



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA

PROYECTO PARA LA REDUCCIÓN DE LAS EMISIONES DE MATERIAL
PARTICULADO DE LA CALDERA DE BIOMASA DE LA CLÍNICA ALEMANA DE
OSORNO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL QUÍMICO

GABRIEL ISMAEL MARTÍNEZ OLIVARES

PROFESOR GUÍA:
FELIPE DÍAZ ALVARADO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
FRANCISCO GRACIA CAROCA
JUAN IGNACIO ÁVILA FELLAY

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por la Clínica Alemana de Osorno.

SANTIAGO DE CHILE
2014

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL QUÍMICO
POR: Gabriel Ismael Martínez Olivares
FECHA: Octubre de 2014
PROF. GUÍA: Felipe Díaz Alvarado

PROYECTO PARA LA REDUCCIÓN DE LAS EMISIONES DE MATERIAL PARTICULADO DE LA CALDERA DE BIOMASA DE LA CLÍNICA ALEMANA DE OSORNO

En el presente informe se muestra el desarrollo del proyecto de la Clínica Alemana de Osorno, para reducir las emisiones de material particulado de su caldera, debido a las preocupantes condiciones de contaminación atmosférica de la ciudad.

Con este objetivo, se exponen diversas tecnologías de control de material particulado, considerando aspectos técnicos, ambientales y económicos. Tras realizar las comparaciones pertinentes, se decidió enfocar el trabajo en el diseño de un depurador tipo Venturi, debido a que su incorporación lograría disminuir las emisiones a niveles adecuados, y sus características de operación y mantención son aptas para el caso de estudio.

El diagnóstico de las emisiones actuales se construyó sobre las mediciones realizadas en la caldera, para caracterizar el material particulado y las condiciones de los gases emitidos. Con esta información, y aplicando un modelo matemático del depurador Venturi, fue posible definir las características adecuadas de su diseño. Según este modelo, además, se prevé la disminución de material particulado en las emisiones desde $930 \left[\frac{mg}{m^3} \right]$, medidos en los gases emitidos de la caldera sin su tratamiento actual, hasta $90 \left[\frac{mg}{m^3} \right]$ en las condiciones más adversas.

Una vez diseñado el depurador, se dimensionaron los equipos secundarios necesarios para su funcionamiento, encontrándose diferencias significativas con respecto a los equipos similares instalados actualmente.

En cuanto a la implementación del proyecto, se recomienda que se realice por fases, dando mayor prioridad a aquellos equipos cuyo reemplazo sea más simple y, con certeza, necesario. Una vez finalizada su implementación, es necesario mantener un registro de las variables adecuadas para verificar la eficiencia de la depuración.

Finalmente, el costo de operación del proyecto, que involucra el consumo de agua y energía eléctrica, se estimó en CLP\$ 640.000 mensuales. Por otro lado, el costo de inversión, que supone la compra de todos los equipos necesarios para el proceso de depuración, se estimó en CLP\$ 17.050.000.

Tabla de contenido

1. Introducción	1
1.1. Marco teórico	1
1.1.1. Material particulado	1
1.1.2. Calderas	2
1.1.3. Control de material particulado	3
1.2. Antecedentes	4
1.2.1. Normas medioambientales	4
1.2.2. Osorno	5
1.2.3. Clínica Alemana de Osorno	6
1.3. Objetivos	7
1.3.1. Objetivo general	7
1.3.2. Objetivos específicos	7
2. Tecnologías para el control de material particulado	8
2.1. Separadores ciclónicos	9
2.2. Depuradores	9
2.2.1. Depurador Venturi	11
2.2.2. Torre de aspersión	11
2.2.3. Torre de bandejas	12
2.2.4. Otros depuradores	14
2.2.5. Características de depuradores	15
2.3. Filtros de mangas	15
2.3.1. Mecánico	15
2.3.2. Pulse jet	16
2.3.3. Reverse Air	16
2.3.4. Características filtros de manga	16
2.4. Otras tecnologías	18
3. Elección de la tecnología a diseñar	20
3.1. Estimación y comparación de emisiones de material particulado	20
3.2. Distribución de tamaño de partículas	21
3.3. Comparación de emisiones de MP controladas	22
3.4. Selección de la tecnología	22
4. Caracterización del material particulado	25
4.1. Metodología de mediciones	25

