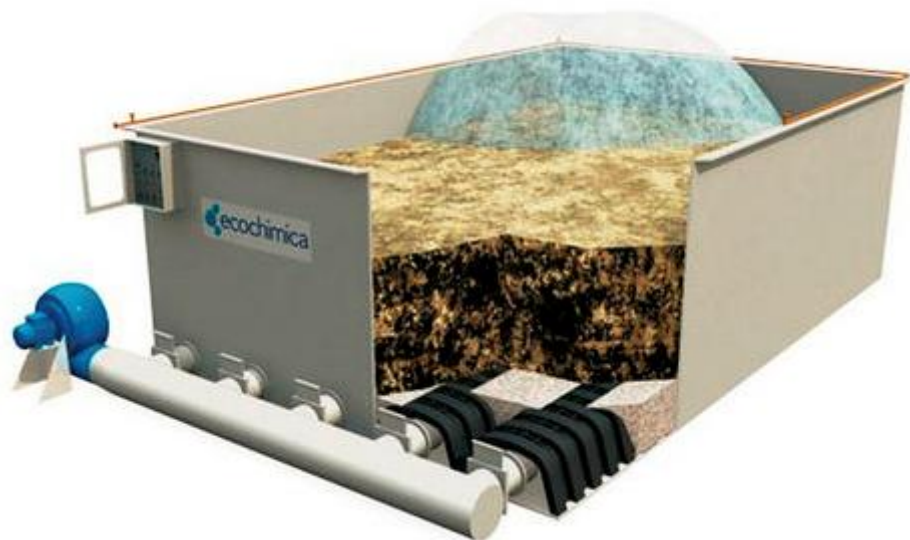


Figura 1.3 Técnica de adsorción (Ecochimica, 2016)

Incineración:

La incineración es una de las técnicas más adecuadas para el control de olores, pues por medio de ésta se destruyen las sustancias químicas responsables de la generación del mal olor. Para ello se utilizan cámaras de alta temperatura, en la cual los compuestos orgánicos volátiles son destruidos eficazmente, siempre y cuando se mantengan buenas condiciones de temperatura, tiempo de residencia y turbulencia. Al considerar la utilización de la incineración para tratar vapores cargados con partículas, debe tenerse en cuenta la capacidad del quemador para operar en tales condiciones, pues la presencia de partículas puede generar problemas de obstrucción.

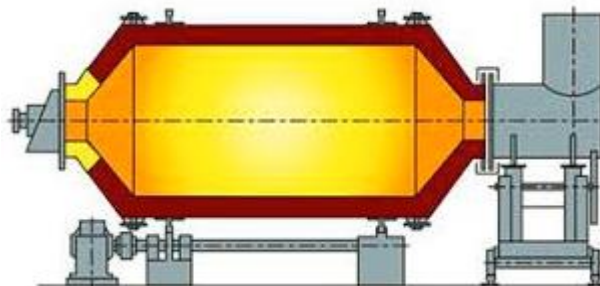


Figura 1.4 Técnica de incineración

1.4.3 Tecnologías aplicables para el control de partículas.

Para implementar una u otra tecnología destinada a la remoción de partículas desde una corriente gaseosa se debe tener en cuenta varios factores, principalmente el tamaño de partícula, la eficiencia de remoción deseada, el costo del dispositivo colector, entre otros. A nivel industrial, los dispositivos más conocidos en el control de partículas son:

- Ciclón
- Filtro de mangas
- Precipitador electrostático
- Lavador húmedo tipo Venturi

Ciclón:

Los ciclones no son dispositivos adecuados cuando se quiere remover un alto porcentaje de partículas finas; sin embargo, éstos pueden ser utilizados como colectores primarios de las partículas más grandes, seguidos de un dispositivo de mayor eficiencia para las partículas más finas.

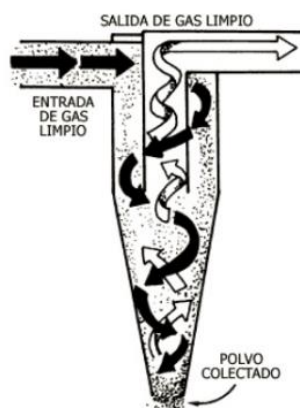


Figura 1.5 Ciclón colector de partículas (BARRAZA, 2013)

Filtro de Mangas:

Los filtros de mangas han demostrado ser muy eficientes en aplicaciones donde se desea remover polvos finos; este tipo de dispositivo utiliza el mismo principio de retención de partículas que un filtro convencional de estructura fibrosa, por lo cual va a llegar un momento en que el material filtrante se obstruirá e impedirá el libre flujo del gas. Por lo tanto, un filtro de mangas eficiente y técnicamente diseñado requerirá la inclusión de un sistema de limpieza automático de las mangas, lo cual incrementa también la complejidad y costo del aparato.

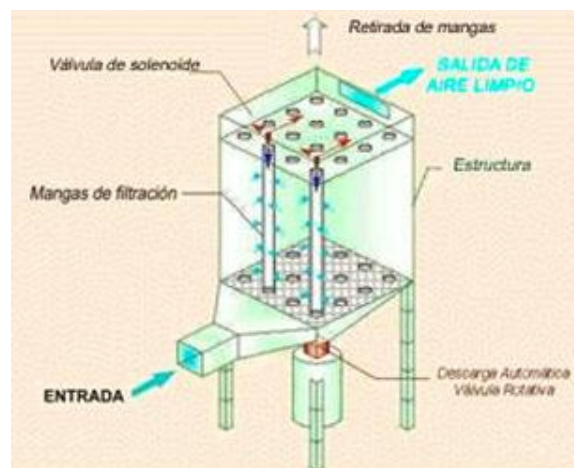


Figura 1.6 Filtro de mangas (EMISON, s.f.)

Precipitadores electrostáticos:

Dependiendo de los caudales que se desea manejar, un precipitador electrostático puede ocupar grandes espacios, además de que es un equipo de alto costo. Un dispositivo de precipitación electrostática puede remover partículas muy finas, ya sean éstas sólidas o líquidas; sin embargo, el buen desempeño de estos aparatos está unido a las características de las partículas a removerse, lo cual debe considerarse cuidadosamente en el proceso de diseño.

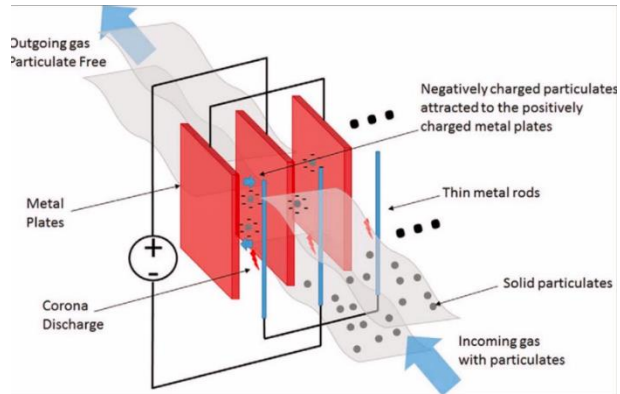


Figura 1.7 Precipitadores electrostáticos (Baldeon, 2007)

Lavadores húmedos:

Existen varios tipos de lavadores húmedos para remover partículas; en el caso de partículas finas, los lavadores tipo Venturi son siempre los más adecuados. Este tipo de dispositivo implica la utilización de agua como medio para remover las partículas, por lo cual debe tenerse en cuenta para el diseño, factores tales como el consumo del líquido y la disposición de los lodos generados.

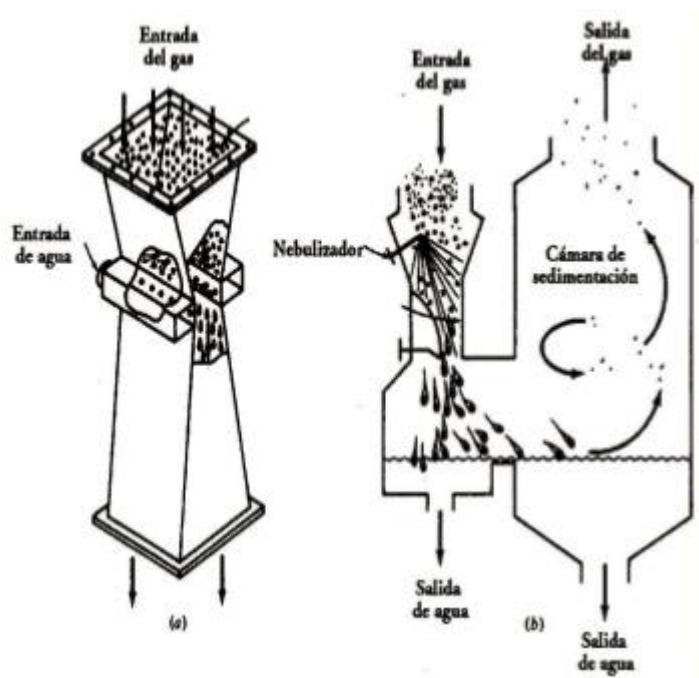


Figura 1.8 Lavadores húmedos (Baldeon, 2007)

1.5 Estudio de Alternativas

Para este problema se requiere de una solución que primordialmente se centre en minimizar la emanación de olores desagradables en el perímetro de la planta, además de aportar en la captación de material particulado generados durante el proceso de producción que son también parte de este problema.

Se debe de considerar que, para la búsqueda de soluciones a este problema, los costos para su implementación deben de ser lo convenientemente óptimos para construirlo a corto plazo, luego de las inspecciones en el proceso se ha encontrado los siguientes puntos para su estudio y análisis:

- Control de emanaciones de vapores y vapores en la descarga principal.
- Mejoramiento en la captación de material particulado.
- Mejoramiento en la captación de vapores y vapores orgánicos

Las diferentes tecnologías que se han encontrado factibles para el estudio de este problema son la utilización de lavadores húmedos para la captación de material particulado, absorción de vapores a través de una torre rellena para el control de olores.

Pero para nuestro proyecto es importante identificar las fortalezas y debilidades de cada uno de los sistemas lavadores de vapores. Lo que nos facilitara la selección de la mejor propuesta de diseño.

Tabla 1.1 Alternativas para control de olores

CONTROL DE OLORES			
ALTERNATIVAS	Ventajas	Desventajas	
A	SISTEMA DE REDUCCIÓN DE OLORES POR ABSORCIÓN	Efectivos en una amplia variedad de compuestos orgánicos volátiles transportados por aire.	Los VOC's pueden combinarse con el cloro para producir compuestos organoclorados que son objeto de control por parte de organismos oficiales.
		Tecnología conocida en general, especialmente para absorción de compuestos amoniacales.	El costo de los empaques puede ser elevado; sin embargo, el uso de plásticos como el cloruro de polivinilo (PVC) puede ser más económico
		Como oxidante se utiliza el hipoclorito de sodio de costo bajo.	Costo elevado de fabricación.
		Requerimiento de equipos fácilmente accesibles para ejecutar pruebas experimentales.	
B	SISTEMA DE REDUCCIÓN DE OLORES POR ADSORCIÓN	Efectivos en una amplia variedad de compuestos orgánicos volátiles.	No es selectivo a los compuestos olorosos, adsorbiendo otros compuestos, lo que ocasiona saturación del producto adsorbente y su frecuente regeneración y reposición, incrementando los costos de operación
		Adsorben un gran espectro de compuestos orgánicos (que producen olores o no).	Mayor requerimiento de área.
		Tecnología conocida y parámetros de diseño establecidos.	Costo de Fabricación (obra civil) alto.
C	SISTEMA DE REDUCCIÓN DE OLORES POR INCINERACIÓN	Manejo de mano de obra innecesaria	Costos altos de operación (consumo de combustible).
		Evitamos subproductos a PTAR.	Problemas operacionales de acuerdo a la variabilidad en la composición de los residuos.
		Limpieza innecesaria.	Costos elevados en la inversión inicial.