4.1.1.	Variables a medir	26
4.1.2.	Materiales e instrumentos	26
4.1.3.	Procedimiento	26
4.2.	Resultados	27
4.3.	Análisis	28
5.	Diseño del sistema de depuración	30
5.1.	Depurador Venturi	31
5.1.1.	Objetivo del diseño	31
5.1.2.	Emisiones de MP	32
5.1.3.	Modelo	33
5.1.4.	Procedimiento de diseño y resultados	35
5.1.5.	Material de construcción	37
5.2.	Eliminador de niebla	38
5.3.	Dimensionamiento de equipos secundarios	39
5.3.1.	Bomba	39
5.3.2.	Ventilador	41
5.3.3.	Sedimentador	41
5.3.4.	Estanque de agua	41
5.4.	Costos de operación	42
5.5.	Cotizaciones	42
5.6.	Discusiones y conclusiones	43
6.	Metodologías de implementación	45
7.	Conclusiones y recomendaciones	47
	Bibliografía	49
	Anexos	52
A.	Elección de la tecnología a diseñar	53
A.1.	Estimación de la concentración de material particulado	53
A.2.	Factor de emisión	53
A.3.	Estimación de las emisiones controladas	54
B.	Caracterización del MP en la caldera de biomasa de la CAO.	55
B.1.	Humedad en los filtros	55
B.2.	Masa inicial, masa final y masa de MP.	56
B.3.	Volumen filtrado y Concentración de MP.	56
B.4.	Condiciones de muestras gaseosas	57
B.5.	Factores de emisión máxicos y energéticos de madera húmeda y seca.	57
C.	Diseño del sistema de depuración	58
C.1.	Depurador Venturi	58
C.1.1.	Grado de penetración	58
C.1.2.	Propiedades físico-químicas de los gases	58
C.1.3.	Espesor de pared	59

C.2. Eliminador de niebla	59
C.2.1. Diámetro de gotas de agua	59
C.2.2. Tanque para eliminador de niebla: Medidas recomendadas	60
C.3. Bomba	60
C.3.1. Pérdidas de carga por succión y descarga	60
C.3.2. Pérdidas de carga por singularidades	60
C.3.3. Potencia requerida	61
C.4. Sedimentador	62
C.4.1. Coe y Clevenger	62
C.4.2. Diferencia de altura	62
C.5. Costos de operación	63
D. Cotizaciones	64

Índice de tablas

2.1. Características de separadores ciclónicos.	11
2.2. Características de depuradores.	15
2.3. Características de materiales filtrantes.	17
2.4. Características de filtros de mangas	19
3.1. Distribuciones de tamaños de partículas	22
3.2. Estimación de emisiones controladas	22
3.3. Comparación de tecnologías destacadas	23
4.1. Mediciones de temperatura, presión y flujo	28
5.1. Restricciones para el primer caso de diseño	36
5.2. Restricciones para el segundo caso de diseño	37
5.3. Costos de operación del sistema de depuración	42
5.4. Costos de los equipos	43
A.1. Distribución de concentración de MP con respecto a su tamaño	54
A.2. Emisiones controladas mediante depurador Venturi	54
B.1. Humedad en filtros	55
B.2. Masa retenida por los filtros	56
B.3. Volumen filtrado y concentración de MP	57
B.4. Condiciones de las emisiones	57
B.5. Factores de emisión (FE) de biomasa seca y húmeda	57
C.1. Propiedades a 139°C	59
C.2. Propiedades a 186°C	59
C.3. Condiciones de operación de la bomba	60
C.4. Consumo de agua	63
C.5. Consumo de energía: Ventilador	63
C.6. Consumo de energía: Bomba	63

Índice de figuras

1.1. Caldera acuotubular	3
1.2. Concentración anual de MP _{2,5} en Osorno.	4
1.3. Consumo de leña y derivados, sector industrial, 1994	6
2.1. Separador ciclónico	10
2.2. Multiciclón	10
2.3. Depurador Venturi	12
2.4. Depurador torre de aspersion	13
2.5. Depurador ciclón	13
2.6. Depurador torre de bandejas	14
2.7. Filtro de mangas mecánico	16
2.8. Filtro de mangas pulse jet	17
2.9. Filtro de mangas reverse air	18
4.1. Esquema del proceso y punto de medición	25
4.2. Dispositivo para muestras gaseosas	27
4.3. Distribución de concentración de MP en función del tamaño de partícula	28
5.1. Sistema de depuración	30
5.2. Diseño de depurador tipo Venturi	38
5.3. Estanque para eliminador de niebla	40
C.1. Medidas típicas para estanques cilíndricos	61
D.1. Depurador Venturi y estanque de eliminador de niebla	65
D.2. Eliminador de niebla	66
D.3. Ventilador de tiro inducido	67
D.4. Bomba de doble diafragma	68
D.5. Estanque de agua	69

Capítulo 1

Introducción

La ciudad de Osorno, ubicada en la X Región de Los Lagos, se ha visto afectada en los últimos años por su contaminación atmosférica, reconociéndose como una de las ciudades con mayor concentración de material particulado en el aire, y declarándose zona saturada del mismo [1].

El origen de las partículas suspendidas, tiene como principal fuente el uso de combustibles derivados de la madera, ampliamente utilizados debido a su abundancia en la región.

En el último tiempo, se ha generado preocupación por esta situación, y por lo tanto, se desea buscar maneras de solucionar este problema. En particular, la Clínica Alemana de Osorno, pretende disminuir sus propias emisiones de material particulado, cuya fuente es una caldera utilizada para proveer energía térmica a sus instalaciones, y que utiliza derivados de la madera como combustible.

Es por esto que se propuso un proyecto que consiste en el diseño de un sistema capaz de disminuir las emisiones de partículas en suspensión, considerando factores técnicos, ambientales y económicos en su desarrollo.

1.1. Marco teórico

1.1.1. Material particulado

El material particulado en suspensión (MP) comprende diversas sustancias, líquidas y/o sólidas, que contribuyen a la contaminación del aire. El MP es clasificado según su tamaño, siendo especialmente importantes las partículas menores a $10\ [\mu m]$, que resultan dañinas para la salud humana, debido a que ingresan por las vías respiratorias hasta los pulmones y se depositan en las paredes alveolares.

La caracterización de tamaño es definida como diámetro aerodinámico equivalente, que corresponde al diámetro de una partícula esférica con densidad unitaria que tiene igual

velocidad de caída que la partícula analizada [2].

El MP se diferencia en partículas finas y gruesas, con tamaños menores y mayores a 2,5 [μm] respectivamente. Entre las partículas finas se encuentran sulfatos, nitratos, carbonatos orgánicos, amonio y plomo, mientras que las partículas gruesas están conformadas por óxidos de silicio, hollín, hierro, aluminio, entre otros.

Las concentraciones de las especies dependen de las fuentes que producen dichas emisiones. En el caso de la combustión de virutas y aserrín de madera en calderas industriales, los niveles de MP_{10} , $MP_{2,5}$ y MP_1 son cercanos a 98 %, 67 % y 43 % de las emisiones totales, respectivamente [3].

Para medir la concentración y tamaño del MP, se suelen utilizar métodos isocinéticos en la extracción de gases. Esto significa que la velocidad y dirección con que son captados los gases son iguales a las que poseen en el punto donde se realiza la medición. De este modo, se asegura que las concentraciones de partículas en las muestras son representativas.

1.1.2. Calderas

Las calderas son recipientes metálicos cerrados destinados a la producción de vapor o calentamiento de agua. En el funcionamiento de las calderas se pueden distinguir dos componentes principales. El primero consiste en la producción de calor a partir de algún combustible, mientras que el segundo corresponde a la transferencia del calor generado hacia el agua.

Estos equipos se pueden clasificar según el combustible utilizado, que puede ser líquido o sólido y la configuración utilizada para la transferencia de calor.

El suministro del oxígeno necesario para la combustión se suele realizar mediante ventiladores o sopladores, que pueden impulsar el aire desde la entrada de la caldera (llamados ventiladores de tiro forzado), o aspirarlos desde su salida (denominados ventiladores de tiro inducido).

Las calderas son consideradas fuentes estacionarias, ya que operan en un lugar fijo, y sus emisiones son descargadas mediante una chimenea o ducto.

En particular, una caldera acuotubular de biomasa integra un conjunto de cañerías por las que fluye agua, mientras la combustión de biomasa genera gases, cuyo calor es transferido al agua, produciendo el cambio de fase (Figura 1.1 [4]).

Posteriormente, cuando los gases de combustión ya han cedido su energía al agua, pueden recibir algún tratamiento y son emitidos al ambiente.