Tabla 1.2 Alternativas para control de partículas

CONTROL DE PARTÍCULAS			
ALTERNATIVAS		Ventajas	Desventajas
A	SISTEMA DE CONTROL DE PARTÍCULAS POR CICLÓN	Son aparatos poco costosos.	Para una eficiencia alta, se requiere un tamaño grande, o una caída de presión muy alta.
		Los gastos de funcionamiento y de mantenimiento son mínimos.	
		Simple y reproducible debido a la ausencia de partes en movimiento.	
		Sus interiores lisos impiden la acumulación de polvo.	
B	SISTEMA DE CONTROL DE PARTÍCULAS POR FILTRO DE MANGAS	Elevada eficiencia de filtración.	Limpieza fuera de línea.
		El material particulado es colectado en forma seca.	Alto mantenimiento en los sistemas de sacudido mecánico.
		Relativa baja caída de presión.	Requerimiento de gran espacio.
			Baja confiabilidad en las mangas filtrantes debido al exceso de trabajo mecánico.
C	SISTEMA DE CONTROL DE PARTÍCULAS POR PRECIPITADOR ELECTROSTÁTICO	Alcanzan eficiencias muy altas con partículas muy pequeñas, además de soportar un amplio rango de temperaturas y presiones.	Altos costos de capital.
		Por tener un sistema de recolección en seco, ofrece facilidad de manipulación.	Frecuente y difícil mantenimiento de los electrodos de descarga, puede presentarse corrosión cerca de la parte superior de los alambres por el efecto de fugas de gas y la condensación acida.
			En las placas se tiene el frecuente problema del pandeo, es decir la inestabilidad estática de las mismas
D	SISTEMA DE CONTROL DE PARTÍCULAS POR LAVADOR HÚMEDO TIPO VENTURI	Pueden manejar polvos inflamables y explosivos con alto riesgo.	Alto potencial de problemas de corrosión.
		Simple en diseño y fáciles de instalar.	Alto costo de fabricación.
		Bajo costo de operación.	
		Los gases corrosivos y polvos pueden ser neutralizados	

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

2.1 Análisis de los diversos sistemas lavadores de vapores y vapores.

Una vez especificado las ventajas y desventajas de los diferentes sistemas lavadores de vapores y vapores, las cuales son de vital importancia para poder seleccionar la mejor propuesta de diseño. Se aplica el método ponderado para la selección de la mejor alternativa, donde se analizarán los siguientes criterios de selección:

- Menor Costo
- Facilidades de Mantenimiento
- Consumo de Energía
- Medio Ambiente
- Seguridad

Para nuestro proyecto se prestará mayor énfasis en los sistemas que presenten menor consumo de energía y facilidades de mantenimiento debido a que es el objetivo general de nuestro proyecto. Por lo tanto, se considera la siguiente valoración de criterios:

Criterio A > Criterio B	Valor igual a 1
Criterio B = Criterio A	Valor igual a 0.5
Criterio A < Criterio B	Valor igual a 0

La ponderación y análisis de criterios de selección se realizará en la siguiente tabla 2.1

Tabla 2.1 Matriz de evaluación de criterios

Criterio A	Criterio B	Costo	Facilidades de Mantenimiento	Consumo de Energía	Medio Ambiente	Seguridad	$\Sigma+1$	Ponderación
Menor Costo			0	0	0,5	0	1,5	0,1
Facilidades de Mantenimiento		1		0,5	0,5	0,5	3,5	0,233
Consumo de Energía		1	0,5		0,5	0,5	3,5	0,233
Medio Ambiente		0,5	0,5	0,5		0	2,5	0,166
Seguridad		1	0,5	1	0,5		4	0,266

Una vez realizada la ponderación de criterios la cual se detalla en la tabla 2.1. Posteriormente se asignará valores a cada alternativa como se muestra en la tabla 2.2 y 2.3, considerando 1 para el menor valor y 5 para el mayor valor.

Tabla 2.2 Evaluación de alternativas Control del Olores

Criterios de Selección	% de Ponderación	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C
Menor Costo	10	4	3	2
Facilidades de Mantenimiento	23,3	3	3	4
Consumo de energía	23,3	5	5	3
Medio Ambiente	16,6	3	4	4
Seguridad	26,6	5	4	2

Tabla 2.3 Evaluación de alternativas Control de partículas

Criterios de Selección	% de Ponderación	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C	Alternativa D
Menor Costo	10	4	2	2	5
Facilidades de Mantenimiento	23,3	5	3	2	5
Consumo de energía	23,3	4	3	2	4
Medio Ambiente	16,6	5	4	3	5
Seguridad	26,6	5	4	3	5

Tabla 2.4 Selección de alternativas Control de olores

Criterios de Selección	% de Ponderación	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C
Menor Costo	10	0,4	0,3	0,2
Facilidades de Mantenimiento	23,3	0,70	0,70	0,93
Consumo de energía	23,3	1,17	1,17	0,70
Medio Ambiente	16,6	0,50	0,66	0,66
Seguridad	26,6	1,33	1,06	0,53
Puntaje sobre 5		4,1	3,89	3,02

Tabla 2.5 Selección de alternativas Control de partículas

Criterios de Selección	% de Ponderación	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C	Alternativa D
Menor Costo	10	0,4	0,2	0,2	0,5
Facilidades de Mantenimiento	23,3	1,16	0,70	0,47	1,16
Consumo de energía	23,3	0,93	0,70	0,47	0,93
Medio Ambiente	16,6	0,83	0,66	0,50	0,83
Seguridad	26,6	1,33	1,06	0,80	1,33
Puntaje sobre 5		4,65	3,32	2,44	4,75

Conforme a los resultados presentados en la tabla 2.4 y 2.5 observamos que la alternativa A y D respectivamente obtuvo el mayor puntaje. Por lo tanto optamos por un sistema de Lavador Tipo Venturi con Torre de Absorción como la mejor alternativa de diseño.

2.2 Diseño de forma

Una vez revisados todos los factores que afectan al proyecto podemos realizar el diseño de forma, que es el sistema que planea diseñar.

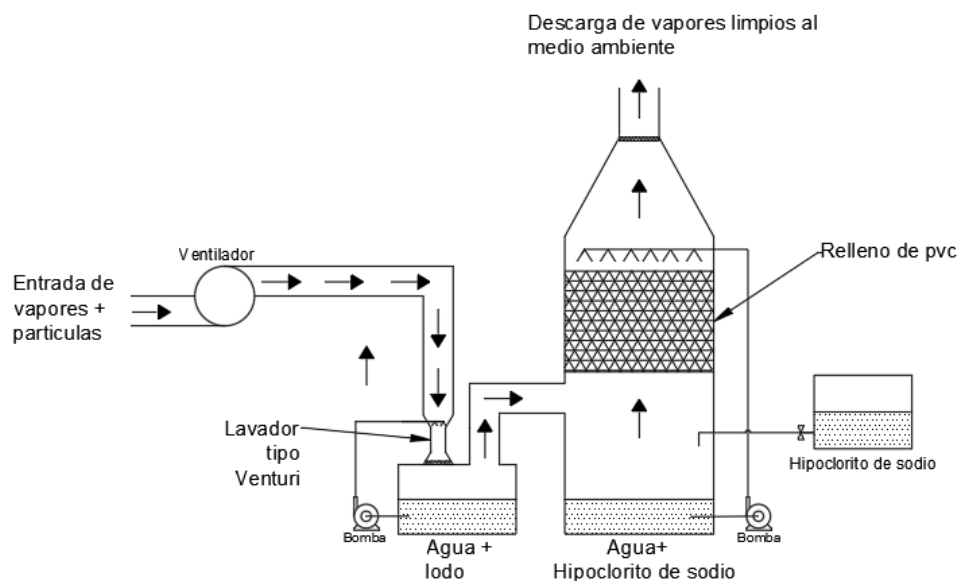


Figura 2.1 Diseño de Forma (Fuente: propia)

La descarga gaseosa principal, contiene partículas desprendidas de los pellets y vapores orgánicos de olor desagradable; al haber mejorado el sistema de captación de vapores orgánicos, se va a tener una mayor concentración de malos olores en el flujo gaseoso, por lo tanto, se debe contar con un medio para el control de olores que permita manejar tales niveles de concentración.

Para remover las partículas y vapores orgánicos, se utilizarán dos dispositivos que actúan por separado. Estos son: un lavador húmedo tipo Venturi, utilizado para el control de partículas, y una torre de absorción rellena, utilizada para el control de malos olores.

Para conducir la descarga gaseosa se utilizará el mismo ducto, con ligeras modificaciones para reducir las pérdidas, mientras que los equipos para el control de emisiones serán colocados en el patio posterior de la planta.

Los vapores ingresarán al lavador de vapores tipo Venturi, el cual no es más que un ducto convergente – divergente, en cuya zona más estrecha se inyectora

agua. De esta forma, deberá formarse aproximadamente una cortina de agua, la cual servirá para atrapar el material particulado arrastrado en la descarga gaseosa.

El agua, cargada con las partículas, ingresará a una cámara de separación, en la cual impactará en una superficie cuya función será remover las gotas de agua que fluyen en los vapores, y así separarlas de éstos. Para remover el agua remanente en el gas, se utiliza una estructura fibrosa denominada 'eliminador de niebla' colocada a la salida de la cámara, y en cuya estructura se captarán las gotas más finas que no pudieran ser eliminadas en la superficie de impacto.

Una vez que la descarga gaseosa (libre de partículas) ha abandonado la cámara de separación del lavador Venturi, ésta es dirigida hacia un dispositivo diseñado para remover los vapores orgánicos de mal olor. Este dispositivo se conoce como torre de absorción rellena, que como su nombre lo indica, es una cámara en cuyo interior posee un lecho relleno.

Los vapores contaminados ingresan por la parte inferior de la cámara, y atraviesan el relleno; al mismo tiempo se irriga desde la parte superior, una solución acuosa con un reactivo químico adecuado, de tal manera que el lecho relleno se humedece por completo.

Con el lecho relleno húmedo, y con los vapores pasando a través de éste, se va a producir una superficie muy amplia de contacto entre el gas y la solución acuosa, dando, así como resultado, condiciones óptimas para la transferencia de masa. Las sustancias químicas responsables de los malos olores abandonan la fase gaseosa para disolverse en la película líquida, en la cual reaccionarán con el aditivo químico del agua y serán neutralizadas, quedando así eliminado el problema de los malos olores.

El consumo de agua no constituye un problema, ni en el Venturi ni en la torre de absorción, pues en ambos casos el agua es reutilizada. En el caso del Venturi, se producirá la acumulación de partículas en el tanque reservorio y

por lo tanto la formación de lodos; sin embargo, el dispositivo admite su operación dentro de cierto límite de concentración de sólidos, por lo que deberá hacerse la limpieza del tanque cuando sea necesario.

En la torre de absorción también se hace recircular el líquido, pero en aquellos casos donde se utiliza soluciones acuosas, se producirá un agotamiento del reactivo químico, razón por la cual debe reponerse constantemente el químico al agua, preferiblemente desde un tanque externo con una bomba dosificadora.

Al igual que en el lavador Venturi, el tanque desde donde se recircula el líquido en la torre de absorción, debe ser sometido a limpieza. El período después del cual se debe limpiar ambos tanques, usualmente es mayor a una semana, y puede ser superior dependiendo del desempeño de los equipos. Por ello, el consumo de agua se mantendrá bajo.

2.3 Diseño detallado del lavador tipo Venturi

Para llevar a cabo el diseño del lavador tipo Venturi se requerirá dimensionar y determinar valores como la caída de presión en el dispositivo y su eficiencia de remoción.

Los parámetros principales que influyen en el desempeño del lavador tipo Venturi son:

- Cantidad de material particulado y distribución de tamaño de partícula.
- Temperatura, humedad y flujo de corriente gaseosa.
- Caída de presión y velocidad del gas
- Relación líquido a gas
- Tamaño de las gotas del líquido
- Tiempo de residencia

2.3.1 Dimensionamiento del lavador tipo Venturi

Para el diseño del lavador Venturi tendremos que tener en consideración las características del vapor a tratarse por lo que tendremos que determinar el flujo molar del vapor el cual es hallado por medio de las mediciones de velocidades en el ducto de entrada, usando la ecuación general de los vapores:

$$n = \frac{P*Q}{R*T} \quad (2.1)$$

Donde:

n= Flujo molar

P= Presión de 1 atm = 101300Pa

Q= Caudal promedio de entrada = 6086.65 CFM = 10341.27 m³/h = 2.87 m³/s

R= Constante de los vapores= $8.314 \frac{m^3 \cdot Pa}{mol \cdot K}$

T= Temperatura de vapor en el ducto= 38 °C

El lavador Venturi puede ser diseñado como un Venturi utilizado para medición de flujos, por comodidad para que no sea tan largo se utilizan ángulos de convergencia y divergencia mayores a los de un medidor. El diseño básicamente depende de los requerimientos del cliente por lo que ciertas medidas serán seleccionadas arbitrariamente por el diseñador tomando en cuenta las exigencias del cliente. Sin embargo, existen parámetros recomendados por varios autores los cuales se muestran en la tabla 2.6.