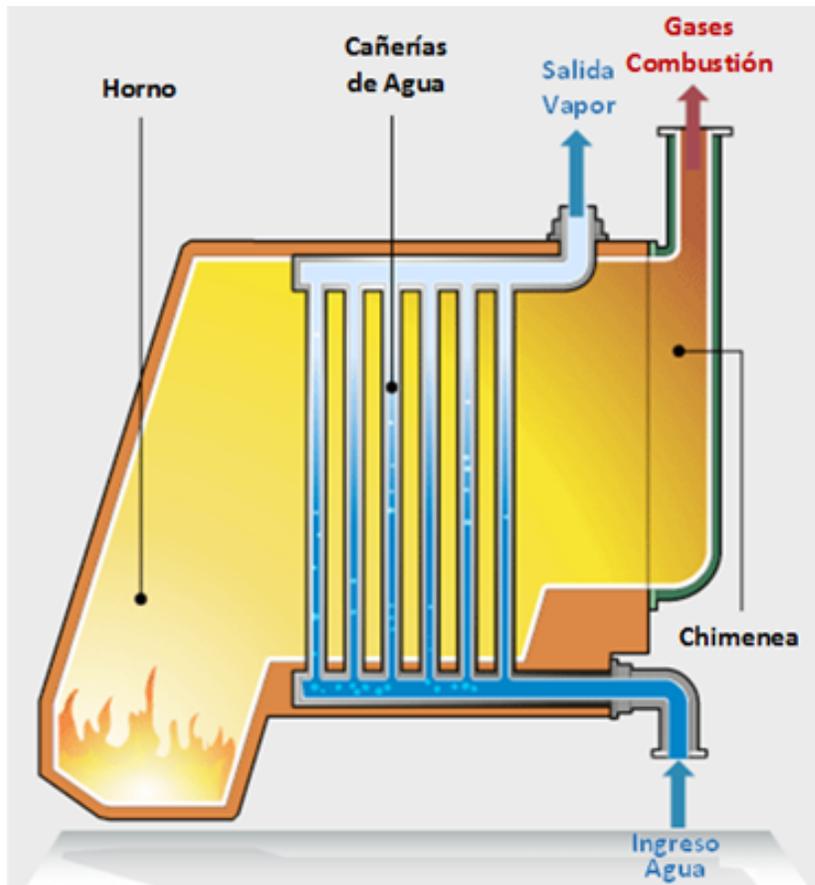


Figura 1.1: Caldera acuotubular

1.1.3. Control de material particulado

Debido a las regulaciones industriales sobre emisiones de MP, se han desarrollado diversas tecnologías para su control. De este modo, es posible disminuir las emisiones bajo los límites establecidos como seguros para el ambiente y la salud.

El uso de alguna de las tecnologías depende del proceso analizado, ya que cada una de ellas presenta características que pueden ser convenientes según la situación. Del mismo modo, existen factores técnicos que pueden tornar inviable su utilización.

Entre las tecnologías más utilizadas en el control de MP, se encuentran los ciclones, filtros de mangas, depuradores y precipitadores electrostáticos.

Los separadores ciclónicos aprovechan las propiedades inerciales de las partículas para separarlas de los gases, sin embargo, sólo son efectivos para partículas de tamaño sobre 10 $[\mu m]$.

Los filtros de mangas, utilizan materiales filtrantes, a través de los cuales pasa el flujo gaseoso, y donde se deposita el MP con una eficiencia mayor a 99 %.

Los depuradores captan el MP mediante su contacto con agua, que en muchos casos se

suministra atomizada para aumentar la superficie de contacto, y así, su eficiencia.

Finalmente, los precipitadores electrostáticos, que inducen cargas eléctricas sobre las partículas, para que puedan ser atraídas y recolectadas.

Estas tecnologías serán estudiadas con mayor profundidad en el capítulo 2.

1.2. Antecedentes

1.2.1. Normas medioambientales

Osorno fue declarada zona saturada de MP (Decreto Supremo (D.S.) N°27 de 2012 del Ministerio del Medio Ambiente). Esto quiere decir que las normas de calidad del aire para estos contaminantes se encuentran sobrepasadas. Además, esta declaración es la primera etapa para la creación de un plan de descontaminación, que actualmente se encuentra en desarrollo [1]. En la Figura 1.2 se muestra el promedio anual de los registros diarios de concentración de $MP_{2,5}$ en Osorno [5], que durante los últimos años ha superado ampliamente el límite establecido, de $20 \left[\frac{\mu g}{m^3} \right]$, en el Decreto Supremo N°12 de 2011 del Ministerio del Medio Ambiente.

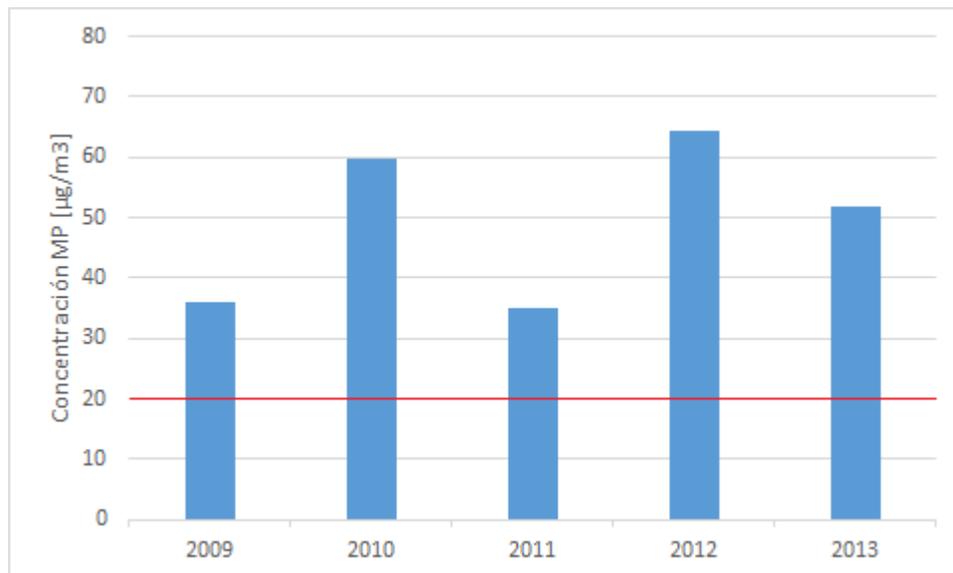


Figura 1.2: Concentración anual de $MP_{2,5}$ en Osorno.

Considerando esta situación, no existen normas para la regulación de emisiones de MP en esta región. Por esta razón, parece adecuado observar las experiencias de otras ciudades, y cuáles fueron las medidas decretadas para disminuir las concentraciones de MP. A continuación se presentan los casos de la Región Metropolitana y Temuco, la primera por ser la región con mayor regulación en el país, y la segunda por presentar condiciones geográficas y atmosféricas semejantes a Osorno.

En la Región Metropolitana, se estableció mediante el D.S. N°4 de 1992 del Ministerio del Medio Ambiente, una norma de emisiones de MP para fuentes estacionarias puntuales ya establecidas, y con emisiones menores a una tonelada diaria, que limita la concentración a un máximo de $112 \left[\frac{mg}{m^3} \right]$ (para partículas con diámetro aerodinámico menor a $100 \text{ } [\mu m]$) en condiciones estándar, mediante un muestreo isocinético. Además, para estas fuentes, las emisiones totales diarias también se encuentran limitadas, de la siguiente manera:

$$ED \left[\frac{kg}{día} \right] = Q_{máx} \left[\frac{m^3}{h} \right] \cdot [MP] \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot 24 \left[\frac{h}{día} \right]$$

- ED : Emisión diaria máxima.
- $Q_{máx}$: Caudal medido a plena carga, en condiciones estándar, corregido según exceso de aire.
- $[MP]$: Concentración para determinar la emisión máxima permitida. Posee valores de 56, 50 y $32 \left[\frac{mg}{m^3} \right]$ en los años 1997, 1999 y 2004 respectivamente.

El carácter progresivo del decreto, se debe a la consideración de que las industrias requieren periodos razonables para el desarrollo e implementación de las modificaciones necesarias para cumplir las normas.

Después de que la RM fuera declarada zona saturada de MP_{10} (D.S. N°131 de 1996 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia), se estableció un plan de prevención y descontaminación atmosférica para la RM (D.S. N°131 de 1996 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia). En este plan se menciona la paralización de actividades en episodios de pre-emergencia y emergencia ambiental para fuentes puntuales cuyas emisiones sean superiores a $32 \left[\frac{mg}{m^3} \right]$ y $28 \left[\frac{mg}{m^3} \right]$ respectivamente. En dichos casos, también deben detener su funcionamiento aquellas fuentes que no acrediten sus emisiones.