Tabla 2.6 Valores óptimo para diseño de lavador Venturi

Velocidad del Vapor en la garganta	
$V_v > 4575 \text{ cm/s}$	Alta eficiencia de remoción de PM
$2000 < V_v < 2300 \text{ cm/s}$	Absorción y remoción de PM simultaneas
Relación Líquido - Gas	
$0.26 < L/G < 2.6 \text{ l/m}^3$	Remoción de PM
$5.5 < L/G < 11 \text{ l/m}^3$	Absorción de gases y remoción de PM
Caída de Presión	
$10 < \Delta P < 150 \text{ in H}_2\text{O}$	Inferior en aplicaciones de absorción
Dimensiones Típicas	
Área de entrada / Área de garganta = 4 : 1	
Ángulo de convergencia = 12.5°	
Ángulo de divergencia = 3.5°	

Se usarán los valores óptimos para un diseño de alta eficiencia.

La figura 2.2 muestra la nomenclatura que se usara para el dimensionamiento del Venturi.

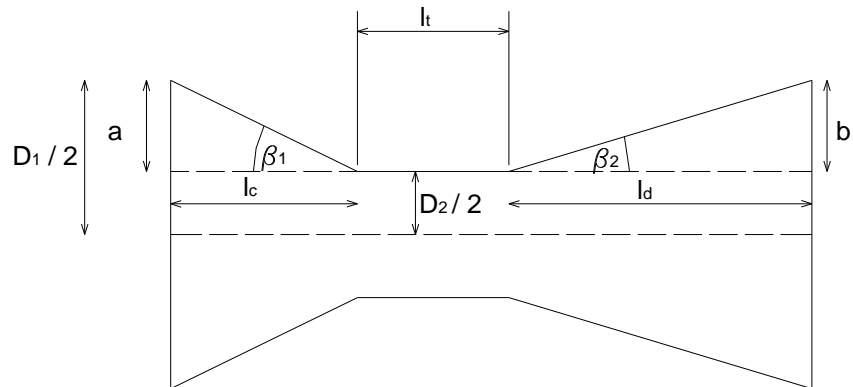


Figura 2.2 Nomenclatura del lavador Venturi (Elaboración: propia)

Para encontrar el diámetro de la garganta del Venturi D_2 se halla de la siguiente manera:

$$Q = V_G * A_2 \quad (2.2)$$

$$A_2 = \frac{Q}{V_G}$$

$$D_2 = \sqrt{\frac{4A_2}{\pi}} \quad (2.3)$$

El diámetro del ducto de entrada es de 50cm, por lo tanto, será el mismo diámetro de la zona convergente del lavador Venturi $D_1 = 50 \text{ cm}$

El valor de a lo hallamos con la siguiente ecuación:

$$a = \frac{D_1}{2} - \frac{D_2}{2} \quad (2.4)$$

La longitud de zona convergente l_c :

$$l_c = \frac{a}{\tan \beta_1} \quad (2.5)$$

El diámetro de salida de la zona divergente será la misma que la entrada al Venturi por la zona convergente, por lo que la longitud de zona divergente l_d es:

$$l_d = \frac{b}{\tan \beta_2} \quad (2.6)$$

La longitud óptima de la garganta l_t esta dada por la siguiente ecuación:

$$l_t = \frac{2*d_d*\rho_L}{C_D*\rho_G} \quad (2.7)$$

Los valores de coeficiente de arrastre C_D y diámetro medio de Sauter d_d se determinarán más adelante.

2.3.2 Líquido de lavado

En el interior del Venturi se usará flujo de agua para la remoción de partículas, se usará una atomización tipo gota por lo que el diámetro de las

gotas se puede determinar usando la ecuación Nukiyama-Tanasawa, a este diámetro se lo conoce como diámetro de Sauter y se lo calcula de la siguiente manera:

$$d_d = \frac{58600}{V_G} * \left(\frac{\sigma}{\rho_L}\right)^{0.5} + 597 * \left(\frac{\mu_L}{(\sigma * \rho_L)^{0.5}}\right)^{0.45} * \left(1000 * \frac{Q_L}{Q_G}\right)^{1.5} \quad (2.8)$$

Donde:

d_d = diámetro medio de Sauter [μm]

V_G = velocidad del gas [$c m/s$]

σ = tensión superficial del líquido = 70.9 [$dinas/cm$]

ρ_L = densidad del líquido = 0.9871 [g/cm^3]

μ_L = viscosidad del líquido = $7.69 * 10^{-3}$ [$poise$]

Q_L = flujo volumétrico del líquido [m^3/s]

Q_G = flujo volumétrico del gas [m^3/s]

De la tabla 2.6 se toma como referencia la relación liquido-gas y se elige $L/G = 0.8 [l/m^3]$ para determinar el flujo volumétrico del líquido de la siguiente manera:

$$Q_L = \frac{L}{G} * Q_G \quad (2.9)$$

Tabla 2.7 Característica del líquido de lavado

Líquido a utilizarse:	Agua potable (en recirculación)		
Flujo del líquido de lavado:	$Q_L =$	2.76E-03	m^3 / s
Temperatura:	$T =$	38	$^{\circ}C$
Densidad del líquido:	$\rho_L =$	0.987	g / cm^3
Viscosidad del líquido:	$\mu_L =$	0.00769	poise
Tensión superficial:	$\sigma =$	70.9	dina / cm

2.3.3 Caída de presión en el lavador Venturi

Determinar la caída de presión en el dispositivo es la parte más importante ya que con este se determinará la energía requerida para que el fluido pase por el lavador. Para hallar la caída de presión se requiere conocer el

número de Reynolds (ecuación 2.10) en función del diámetro de las gotas del líquido lavado.

$$Re_D = \frac{\rho_G * V_G * d_d}{\mu_G} \quad (2.10)$$

También se determinará el coeficiente de arrastre, ecuación (2.11)

$$C_D = \frac{24}{Re_D} + \frac{4}{Re_D^{1/3}} \quad (2.11)$$

Con esto, podemos determinar la longitud óptima de la garganta del lavador Venturi l_t , ecuación (2.12)

$$l_t = \frac{2 * d_d * \rho_L}{C_D * \rho_G} \quad (2.12)$$

La caída de presión se la determinara con la siguiente ecuación (2.13):

$$\Delta P = 2 * \rho_L * V_G^2 * \left(\frac{Q_L}{Q_G}\right) * (1 - X^2 + \sqrt{X^4 - X^2}) \quad (2.13)$$

El valor de X es la longitud adimensional de la garganta la cual se calcula por medio de la siguiente ecuación (2.14):

$$X = \frac{3 * l_t * C_D * \rho_G}{16 * d_d * \rho_L} + 1 \quad (2.14)$$

2.3.4 Tamaño de partícula y eficiencia de remoción

Como las partículas que se presentan en situaciones reales no tienden a ser esféricas por lo que se usa el concepto de diámetro aerodinámico que básicamente es usar el diámetro que tendría una partícula esférica de densidad igual al agua. Estas partículas emitidas en una descarga gaseosa por lo general tienen diámetros aerodinámicos variados, por lo que se usan

rangos para clasificarlos, obteniéndose la distribución de tamaño de partícula.

La eficiencia de remoción varía dependiendo del rango de tamaño de partícula por lo que es necesario expresar tal eficiencia para cada uno de los rangos. Para una distribución de tamaños de partículas con j rangos, la eficiencia global de remoción n_0 será igual a la suma de las eficiencias de cada rango.

$$n_0 = \sum n_j \cdot m_j \quad (2.15)$$

Donde:

n_j = eficiencia de remoción para el j – ésimo rango

m_j = masa en porcentaje del j – ésimo rango

Entonces la cantidad de material particulado que se puede remover en el lavador estará relacionada con la eficiencia global por la siguiente ecuación.

$$n_0 = \frac{m_{entrada} - m_{salida}}{m_{entrada}} * 100 \quad (2.16)$$

Donde m es el flujo másico de la carga de partículas.

Parámetro de impacto.

Este parámetro describe el comportamiento del impacto inercial, si este valor es alto quiere decir que existirá una gran cantidad de partículas que impactarán las gotas del fluido de lavado, así mismo si este valor es pequeño las partículas tenderán a seguir las líneas de flujo alrededor de las gotas y la remoción será pobre. Este parámetro está dado por la siguiente ecuación (2.17)

$$K_p = \frac{d_a^2 * V_p}{9 * \mu_g * d_d} \quad (2.17)$$

Donde:

V_p = velocidad de partícula = velocidad del vapor [cm/s]

d_d = diámetro de las gotas [cm]

μ_g = viscosidad del gas [$poise$]

d_a = diámetro aerodinámico de partícula [cm] = $55 \times 10^{-4} cm$

Penetración

Las partículas que no logran ser removidas en el lavador Venturi están definidas como P_t la cual es la penetración de las mismas por el Venturi, está relacionada con la eficiencia de remoción, ecuación (2.18).

$$P_t = 1 - n_0 \quad (2.18)$$

Existen varias ecuaciones para determinar esta penetración P_t pero la más completa es la que fue desarrollada por Calvert (1972) ecuación (2.19)

$$P_t = EXP \left\{ \frac{Q_L * V_G * \rho_L * d_d}{55 * Q_G * \mu_G} * \left[-0.7 - K_p * f' + 1.4 LN * \left(\frac{K_p * f' + 0.7}{0.7} \right) + \frac{0.49}{0.7 + K_p * f'} \right] * \frac{1}{K_p} \right\} \quad (2.19)$$

Donde

K_p = *parámetro de impacto*

f' = *factor empírico*

Para el factor empírico se usa 0.25 en partículas hidrofóbicas y 0.50 en partículas hidrofílicas

Sin embargo, mediante datos experimentales se ha determinado que un lavador Venturi es 100% eficiente para partículas mayores a $5 \mu m$ y para partículas menores a este valor se relacionaba con la caída de presión mediante la siguiente ecuación.

$$P_t = 3.47 * (\Delta P)^{-1.43} \quad (2.20)$$

Para partículas menores a $5 \mu m$ se recomienda hacer uso de la ecuación que está en función del parámetro de impacto K_p , por lo que dependiendo del diámetro aerodinámico que se analice se escogerá la ecuación a usar.

Finalmente, la eficiencia de remoción se la puede determinar con la siguiente formula:

$$\eta = 1 - P_t \quad (2.21)$$

2.4 Sistema Hidráulico.

Es necesario realizar los cálculos respectivos para la selección de la bomba, para la distribución y recepción del líquido de lavado. También se ha establecido componentes hidráulicos tales como tanques, tuberías que van del tanque al Venturi que contiene una cámara rociadora, de la misma forma en la torre de absorción, como se muestra en la figura 2.1.

2.4.1 Selección de bomba.

Se debe calcular la caída de presión en el sistema para seleccionar la bomba.

Entre la cámara rociadora y el Venturi se requiere un caudal de 36.46 GPM, para esto se utilizará la ecuación de energía (2.22).

$$\frac{P_4}{\gamma_4} + \frac{v_4^2}{2g} + Z_4 + h_p = \frac{P_2}{\gamma_2} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2 + h_f + h_L \quad (2.22)$$

La densidad del agua a una temperatura de 38°C (salida del tubo principal del proceso) es de $0.9871 \frac{gr}{cm^3}$ y la viscosidad del agua es $7.69 \times 10^{-3} Poise$. P_2 Se la expresa como la caída de presión cuando el vapor circula por la garganta del Venturi calculada para que sea mayor la caída de presión del agua en ese punto. Ver figura 2.3

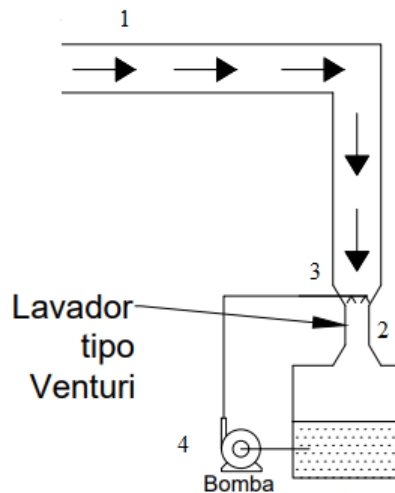


Figura 2.3 Secciones para cálculos de pérdidas

Se necesitará calcular las pérdidas mayores, así como las menores por lo que se usarán las siguientes ecuaciones:

Pérdidas mayores

$$h_f = f \frac{l V^2}{D 2g} \quad (2.23)$$

$$l \approx 10m$$

$$D_{int} = 0.05248 m$$

Para hallar f , se necesita primero calcular el número Reynolds ecuación (2.24) en función del diámetro de la sección transversal de la tubería de agua.

$$Re = \frac{\rho * V * D}{\mu} \quad (2.24)$$

El factor de fricción f , se lo encuentra en el diagrama de Moody, rugosidad del hierro galvanizado es $\varepsilon = 0.0002$

Pérdidas Menores

Las pérdidas por accesorios o fricción en la tubería se las pueden hallar con la siguiente ecuación

$$h_L = K_L \frac{V^2}{2.g} \quad (2.25)$$

Se requiere para el circuito hidráulico 4 codos de 2"x90, 3 tee de 4", 3 válvulas de compuerta de 2", dos reducciones de 2" a 1".

$$\sum K_L = 3K_{valvulas} + 4K_{codos} + 3K_{tee} + 2K_{reducciones}$$

Finalmente, para seleccionar la bomba, aplicamos la siguiente ecuación:

$$HP = \frac{Q * h_p}{76 * \alpha} \quad (2.26)$$

Donde:

HP = Caballos de fuerza

h_p = Carga total de la bomba

Q = Caudal en l/min

α = Eficiencia de la bomba

2.5 Diseño de torre de absorción rellena para el control de olores

Para el diseño de la torre de absorción se necesita determinar dos valores importantes los cuales son diámetro de la torre y su respectiva altura.