En el caso de Temuco, fue declarada zona saturada de material particulado (D.S. N°35 de 2005 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia) y se estableció en el plan de descontaminación (D.S. N°78 de 2009 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia) los límites de $112 \left[\frac{mg}{m^3} \right]$ para las fuentes puntuales existentes, y $56 \left[\frac{mg}{m^3} \right]$ para las fuentes nuevas (para partículas con diámetro aerodinámico menor a $10 \text{ } [\mu m]$). A diferencia del caso de Santiago, estos límites no son modificados en el tiempo.

1.2.2. Osorno

La biomasa es materia orgánica originada en un proceso biológico, siendo el aprovechamiento energético uno de sus principales usos.

Como material de combustión directa, y debido a su alta disponibilidad, la biomasa es de gran importancia para la localidad de Osorno, y su uso se extiende desde el uso doméstico hasta el industrial.

En el gráfico de la Figura 1.3 [6], se deja en evidencia el alto consumo de energía proveniente de derivados de la madera para el área industrial de la región. Se debe advertir que en el

gráfico se incluye la actual XIV Región de los Ríos como parte de la X Región de Los Lagos.

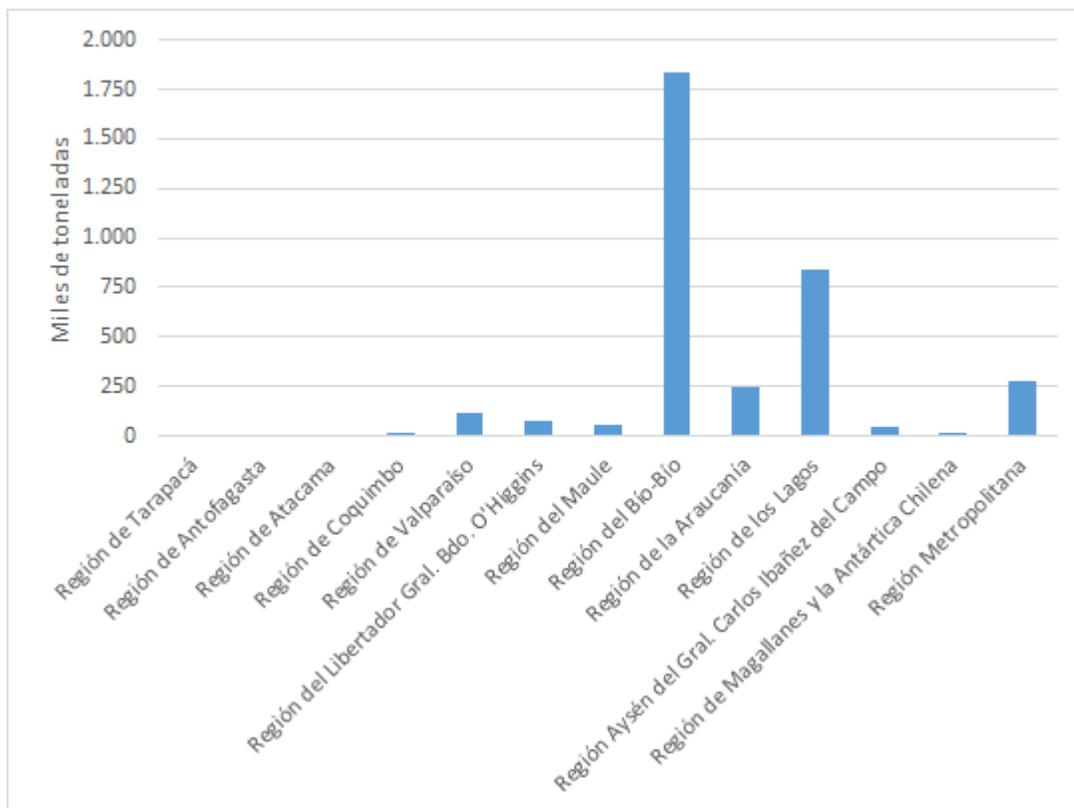


Figura 1.3: Consumo de leña y derivados, sector industrial, 1994

Debido a lo anterior, y en conjunto con las dificultades para mantener las condiciones óptimas de humedad para su uso, y las características geográficas, ha concluido en que Osorno sea una de las ciudades con mayor contaminación atmosférica en Chile.