2.5.1 Balance de masas

Debido a que la trimetilamina se encuentra muy diluida en la corriente gaseosa, se puede utilizar la ley de Henry para determinar las condiciones de equilibrio el sistema agua – trimetilamina:

$$C = HPy^* \quad (2.27)$$

Donde C es la concentración molar de trimetilamina en el líquido, H es la constante de Henry, la cual corresponde a $9.6 \text{ mol/L} * \text{atm}$ (Christie & Crisp, 1967), y es la fracción molar de la trimetilamina en el aire y P es la presión de operación.

La ecuación de operación de la torre resulta de un balance de masa o molar de trimetilamina:

$$LC = G(y - y_1) \quad (2.28)$$

Donde L es el flujo volumétrico de agua, G es el flujo molar de la corriente gaseosa y y_1 es la concentración de salida de la trimetilamina. Para el flujo mínimo de líquido las condiciones de equilibrio y operación son iguales en la cola de la torre de absorción:

$$HPy_2 = \frac{G}{L_{min}}(y_2 - y_1) \quad (2.29)$$

Reordenando:

$$L_{min} = \frac{G}{HP} \left(1 - \frac{y_1}{y_2} \right)$$

Si se trabaja con un flujo de líquido igual a 1.1 veces el flujo de líquido mínimo, una presión de 1 atm y considerando una remoción del 90% de trimetilamina de la corriente gaseosa se tiene:

$$\left(1 - \frac{y_1}{y_2}\right) = 0.9$$

2.5.2 Caída de presión

La caída de presión en la torre de absorción por unidad de altura cuando ocurre inundación en la misma se puede estimar mediante (Kister & Gill, 1991):

$$\Delta P = 0.115 F_p^{0.7} \quad (2.30)$$

Donde ΔP está en $in H_2O/ft$ y F_p es el factor de empaquetamiento en ft^{-1} . Utilizando el empaque "Nor-pac" de plástico y de 1 pulgada, se tiene un factor de empaquetamiento de $25 ft^{-1}$ (Ludwig, 1997).

$$\Delta P = 0.115 * 25^{0.7} = 1.09 \text{ in } H_2O/ft$$

2.5.3 Diámetro de torre de absorción

Para calcular el diámetro de la torre se utilizó la figura (2.4), la cual relaciona el factor de flujo, la caída de presión de inundación y el factor de capacidad (Strigle, 1994):

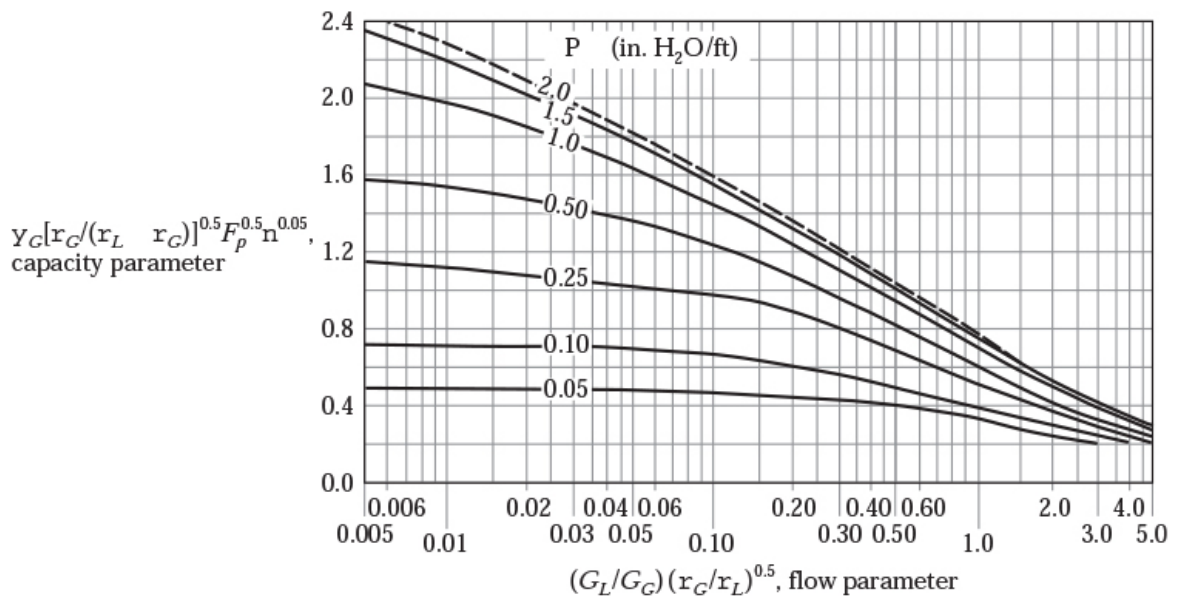


Figura 2.4 Factor de capacidad vs factor de flujo

$$F_f = \frac{G_L}{G_G} \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}} = \frac{L}{M_A G} \sqrt{\rho_L \rho_G} \quad (2.31)$$

$$F_c = \frac{G_G}{\rho_G} \left(62.4 \frac{\mu_L}{\rho_L} \right)^{0.05} \sqrt{\frac{F_p}{\frac{\rho_L}{\rho_G} - 1}} \quad (2.32)$$

Donde F_f es el factor de flujo, G_L es el flujo másico del líquido por unidad de área, G_G es el flujo másico del gas por unidad de área en lbm/ft^2s , ρ_G y ρ_L son las densidades del gas y líquido respectivamente, en lbm/ft^3 , M_A es la masa molar del aire, F_c es el factor de capacidad, μ_L es la viscosidad dinámica del líquido en cp, F_p es el factor de empaquetamiento en ft^{-1} .

Utilizando el 70% del flujo molar gaseoso por unidad de área se tiene:

$$A = \frac{M_A G}{0.7 G_G} \quad (2.33)$$

Donde A es el área transversal de la torre, la cual se obtiene con un diámetro de:

$$d = 2\sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (2.34)$$

2.5.4 Altura de empaque

De acuerdo con un estudio realizado sobre la cinética de la absorción de trimetilamina en una solución de hipoclorito de sodio, se reporta un coeficiente de transferencia de masa de $1870 \text{ kmol}/\text{m}^3 \text{ hatm}$ para la siguiente relación (Abe, Hagiwara, & Machida, 1979):

$$\frac{n_{\text{HClO}_3}}{n_{(\text{CH}_3)_3\text{N}}} \geq 14$$

Donde n_{HClO_3} es el flujo molar de hipoclorito de sodio en el líquido y $n_{(\text{CH}_3)_3\text{N}}$ es el flujo molar de trimetilamina en el aire. Abe aconseja una relación molar de 18 para que mantener el coeficiente de transferencia de masa en el valor reportado en toda la torre de absorción. Para dicha relación molar se tiene una concentración de hipoclorito de sodio en el solvente de:

$$C_{\text{HClO}_3} = 18 \frac{n_{(\text{CH}_3)_3\text{N}}}{L}$$

Para determinar la altura de la torre, se realiza un balance diferencial de trimetilamina:

$$Gdy = PK_{Ga}A(y - y^*)dz \quad (2.35)$$

$$z = \frac{G}{PK_{Ga}A} \int_{y_1}^{y_2} \frac{dy}{(y - y^*)} \quad (2.36)$$

Donde z es la altura de la torre, K_{Ga} es el coeficiente de transferencia de masa volumétrico, y_2 es la fracción molar de trimetilamina en la corriente gaseosa en la salida de la torre, y_1 es la fracción molar de trimetilamina en

la corriente gaseosa a la entrada de la torre, y^* es la fracción molar de trimetilamina en equilibrio con el líquido.

Utilizando la ecuación de Henry (2.24) y la ecuación anterior se tiene:

$$y - y^* = y - \frac{C}{HP} = y - \frac{G}{HPL}(y - y_1) = \left(1 - \frac{G}{HPL}\right)y + \frac{Gy_1}{HPL}$$

Reemplazando en (2.31), se tiene:

$$Z = \frac{G}{PK_{Ga}A} \int_{y_1}^{y_2} \frac{dy}{\left(1 - \frac{G}{HPL}\right)y + \frac{Gy_1}{HPL}} = \frac{G}{PK_{Ga}A\left(1 - \frac{G}{HPL}\right)} \ln \frac{\left(1 - \frac{G}{HPL}\right)y_2 + \frac{Gy_1}{HPL}}{y_1} \quad (2.37)$$

2.6 Sistema de Aspiración

Con la finalidad de evaluar el flujo volumétrico de aire en el conducto de transporte de material particulado (harinas de mezcla) hacia el sistema de diseño, se determinan los valores promedio de la velocidad y la presión dinámica de la corriente de aire.

La determinación de la extracción del aire se realizó en un punto paralelo al ducto. Para el efecto se utilizó el accesorio TUBO PITOT del multímetro (Airdata Multimeter – Shorthidge Instruments), el cual reporta 16 valores de velocidad dados en ft/min.

Tabla 2.8 Medición de velocidad de extracción

N°	MEDICIÓN
1	3454
2	3327
3	3252
4	3271
5	3315
6	3204
7	3352
8	2942
9	3100
10	2897
11	3248
12	2659
13	2121
14	1706
15	1621
16	1822

VELOCIDAD TOTAL PROMEDIO DE AIRE: 2831 ft/min

Área: 0.20 metros cuadrados = 2.15 pies cuadrados

CFM: Área x Promedio de la Velocidad

CFM: 2.15 x 2831

Caudal: 6086.65 CFM

Temperatura: 38 °C

Presión: 1 atm

2.6.1 Verificación de la Potencia del motor

Actualmente el diámetro del conducto de transporte de polvo y aire al ciclón es de 450 mm. La velocidad promedio del flujo de aire en el conducto es de 14.38m/s.

Esta velocidad sirve para seleccionar la potencia del motor del succionador de aire, o bien para comprobar que el motor es lo suficientemente adecuado para manejar el flujo y caída de presión esperados

$$Pot = \gamma_a * G_a * \Delta h_a \quad (2.38)$$

Donde:

Pot: Potencia del ventilador

γ_a : peso específico del aire (kgf/Nm³)

G_a : Caudal de aire (Nm³/h)

Δh_a : Caída de presión total en cm. de aire

$$\gamma_a = \delta_a * g \quad (2.39)$$

$$\Delta h_a * \gamma_a = \Delta h_w * \gamma_w \quad (2.40)$$

$$\gamma_w = \delta_w * g \quad (2.41)$$

Donde:

δ_a : densidad del aire (kg/Nm³)

Δh_w : caída de presión total en cm. de agua

γ_w : peso específico del agua (kgf/Nm³)

g : gravedad (m/s²)

Reemplazando las variables se obtiene que,

$$Pot = G_a * \Delta h_w * \delta_w * g \quad (2.42)$$

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Diseño de lavador Venturi

3.1.1 Dimensiones lavador Venturi

Para el dimensionamiento del lavador Venturi se necesitó determinar el flujo molar el cual nos dio:

$$n = 405147.27 \text{ mol/h}$$

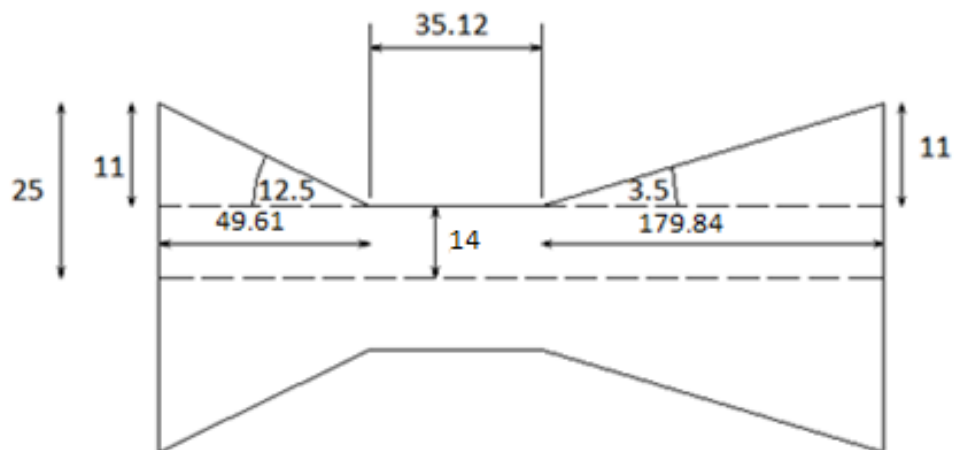


Figura 3.1 Dimensiones lavador Venturi

El dispositivo será colocado en posición vertical, y se inyectará el líquido de lavado alrededor de la zona donde comienza la garganta; el gas ingresará por el lado de la zona convergente. Con la nomenclatura y en base a cálculos de diseño, las dimensiones del aparato son las que se muestran en la tabla 3.1

Tabla 3.1 Dimensión del lavador tipo Venturi

Diámetro de la garganta:	28 cm
Diámetro de Sauter para las gotas:	126.44 μm
Diámetro de la entrada:	50 cm
Diámetro de la salida:	50 cm
Reducción en el radio de ingreso:	11 cm
Ángulo de convergencia:	12.5°
Longitud de la zona convergente:	55.3 cm
Incremento en el radio de salida:	11 cm
Ángulo de divergencia:	3.5°
Longitud de la zona divergente:	200 cm
Longitud de la garganta:	35.12 cm
Longitud total del Venturi:	290.42 cm

El líquido de lavado será agua, el agua no se desperdicia, pues se recircula hasta que el contenido de sólidos en el tanque de reciclaje sea cercano al 20%; después de haber alcanzado ese límite, se limpia el tanque por completo, lo cual puede darse dentro de un lapso superior a 1 semana. Se asume que la temperatura del agua se equilibra en el valor de saturación adiabática.

3.1.2 Caída de presión en el lavador Venturi

En el lavador Venturi, la caída de presión depende del flujo del líquido y del gas a tratarse, además de la geometría del aparato.

Según los cálculos realizados la caída de presión en el lavador Venturi nos da un valor de:

$$\Delta P = 1359.682 \text{ Pa}$$

3.1.3 Tamaño de partícula y eficiencia de remoción

Un lavador Venturi es esencialmente 100% eficiente para tamaños de partícula superiores a 5 μm , por ello las ecuaciones que se utilizan en los cálculos difieren de acuerdo al rango.

Tabla 3.2 Eficiencia de remoción lavador de partícula

Rango (μm)	d_{pm} (μm)	m (%)	K_p	P_t	η	$\eta_j * m_j$
0 - 0.625	0.3125	31.1	0.19	0.295	0.705	21.92
0.625 - 1	0.8125	4.3	1.31	0.295	0.705	3.03
1 - 2.5	1.75	7.9	6.1	0.295	0.705	5.57
2.5 - 5	3.75	8.7	27.88	0.295	0.705	6.13
5 - 10.0	7.5	13	111.53	0.282	0.718	9.33
10 - 100	55	35	6087	0.208	0.792	27.72
					$\eta = 72$	

En la tabla 2.9 se presenta el cálculo de la eficiencia de remoción de partículas utilizando las ecuaciones descritas, y utilizando la distribución de tamaño de partícula presentada en esta sección. Por lo tanto, la eficiencia de remoción del lavador Venturi es:

$$\rightarrow \eta = 72 \%$$

3.1.4 Selección de Bomba

Mediante cálculos se determinó que por las pérdidas que existen en el sistema se necesitara una bomba centrífuga de 3HP para que funcione eficientemente.

3.2 Torre de absorción

Para hallar la tasa de emisión de vapores orgánicos volátiles en la descarga gaseosa, se recurre a los factores de emisión publicados por la EPA en el documento AP42, se selecciona el factor correspondiente al proceso de cocción del pescado fresco en plantas de harina de pescado.

$$\text{Factor de emisión (Kg/Mg)} = 0.150$$

$$\text{Flujo de producción (mg/h)} = 0.174$$

$$\text{Tasa de emisión} = \text{Factor de emisión} * \text{Flujo de producción} = (0.150) \times (0.174)$$

$$\text{Tasa de emisión} = 0.0261 \text{Kg/h}$$

Los parámetros bajo los cuales se diseña la torre de absorción se muestran en la tabla 3.3

Tabla 3.3 Parámetros de Diseño de la Torre de Absorción

Contaminante principal a removerse:	Trimetilamina (CH ₃) ₃ N
Líquido solvente:	Hipoclorito de sodio en agua
Flujo molar del gas:	405147.27 mol / h
Flujo molar de contaminante	0.442 mol / h
Eficiencia de remoción requerida:	90 %
Presión de operación:	1.01E+05 N / m ²
Temperatura de operación:	38 °C

Para proceder al diseño del dispositivo, se necesita conocer las propiedades tanto del contaminante principal a removerse, como del gas portador (en este caso aire) y del líquido a utilizarse. La mayor parte de la solución acuosa es agua, y de forma similar, la mayor parte del gas a tratarse es aire, razón por la cual se pueden tomar sus respectivas propiedades.

Tabla 3.4 Propiedades de las sustancias involucradas

Propiedades de la corriente gaseosa contaminada	
Densidad:	$\rho_G = 1.03 \text{EXP} - 3 \text{ gr} / \text{cm}^3$
Viscosidad:	$\mu_G = 2.04 \text{EXP} - 4 \text{ poise}$
Peso molecular:	$MW_G = 28.95 \text{ g} / \text{mol}$
Propiedades del solvente	
Tipo de solvente:	NaOCl en agua
Densidad:	$\rho_L = 62.13 \text{ lb} / \text{ft}^3$
Peso molecular:	$MW_L = 18 \text{ g} / \text{mol}$
Viscosidad:	$\mu_L = 78 \text{EXP} - 4 \text{ poise}$
Densidad del agua:	$\rho_{\text{agua}} = 0.987 \text{ gr} / \text{cm}^3$

3.2.1 Caída de presión

Los parámetros a utilizar para el cálculo de la caída de presión son:

Tabla 3.5 Parámetros para el cálculo de la Caída de presión

Constante de Henry	$H = 9.6 \text{ mol/L} * \text{atm}$
Presión de operación	$P = 1 \text{ atm}$
Remoción de Trimetilamina	90%
Flujo mínimo de Líquido	$L_{\text{min}} = 39.88 \text{ m}^3/\text{h}$
Factor de empaquetamiento	$FP = 25$

Obtenemos una caída de presión con el siguiente valor de:

$$\Delta P = 0.115 * 25^{0.7} = 1.09 \text{ in } H_2O / \text{ft}$$

3.2.2 Diámetro

En este caso se ha utilizado el 70% de flujo molar gaseoso por unidad de área, para un flujo de hipoclorito de sodio en agua de 39.88 m³/h.

Con esto de acuerdo a los cálculos realizados en el Anexo, obtenemos un área de 1.61m², Con el área se procede a calcular el diámetro de la torre de absorción:

$$D = 1.42 \text{ m}$$

En el caso de límites de emisión adecuados para el control de olores, se debe señalar que es un tema complejo, pues no todas las personas pueden percibir los mismos olores a las mismas concentraciones; existirán unas que captarán el olor a bajas concentraciones, mientras otras comenzarán a percibir el olor mucho tiempo después. La OSHA menciona al respecto que se han reportados valores de percepción de este tipo de olores, en un rango que va de 0.0004 ppm a 0.8 ppm.

3.2.3 Altura

La altura del lecho relleno viene dada en función de la variación de concentración deseada, y la capacidad del gas para difundirse en la fase

gaseosa; la reacción química hace innecesario el cálculo de la difusividad en la fase líquida, pues la resistencia en esa fase es nula debido a la presencia del reactivo químico.

Para determinar la altura de la torre, se realiza un balance diferencial de trimetilamina, la fracción molar de trimetilamina en la corriente gaseosa a la entrada de la torre es de $1.09 * 10^{-6}$, debido a que se desea remover el 90% de este contaminante, la fracción molar del mismo en la salida será de $1.09 * 10^{-7}$. Por consiguiente, la altura de la torre es:

$$Z = 1.71 \text{ m}$$

3.3 Sistema de Aspiración

3.3.1 Verificación de la Potencia del motor

Actualmente el diámetro del conducto de transporte de polvo y aire al ciclón es de 450 mm. La velocidad promedio del flujo de aire en el conducto es de 14.38m/s.

Si el flujo de mezcla aire y material particulado es transportado por el conducto de sección circular de diámetro 0.450 m. (0.20 m^2), con una velocidad de 14.38 m/s, y la caída de presión total de 0.47 m. de columna de agua, se obtiene lo siguiente:

$$G_a = 0.20 \text{ m}^2 * 14.38 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$G_a = 2.88 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Reemplazando en la ecuación de la potencia se obtiene:

$$\text{Pot} = (2.88 \text{ m}^3/\text{s}) (1.19 \text{ m.}) (1,000 \text{ kg/m}^3) (9.8 \text{ m/s}^2) (1\text{Kw}/1,000 \text{ watts})$$

$$\text{Pot} = 13.27 \text{ HP}$$

Considerando una eficiencia del motor/ventilador de 0.7, la potencia requerida para el ventilador es:

$$\text{Pot} = 13.27 \text{ HP} / 0.7 = 18.95 \text{ HP}$$

Por lo tanto, la potencia del motor requerida para acoplar un ventilador, que transporte a una velocidad de 14.38 m/s, y que produzca una caída de presión de 0.47 m. de columna de agua es de aproximadamente 20 HP, con lo cual se concluye que tanto el ducto, como el ventilador existente, pueden ser utilizados en el nuevo diseño.

3.4 Simulación

3.4.1 Lavador Venturi

Para el lavador Venturi se realizó una simulación en Solidwork para verificar la caída de presión que existía en el Venturi y sus respectivos cambios de velocidad.

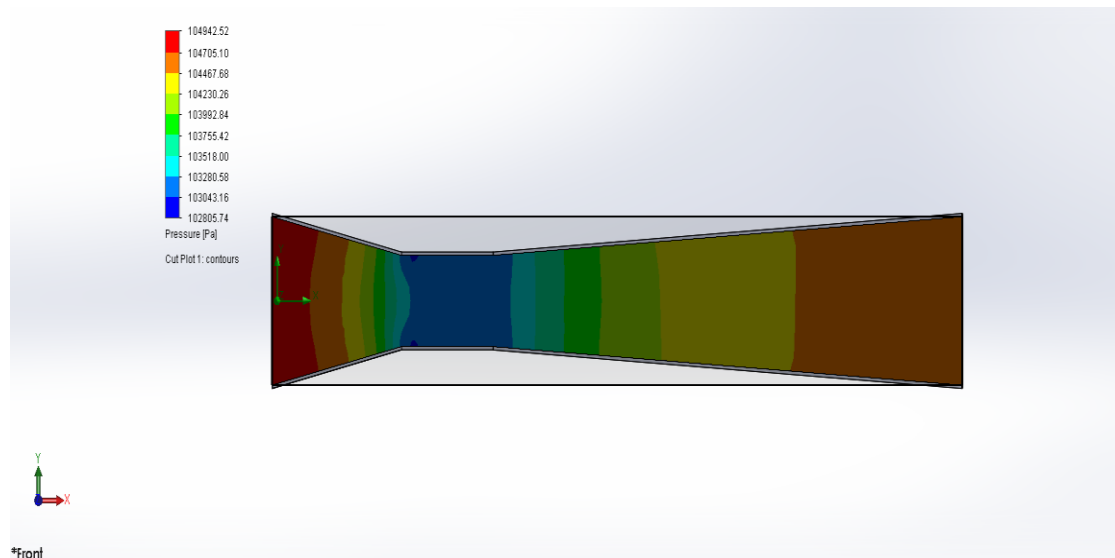


Figura 3.2 Caída de Presión

Como se puede observar existe una ligera caída de presión en el lavador Venturi la cual es de 1359.68 [Pa] ya que la presión de entrada es de 105942.68 [Pa] y de salida es de 104583 [Pa].