1.2.3. Clínica Alemana de Osorno

La Clínica Alemana de Osorno (CAO) posee una caldera acuotubular, que funciona mediante la combustión de biomasa y que tiene como propósito proveer energía térmica a sus instalaciones, y que cuenta con un ventilador de tiro inducido.

La biomasa utilizada está compuesta principalmente por aserrín, virutas y chips de pino insigne y pino Oregón, que debido a su disponibilidad, y a los convenios realizados entre la CAO y sus proveedores, se percibe como un combustible atractivo para su consumo.

Actualmente, el tratamiento realizado sobre las emisiones producidas por la caldera, que consta de una etapa de depuración similar a un scrubber, funciona mediante un lavado de los gases con agua, absorbiendo y arrastrando el MP. El agua utilizada es tratada en un sedimentador, que permite tanto la reutilización del agua como la remoción del MP en forma de lodo. A pesar de que este sistema ha permitido reducir la contaminación producida por la caldera, es un tratamiento básico, diseñado de manera informal, y se desconoce su eficiencia.

Se debe destacar que el combustible se suministra a la caldera mediante lotes (también llamados batch) y su volumen depende de los requerimientos de las instalaciones de la CAO. Debido a esto, las emisiones de gases son variables.

Debido a lo anterior, es deseable el diseño de un sistema que permita disminuir las emisiones de MP de la caldera de biomasa de la CAO, con el fin de adaptarla a posibles nuevas normas medioambientales de la zona.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Diseñar un sistema que permita disminuir las emisiones de material particulado en una caldera de biomasa.

1.3.2. Objetivos específicos

1. Comparar distintos mecanismos de reducción de emisiones de material particulado aplicables a la Clínica Alemana de Osorno.
2. Seleccionar y diseñar un sistema reductor de emisiones de material particulado en base a criterios técnicos y económicos relevantes para la Clínica Alemana de Osorno.
3. Proponer metodologías para la implementación del sistema diseñado.

Capítulo 2

Tecnologías para el control de material particulado

A continuación, se presentan diversas tecnologías que permiten la reducción de las emisiones de MP de la caldera de biomasa de la CAO.

Los métodos existentes para la separación de sólidos en corrientes gaseosas se dividen principalmente en cuatro grupos: ciclónicos, depuradores, filtros de mangas y precipitadores electrostáticos. En esta sección, se describe el funcionamiento de equipos pertenecientes a estas categorías, enfocándose en aquellos que son aplicables al tratamiento de las emisiones de la caldera de biomasa de la CAO.

Para el análisis de las tecnologías, se tomaron en cuenta aspectos técnicos, económicos y ambientales. El objetivo de esto, es reconocer cuáles de ellas son realmente aplicables y qué ventajas y desventajas presentan.

Técnicos:

- Eficiencia: Capacidad del equipo para separar el MP de la corriente gaseosa. Debido a la dependencia con el tamaño de las partículas, se muestran diversos rangos de eficiencia.
- Caída de presión: Corresponde a la pérdida de presión producida por un equipo, según la resistencia que ejerza frente al flujo de la corriente gaseosa.
- Mantenimiento: Se analizan cualitativamente las necesidades de mantenimiento de cada tecnología.
- Temperatura de operación: Rango de temperaturas en que puede operar el equipo.
- Concentración de MP: Rango de concentración de MP en que puede operar el equipo.

Económicos:

- Costos de inversión: Costo asociado al diseño e implementación de cada tecnología. Los valores fueron estimados [7, 8] y actualizados según el índice CEPCI.
- Costo anual O y M: Costos asociados a la operación y mantenimiento de la tecnología implementada, sin considerar equipos auxiliares. Valores estimados [9, 10, 11, 12, 13,

14, 15] y actualizados según índice CEPCL.

Se debe considerar que sólo corresponden a estimaciones iniciales de cada tecnología, y que los valores expuestos se encuentran normalizados por unidad de flujo volumétrico.

Medioambientales:

- Agua requerida: Volumen de agua que se necesita para el tratamiento de cierto volumen de emisiones gaseosas.
- Residuos producidos: Tipo de residuos que se originan al utilizar un equipo.

Un aspecto medioambiental que se consideró en un principio, fue la capacidad de las tecnologías para absorber gases contaminantes, como óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles, pero fue descartada posteriormente, debido a que su efectividad depende de la temperatura de las emisiones, siendo baja a altas temperaturas.