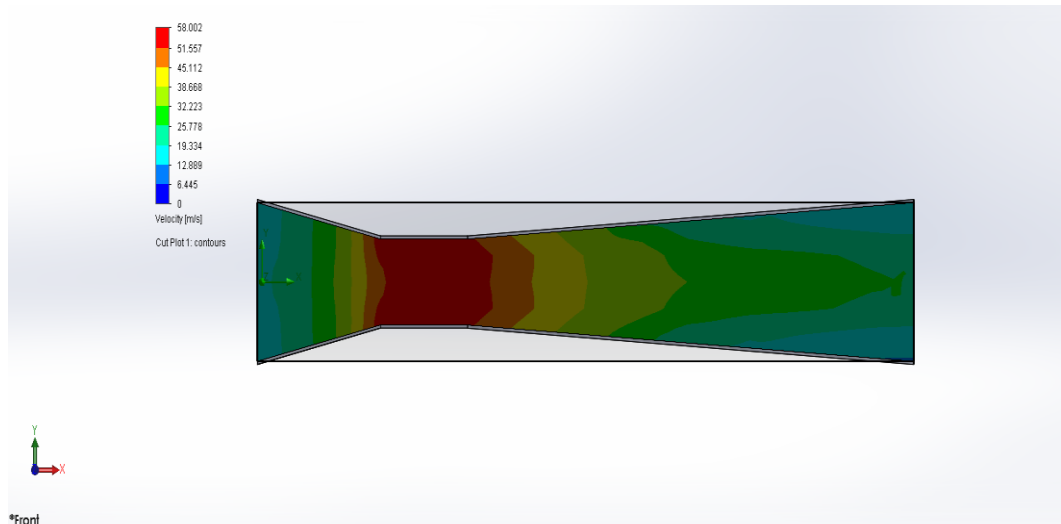


Figura 3.3 Variación de velocidad

También se puede observar como la velocidad del fluido aumenta en la garganta y disminuye conforme alcanza la salida del Venturi.

3.4.2 Torre de absorción

Para la torre de absorción se realizó una simulación de la misma para comprobar que la remoción del compuesto trimetilamina era correcto y que en verdad existía una reducción del mismo en los vapores. Se simuló la torre de absorción con las entradas de: agua (1) y vapores (3), y las salidas de: agua + hipoclorito de sodio (2) y vapores lavados (4).

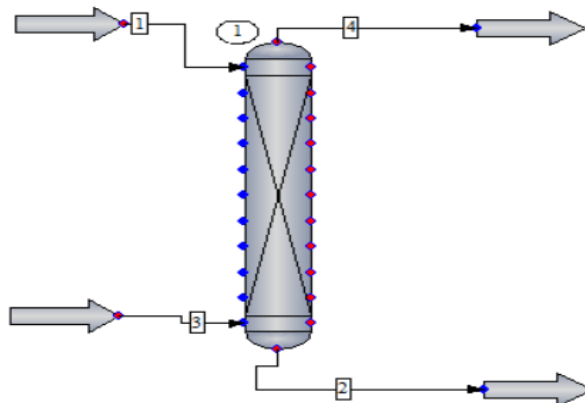


Figura 3.4 Torre de absorción

Los resultados fueron que en el punto 3 se tenía una cantidad de $0.0261 \left[\frac{kmol}{h} \right]$ de trimetilamina y en el punto 4 se logro obtener una cantidad

de $0.0013 \left[\frac{\text{kmol}}{\text{h}} \right]$, ya que la trimetilamina extraída salió en el punto 2 junto con el agua y el hipoclorito de sodio, en una cantidad de $0.0248 \left[\frac{\text{kmol}}{\text{h}} \right]$.

También se puede observar la caída de presión que existe en la torre de absorción la cual es de 3258 [Pa] ya que a la entrada tenemos una presión de 104583 [Pa] y a la salida la presión atmosférica 101325 [Pa] .

Los resultados de la simulación se pueden revisar en la sección ANEXOS.

3.5 Análisis de costos

En el presente proyecto se calculará los costos que representa un rubro muy importante para los materiales y procesos requeridos tanto para la elaboración del lavador húmedo tipo Venturi como para la Torre de Absorción. Por lo que es necesario implementar un análisis de costos e incluir la mano de obra requerida para la ejecución del proyecto. Para efectuar este análisis hemos dividido a los costos en dos grandes grupos: costos directos y costos indirectos.

3.5.1 Costos Directos

Son los montos de acuerdo a su actividad o función como son los costos de instalación, montaje y materiales.

Costos de Materiales

Este rubro representa la adquisición de elementos puntuales que pueden pasar o no por un proceso de fabricación, para la construcción de ductos, Venturi y torre de absorción.

Tabla 3.6 Descripción detallada de materiales para construcción del proyecto

Costo de Materiales				
Descripción	Cantidad	Unidad	Costo Unitario	Total
Sistema Hidráulico				\$ 1.115,94
Tubo de 2" cedula 40 H/N	6	Unidades	\$ 52,24	\$ 313,44
Válvula de bola de 2" roscable H/N	8	Unidades	\$ 65,00	\$ 520,00
Rollo de Teflón	20	Unidades	\$ 1,25	\$ 25,00
Permatex Rojo 3ONZ	10	Unidades	\$ 3,75	\$ 37,50
Codos de 90° roscable 2" en H/N	10	Unidades	\$ 22,00	\$ 220,00
Ductos de ventilación				\$ 4.591,50
Plancha en A/I de 2mm	20	Unidades	\$ 176,00	\$ 3.520,00
Disco de corte de 7"	25	Unidades	\$ 1,70	\$ 42,50
Electrodo de soldadura 308L	5	Kilogramos	\$ 45,00	\$ 225,00
Viga IPE160	6	Unidades	\$ 134,00	\$ 804,00
Lavador Venturi				\$ 5.126,50
Disco de corte de 7"	25	Unidades	\$ 1,70	\$ 42,50
Plancha en A/I de 3mm	12	Unidades	\$ 271,00	\$ 3.252,00
Electrodo de soldadura 308L	8	Kilogramos	\$ 45,00	\$ 360,00
Viga IPE200	8	Unidades	\$ 184,00	\$ 1.472,00
Torre de Absorción				\$ 13.996,50
Viga IPE200	8	Unidades	\$ 184,00	\$ 1.472,00
Disco de corte de 7"	25	Unidades	\$ 1,70	\$ 42,50
Plancha en A/I de 3mm	22	Unidades	\$ 271,00	\$ 5.962,00
Electrodo de soldadura 308L	6	Kilogramos	\$ 45,00	\$ 270,00
Cámara rociadora	2	Unidades	\$ 3.125,00	\$ 6.250,00
Bomba centrifuga 3HP	2	Unidades	\$ 635,00	\$ 1.270,00

Costos de construcción e instalación

Este rubro representa la mano de obra requerida para la construcción e instalación del sistema hidráulico, ductos, lavador Venturi y torre de absorción.

Tabla 3.7 Costos por construcción e instalación

Mano de obra	Cantidad	Tiempo (h)	\$ Costo/hora	Total
Soldador	2	40	\$ 5,00	\$ 400,00
Mecánico	1	40	\$ 5,00	\$ 200,00
Ayudantes	3	40	\$ 3,00	\$ 360,00
			TOTAL	\$ 960,00

3.5.2 Costos Indirectos

Los costos indirectos son aquellos que no se identifican durante el proceso de fabricación y estos son: costo de transporte y costos por imprevistos.

Costos de Transporte

Son los rubros que representan el traslado o movilización de los materiales de un lugar a otro. Donde tomaremos un monto de \$ 750.

Costos por imprevistos

Este rubro representa un monto destinado para cubrir situaciones imprevistas como problemas en la logística, alimentación etc. En nuestro caso asumiremos el 3% de los costos directos, que corresponde a un valor de \$ 744,80.

3.5.3 Costos Totales

Los costos totales representan la suma de los costos directos más los costos indirectos, que nos da un valor de \$ 28.554,94 para la construcción del sistema hidráulico.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- El sistema lavador de vapores logra remover partículas en el lavador Venturi con una eficiencia del 72%, también logra remover el compuesto de trimetilamina que es responsable del mal olor en el aire, se reduce su concentración en la torre de absorción con una eficiencia del 90%.
- A la entrada del tren lavador de vapores y remoción de partículas, se coloca un ventilador de 20 HP el cual proporciona la presión necesaria de 105942.68 [Pa] para superar las caídas de presiones existentes en el lavador Venturi y torre de absorción, ya que los vapores a la salida del sistema estarán a presión atmosférica. También se determinó necesario colocar bombas hidráulicas individuales para cada sistema de remoción que en este caso serían el lavador Venturi y la torre de absorción.
- A partir del diseño se determinó las concentraciones necesarias de hipoclorito de sodio a la entrada de la torre de absorción para que pueda existir una difusión de la trimetilamina en el aire hacia el hipoclorito de sodio en el agua.
- Las simulaciones de las dos partes importantes del sistema como son el lavador Venturi y la torre de absorción se las realizó en programas diferentes ya que para el Venturi se simuló la caída de presión en el flujo de aire, así como la variación de velocidad las cuales coincidieron con los cálculos realizados en el proyecto, mientras que en la torre de absorción se simuló la concentración de la trimetilamina en el aire para demostrar que existe una reducción del 90% de este.

4.2 Recomendaciones

- Si la planta cuenta con un sistema limpiador de aguas residuales, se recomienda que el flujo de agua en la torre de absorción no sea cerrado y así no se reutiliza el agua con hipoclorito de sodio hasta que se sature de trimetilamina, si no que llega un flujo de agua totalmente nuevo al cual se le agrega hipoclorito de sodio en bajas cantidades para realizar la limpieza de los vapores, y el fluido de salida de la torre se lo mande directamente a la central para limpiar aguas residuales.
- Debido a que la capacidad de producción podría aumentar, por lógicas razones la contaminación también aumentaría, para eso el enfriamiento de los vapores con la cámara rociadora se lo puede aplicar con mayor velocidad, cambiando el líquido de remoción (agua) con agua fresca y aumentando el flujo del líquido. Con esto las dimensiones del sistema no tendrán cambios, solo se requerirá graduar el paso del fluido con una válvula.
- Debido a que el relleno es plástico, no se requiere una estructura rígida para construir la torre de absorción. Por otro lado, para mantener el lecho relleno en su sitio sin que el gas lo arrastre, se debe colocar en la parte inferior una plancha perforada corrugada especialmente diseñada para torres de absorción, mientras que, en la parte superior, bastará con colocar sobre esta una malla metálica con espaciamiento menor a 3.5 pulgadas. En la parte superior del relleno, se coloca un sistema distribuidor del líquido, el cual consiste de tubos perforados. Sobre el distribuidor de líquido, se coloca una estructura fibrosa, conocida como eliminador de niebla, la cual sirve para retener las gotas finas que pudiera arrastrar el flujo del gas.
- Para que los equipos funcionen correctamente y mantener la seguridad tanto de los operadores como de los equipos, se deberá implementar un plan de mantenimiento preventivo.

BIBLIOGRAFÍA

Christie, A. O. and D. J. Crisp. Activity coefficients on the n-primary, secondary and tertiary aliphatic amines in aqueous solution. J. Appl. Chem., 17, 11-14, 1967.

Kister, H. Z., and Gill, D. R. Chem. Eng. Progr., 87 (Feb.), 32 (1991).

Ludwig, E. E. Applied Process Design for Chemical and Petroleum Plants, Vol. 2, 3rd ed. Houston: Gulf Publishing Company, 1997.

Strigle, R. F., Jr. Packed Tower Design and Applications: Random and Structured Packings, 2nd ed. Houston: Gulf Publishing Company, 1994.

EPA, Control of Particulate Emissions, Course APTI 413. Control of Particles by Mechanical Collectors, Handbook of Air Pollutions Technology. Eds. New York, Wiley, 1984.

Cooper C. D., Alley F. C., Air Pollution Control – A Design Approach (2nd ed.). Waveland Press, Inc., 1986.

Hesketh, H. E., Air Pollution Control, Ann Arbor Science Publishers, Inc., 1979.

Perry R. H.; Chilton C. H., Chemical Engineer's Handbook (Fifth Edition), McGraw Hill, Inc., 1973, pp. 3-104,3-105,18-51; 7th Edition: pp. 14-8,14-17 a 14-21.

American Conference of Governmental Industrial Hygienists, Industrial Ventilation A Manual of Recommended Practice (14th Edition), Edward Brothers Incorporated, 1976.

Wark K., Warner C. F., Davis W. T., Air Pollution Its Origin and Control (Third Edition), Addison Wesley Longman Inc., 1998.

EPA, Air Pollution Control Cost Manual, Sixth Edition
http://www.epa.gov/ttn/catc/dir1/c_allchs.pdf.

EPA, AP-42, Volume I Chapter 9, Appendix B, Fifth Edition.
<http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42.htm>.

ANEXOS

ANEXO A. CÁLCULOS

Dimensionamiento del lavador tipo Venturi

$$n = \frac{P \cdot Q}{R \cdot T} \quad (2.1)$$

Donde:

n = Flujo molar

P = Presión de 1 atm = 101300Pa

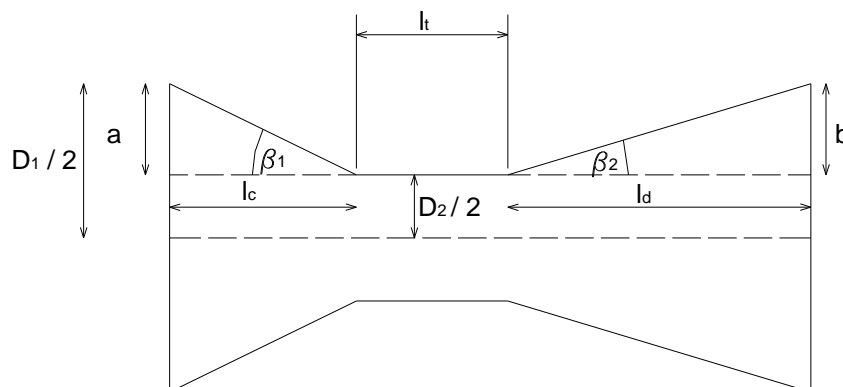
Q = Caudal promedio de entrada = 6086.65 CFM = 10341.27 m³/h = 2.87 m³/s

R = Constante de los vapores = $8.314 \frac{m^3 \cdot Pa}{mol \cdot K}$

T = Temperatura de vapor en el ducto = 38 °C

Reemplazando valores en la ecuación (2.1), tenemos:

$$n = \frac{P \cdot Q}{R \cdot T} = \frac{101300Pa \cdot 10341.27 \frac{m^3}{h}}{8.314 \frac{m^3 \cdot Pa}{mol \cdot K} \cdot 311 K}$$
$$n = 405147.27 \text{ mol/h}$$



El diámetro del ducto de entrada es de 50cm, por lo tanto, será el mismo diámetro de la zona convergente del lavador Venturi $D_1 = 50 \text{ cm}$

$$Q = V_G * A_2 \quad (2.2)$$

$$A_2 = \frac{Q}{V_G} = \frac{2.87 \frac{m^3}{s}}{46 \text{ m/s}}$$

$$A_2 = 0.062 \text{ m}^2$$

$$D_2 = \sqrt{\frac{4A_2}{\pi}} \quad (2.3)$$

$$D_2 = \sqrt{\frac{4A_2}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 * 0.062 \text{ m}^2}{3.1416}}$$

$$D_2 = 0.28 \text{ m} = 28 \text{ cm}$$

El valor de a lo hallamos con la siguiente ecuación:

$$a = \frac{D_1}{2} - \frac{D_2}{2} \quad (2.4)$$

Reemplazando valores en la ecuación (2.4)

$$a = \frac{50 \text{ cm}}{2} - \frac{28 \text{ cm}}{2}$$

$$a = 11 \text{ cm}$$

La longitud de zona convergente l_c :

$$l_c = \frac{a}{\tan \beta_1} \quad (2.5)$$

$$l_c = \frac{11}{\tan 12.5^\circ}$$

$$l_c = 49.61 \text{ cm}$$

El diámetro de salida de la zona divergente será la misma que la entrada al Venturi por la zona convergente, por lo que la longitud de zona divergente l_d es:

$$l_d = \frac{b}{\tan \beta_2} \quad (2.6)$$

$$l_d = \frac{11}{\tan 3.5^\circ}$$

$$l_d = 179.84 \text{ cm}$$

Líquido de lavado

$$d_d = \frac{58600}{V_G} * \left(\frac{\sigma}{\rho_L}\right)^{0.5} + 597 * \left(\frac{\mu_L}{(\sigma * \rho_L)^{0.5}}\right)^{0.45} * \left(1000 * \frac{Q_L}{Q_G}\right)^{1.5} \quad (2.8)$$

$$Q_L = \frac{L}{G} * Q_G \quad (2.9)$$

Reemplazando valores en la ecuación (2.8)

$$d_d = \frac{58600}{4600 \frac{cm}{s}} * \left(\frac{70.9 \frac{Dinas}{cm}}{0.9871 \frac{g}{cm^3}}\right)^{0.5} + 597 * \left(\frac{7.69 \times 10^{-3} \text{ poise}}{\left(70.9 \frac{Dinas}{cm} * 0.9871 \frac{g}{cm^3}\right)^{0.5}}\right)^{0.45} * \left(1000 * \frac{0.0023 \frac{m^3}{s}}{2.87 \frac{m^3}{s}}\right)^{1.5}$$

$$d_d = 126.44 \mu m$$

Caída de presión en el lavador Venturi

$$Re_D = \frac{\rho_G * V_G * d_d}{\mu_G} \quad (2.10)$$

$$Re_D = \frac{1.03 \times 10^{-3} \frac{g}{cm^3} * 4600 \frac{cm}{s} * 126.44 \times 10^{-4} cm}{2.04 \times 10^{-4} Poise}$$

$$Re_D = 293.66$$

También se determinará el coeficiente de arrastre, ecuación (2.11)

$$C_D = \frac{24}{Re_D} + \frac{4}{Re_D^{1/3}} \quad (2.11)$$

$$C_D = \frac{24}{293.66} + \frac{4}{293.66^{1/3}}$$

$$C_D = 0.69$$

Con esto, podemos determinar la longitud óptima de la garganta del lavador Venturi l_t , ecuación (2.12)

$$l_t = \frac{2 * d_d * \rho_L}{C_D * \rho_G} \quad (2.12)$$

$$l_t = \frac{2 * 126.44 \times 10^{-4} cm * 0.9871 \frac{g}{cm^3}}{0.69 * 1.03 \times 10^{-3} \frac{g}{cm^3}}$$

$$l_t = 35.12 \text{ cm}$$

La caída de presión se la determinara con la siguiente ecuación (2.13):

$$\Delta P = 2 * \rho_L * V_G^2 * \left(\frac{Q_L}{Q_G}\right) * (1 - X^2 + \sqrt{X^4 - X^2}) \quad (2.13)$$

El valor de X es la longitud adimensional de la garganta la cual se calcula por medio de la siguiente ecuación (2.14):

$$X = \frac{3 * l_t * C_D * \rho_G}{16 * d_d * \rho_L} + 1 \quad (2.14)$$

$$X = \frac{3 * 35.12 \text{ cm} * 0.69 * 1.03 \times 10^{-3} \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}{16 * 126.44 \times 10^{-4} \text{ cm} * 0.9871 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} + 1$$

$$X = 1.375$$

Reemplazando valores en la ecuación (2.13)

$$\Delta P = 2 * 0.9871 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} * (4600 \text{ cm/s})^2 * \left(\frac{0.0023 \text{ m}^3/\text{s}}{2.87 \text{ m}^3/\text{s}}\right) * (1 - 1.375^2 + \sqrt{1.375^4 - 1.375^2})$$

$$\Delta P = 13596.82 \text{ dinas/cm}^2$$

$$\Delta P = 5.46 \text{ in } H_2O$$

$$\Delta P = 1359.682 \text{ Pa}$$

Tamaño de partícula y eficiencia de remoción

Parámetro de impacto

$$K_p = \frac{d_a^2 * V_p}{9 * \mu_g * d_d} \quad (2.17)$$

$$K_p = \frac{(55 \times 10^{-4} \text{ cm})^2 * 4600 \text{ cm/s}}{9 * 2.04 \times 10^{-4} \text{ Poise} * 126.44 \times 10^{-4} \text{ cm}}$$

$$K_p = 6087$$

Penetración

$$P_t = EXP \left\{ \frac{Q_L * V_G * \rho_L * d_d}{55 * Q_G * \mu_G} * \left[-0.7 - K_p * f' + 1.4LN * \left(\frac{K_p * f' + 0.7}{0.7} \right) + \frac{0.49}{0.7 + K_p * f'} \right] * \frac{1}{K_p} \right\} \quad (2.20)$$

$$P_t = EXP \left\{ \frac{2300 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}} * 4600 \frac{\text{cm}}{\text{s}} * 0.9871 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} * 126.44 \times 10^{-4} \text{ cm}}{55 * 2870000 \text{ cm}^3/\text{s} * 2.64 \times 10^{-4} \text{ poise}} * \left[-0.7 - 6087 * 0.5 + 1.4LN * \left(\frac{6087 * 0.5 + 0.7}{0.7} \right) + \frac{0.49}{0.7 + 6087 * 0.5} \right] * \frac{1}{6087} \right\}$$

$$P_t = 0.208$$

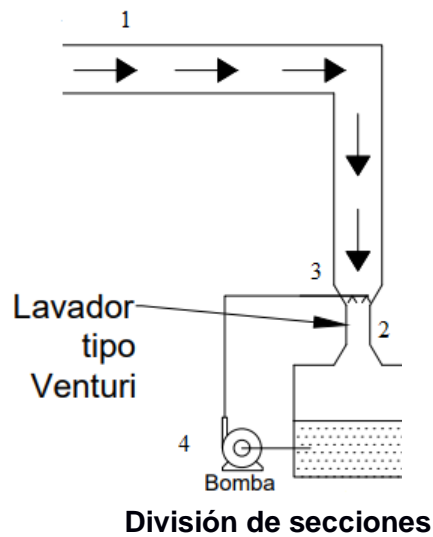
Eficiencia de remoción

$$\eta = 1 - P_t$$

$$\eta = 1 - 0.208 = 0.79$$

Sistema Hidráulico.

Selección de bomba.



Sección 1 – 3

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho \cdot V_1^2 + \gamma_1 Z_1 = P_3 + \frac{1}{2}\rho \cdot V_3^2 + \gamma_3 Z_3$$

$$V_1 = V_3$$

$$Z_3 = 0$$

$$P_3 = P_1 + \gamma_1 Z_1$$

Datos:

$$P_1 = 101325 \text{ Pa}$$

$$Z_1 = 6 \text{ m}$$

$$\gamma_1 = \text{Peso específico del gas} = \rho \cdot g = 1.14 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 11.17 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}^2}$$

$$P_3 = 101325 \text{ Pa} + 11.17 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}^2} * 6 \text{ m}$$

$$P_3 = 101392.02 \text{ Pa}$$

Sección 3 – 2

$$P_3 + \frac{1}{2}\rho \cdot V_3^2 + \gamma_3 Z_3 = P_2 + \frac{1}{2}\rho \cdot V_2^2 + \gamma_2 Z_2$$

$$Z_2 = 0$$

$$P_2 = 101392.02 + 0.5 * 1.14 * 14.38^2 + 1.14 * 9.8 * 0.50 - 0.5 * 1.14 * 46^2$$

$$P_2 = 100309.36 \text{ Pa}$$

Sección 2 – 4

$$\frac{P_4}{\gamma_4} + \frac{V_4^2}{2g} + Z_4 + h_p = \frac{P_2}{\gamma_2} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + h_f + h_L$$

Datos:

$$P_2 = 100309.36 \text{ Pa}$$

$$\gamma_4 = \gamma_2 = 9673.58 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2 \text{s}^2} \text{ peso especifico del agua}$$

$$Z_2 = 3.5 \text{ m}$$

Tubería en acero inoxidable de 2"

$$Q = \text{caudal} = 2.76 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 165.6 \frac{\text{l}}{\text{min}}$$

$$A = 0.0020 \text{ m}^2$$

$$V_2 = \frac{2.76 \times 10^{-2}}{0.0020} = 13.8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$V_4 = 0$$

$$Z_4 = 0$$

$$P_4 = \rho \cdot g \cdot h = 987.1 * 9.8 * 3.5 = 33857.53 \text{ Pa}$$

Pérdidas mayores

$$h_f = f \frac{l V^2}{D 2g} \quad (2.23)$$

$$l \approx 10m$$

$$D_{int} = 0.05248m$$

Para hallar f , se necesita primero calcular el número Reynolds ecuación (2.24) en función del diámetro de la sección transversal de la tubería de agua.

$$Re = \frac{\rho * V * D}{\mu} = \frac{987.1 * 13.8 * 0.05248}{7.69 \times 10^{-4}}$$

$$Re = 92962.49$$

El factor de fricción f , se lo encuentra en el diagrama de Moody, rugosidad del hierro galvanizado es $\varepsilon = 0.0002$.

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{0.0002}{0.05248} = 0.00381$$

El valor de f es 0.027

Reemplazando valores en la ecuación (2.23)

$$h_f = f \frac{l V^2}{D 2g} = 0.027 * \frac{10}{0.05248} \frac{1.38^2}{2 * 9.8}$$

$$h_f = 49.98m$$

Perdidas Menores

$$h_L = K_L \frac{V^2}{2g} \quad (2.25)$$

Se requiere para el circuito hidráulico 4 codos de 2"x90, 3 tee de 4", 3 válvulas de compuerta de 2", dos reducciones de 2" a 1".

$$\sum K_L = 3K_{valvulas} + 4K_{codos} + 3K_{tee} + 2K_{reducciones}$$

$$\sum K_L = 3 * 0.15 + 4 * 1.5 + 4 * 0.9 + 2 * 0.01$$

$$\sum K_L = 10.07$$

$$h_L = 10.07 \frac{1.38^2}{2 * 9.8}$$

$$h_L = 0.98 \text{ m}$$

$$h_p = \frac{100309.36}{9673.58} + \frac{13.8^2}{2 * 9.8} + 3.5 + 49.98 + 0.98 - \frac{33857.53}{9673.58}$$

$$h_p = 71.04 \text{ m}$$

Finalmente, para seleccionar la bomba, aplicamos la siguiente ecuación:

$$HP = \frac{Q * h_p}{76 * \alpha}$$

Donde:

HP = Caballos de fuerza

h_p = Carga total de la bomba

Q = Caudal en l/min

α = Eficiencia de la bomba

$$HP = \frac{165.6 * 71.04}{76 * 60}$$

$$HP = 2.57 \text{ hp}$$

De acuerdo a esto con una bomba centrífuga de 3HP podemos realizar eficientemente nuestro trabajo.

Flujo volumétrico de agua

Usando la formula (2.26) reordenada determinamos:

$$L_{min} = \frac{G}{HP} \left(1 - \frac{y_1}{y_2}\right)$$

Si se trabaja con un flujo de líquido igual a 1.1 veces el flujo de líquido mínimo, una presión de 1 atm y considerando una remoción del 90% de trimetilamina de la corriente gaseosa se tiene:

$$\left(1 - \frac{y_1}{y_2}\right) = 0.9$$

$$L = 1.05 * \frac{405147.27 \text{ mol/h} * 0.9}{9.6 \text{ mol/L} * \text{atm} * 1 \text{ atm}} * \frac{\text{m}^3}{1000 \text{ L}} = 39.88 \text{ m}^3/\text{h}$$

Diámetro torre de absorción

$$F_f = \frac{G_L}{G_G} \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}} = \frac{L}{M_{AG}} \sqrt{\rho_L \rho_G}$$

$$F_c = \frac{G_G}{\rho_G} \left(62.4 \frac{\mu_L}{\rho_L}\right)^{0.05} \sqrt{\frac{F_p}{\frac{\rho_L}{\rho_G} - 1}}$$

Donde F_f es el factor de flujo, G_L es el flujo másico del líquido por unidad de área, G_G es el flujo másico del gas por unidad de área en lbm/ft^2s , ρ_G y ρ_L son las densidades del gas y líquido respectivamente, en lbm/ft^3 , M_A es la masa molar del aire, F_c es el factor de capacidad, μ_L es la viscosidad dinámica del líquido en cp, F_p es el factor de empaquetamiento en ft^{-1} . En el caso particular se tiene:

$$\rho_G = \frac{101325 Pa * 0.029 \text{ kg/mol}}{8.3145 Pa m^3 / mol K * 311 K} = 1.14 \text{ kg/m}^3 = 0.07 \text{ lbm/ft}^3$$

$$F_f = \frac{39.88 \text{ m}^3/\text{h}}{0.029 \text{ kg/mol} * 405147.27 \text{ mol/h}} \sqrt{987 \text{ kg/m}^3 * 1.14 \text{ kg/m}^3} = 0.11$$

Utilizando el factor de flujo calculado, con la caída de presión de inundación estimada se tiene un factor de capacidad de 1.4; con el cual se procede a utilizar a hallar G_G máximo:

$$1.4 = \frac{G_{Gmax}}{0.07} \left(62.4 \frac{0.769}{61.63} \right)^{0.05} \sqrt{\frac{25}{987 - 1.14}} \rightarrow G_{Gmax} = 0.59 \text{ lbm/ft}^2 \text{ s} = 10413 \text{ kg/m}^2 \text{ h}$$

Utilizando el 70% del flujo molar gaseoso por unidad de área se tiene:

$$A = \frac{M_{AG}}{0.7 G_G} = \frac{0.029 \text{ kg/mol} * 405147.27 \text{ mol/h}}{0.7 * 10413 \text{ kg/m}^2 \text{ h}} = 1.61 \text{ m}^2$$

Donde A es el área transversal de la torre, la cual se obtiene con un diámetro de:

$$d = 2 \sqrt{\frac{A}{\pi}} = 2 \sqrt{\frac{1.61 \text{ m}^2}{\pi}} = 1.43 \text{ m}$$

Concentración de hipoclorito de sodio en el solvente

$$C_{HClO_3} = 18 \frac{n_{(CH_3)_3N}}{L} = 18 * \frac{0.442 \text{ mol/h}}{39.88 \text{ m}^3/\text{h}} * \frac{\text{m}^3}{1000 L} = 1.99 * 10^{-4} \text{ mol/L}$$

Altura de empaque

Para determinar la altura de la torre, se realiza un balance diferencial de trimetilamina:

$$G dy = PK_{Ga} A (y - y^*) dz$$

$$z = \frac{G}{PK_{Ga}A} \int_{y_1}^{y_2} \frac{dy}{(y - y^*)}$$

Utilizando la ecuación de Henry (2.24) y la ecuación anterior se tiene:

$$y - y^* = y - \frac{C}{HP} = y - \frac{G}{HPL}(y - y_1) = \left(1 - \frac{G}{HPL}\right)y + \frac{Gy_1}{HPL}$$

Reemplazando en (2.31), se tiene:

$$z = \frac{G}{PK_{Ga}A} \int_{y_1}^{y_2} \frac{dy}{\left(1 - \frac{G}{HPL}\right)y + \frac{Gy_1}{HPL}} = \frac{G}{PK_{Ga}A \left(1 - \frac{G}{HPL}\right)} \ln \frac{\left(1 - \frac{G}{HPL}\right)y_2 + \frac{Gy_1}{HPL}}{y_1}$$

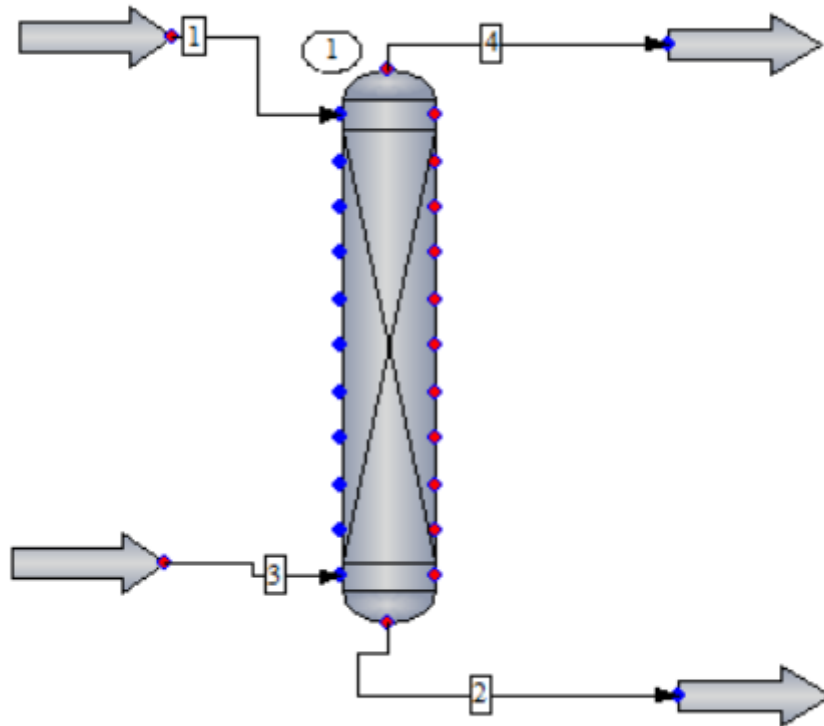
La fracción molar de trimetilamina en la corriente gaseosa a la entrada de la torre es de $1.09 \cdot 10^{-6}$, debido a que se desea remover el 90% de este contaminante, la fracción molar del mismo en la salida será de $1.09 \cdot 10^{-7}$. Por consiguiente, la altura de la torre es:

$$z = \frac{405.15 \text{ kmol/h}}{1870 \text{ kmol/m}^3\text{h} * 1.13\text{m}^2 \left(1 - \frac{405147.27 \text{ mol/h}}{9.6 \text{ mol/L} * 39880 \text{ L/h}}\right)} * \ln \frac{\left(1 - \frac{405147.27 \text{ mol/h}}{9.6 \text{ mol/L} * 39880 \text{ L/h}}\right) 1.09 * 10^{-6} + \frac{405147.27 \text{ mol/h} * 1.09 * 10^{-7}}{9.6 \text{ mol/L} * 39880 \text{ L/h}}}{1.09 * 10^{-7}} = 1.71\text{m}$$

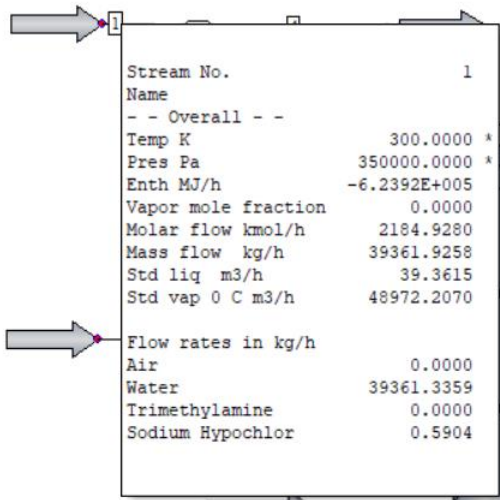
$$z = 1.71 \text{ m}$$

ANEXO B. SIMULACIÓN

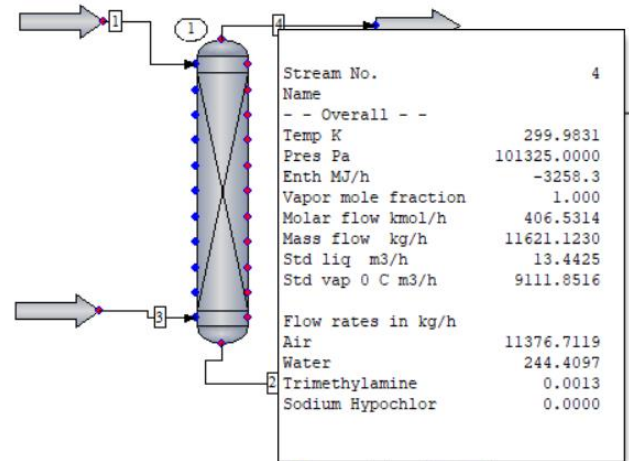
Simulación Torre de absorción



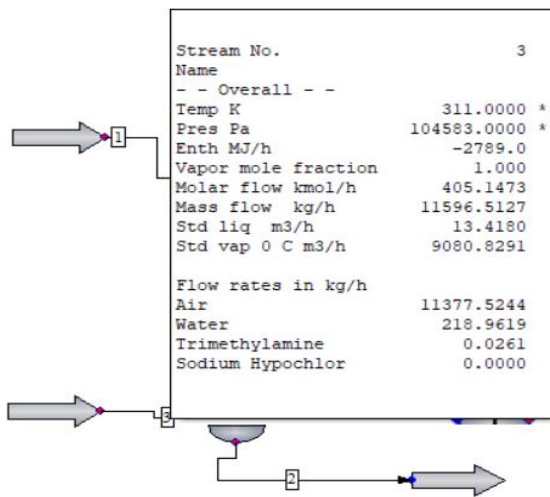
Torre de absorción



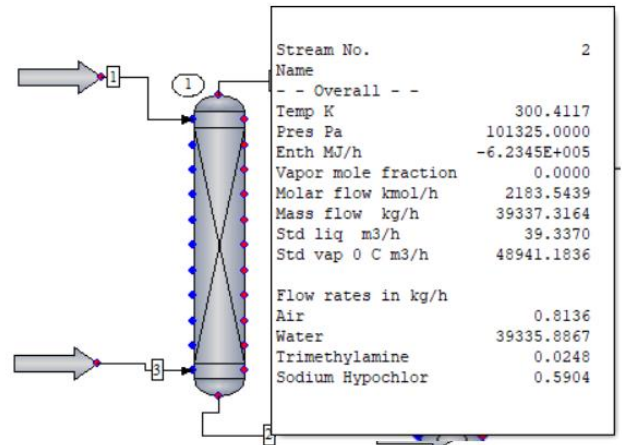
Entrada fluidos



Salida vapores



Entrada vapores



Salida fluidos