2.1. Separadores ciclónicos

Los separadores ciclónicos son equipos que permiten extraer partículas sólidas y líquidas de corrientes gaseosas, por medio de la fuerza de gravedad y el efecto de la rotación producida en éstos.

En un ciclón (Figura 2.1 [16]), el flujo gaseoso ingresa de manera tangencial al equipo, fluyendo en forma helicoidal hasta su base, donde se forma un vórtice en que las partículas con mayor inercia son expulsadas por la parte inferior del ciclón, mientras que el fluido es expulsado por la parte superior.

Un multiciclón (Figura 2.2 [16]) es un arreglo de ciclones de tamaño reducido, que operan en paralelo y que pueden tratar grandes volúmenes de gases. Además, logran una eficiencia mayor que los ciclones convencionales [16].

Entre las características de los separadores ciclónicos, destaca la baja mantención requerida, debido a que no poseen partes móviles. Por otro lado, no requieren agua para su funcionamiento, por lo que el MP recolectado se encuentra en estado sólido.

Las características técnicas y estimaciones de costos [9] se presentan en la tabla 2.1

2.2. Depuradores

Los depuradores (también llamados “scrubbers”) son equipos que utilizan agua u otras soluciones con el propósito de absorber gases y captar partículas sólidas en corrientes gaseosas.

Existen diversos tipos de depuradores, y sus diferencias se basan en el modo de contacto entre el agua y la corriente gaseosa. Las consecuencias de esto son diferencias en las

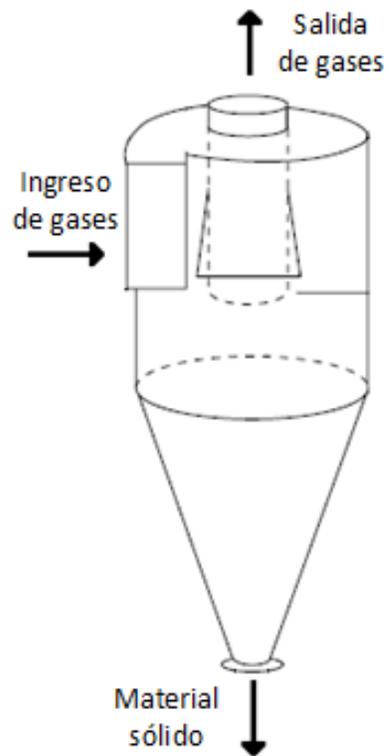


Figura 2.1: Separador ciclónico

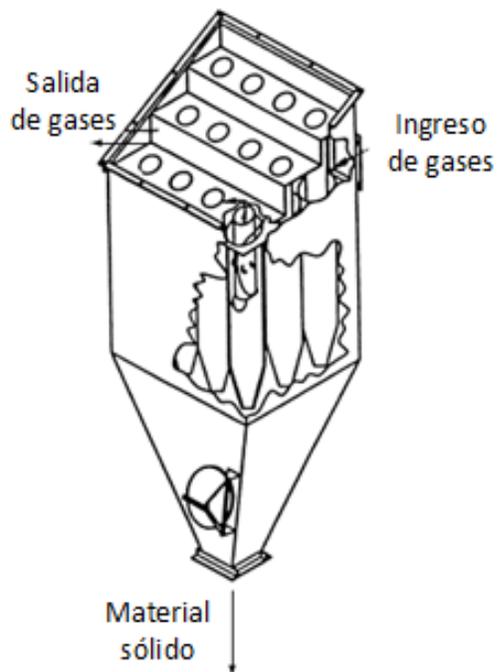


Figura 2.2: Multiciclón

eficiencias de los equipos, los recursos utilizados y las condiciones de operación. La selección y aplicabilidad de alguna de estas tecnologías depende del caso de estudio.

Tabla 2.1: Características de separadores ciclónicos.

	Ciclón	Multiciclón
Eficiencia	0 a 2,5 [μm]: 10 % 2,5 a 6 [μm]: 35 % 6 a 10 [μm]: 50 %	0 a 2,5 [μm]: 50 % 2,5 a 6 [μm]: 75 % 6 a 10 [μm]: 85 %
Caída de presión [kPa]	1 a 1,5	2 a 2,5
Temperatura de operación	Sólo depende del material de construcción 540 [$^{\circ}C$]	
Concentración MP $\frac{g}{m^3}$	2,3 a 230	
Costos de inversión $\frac{USD}{(m^3/s)}$	5.900	
Costo anual O y M $\frac{USD}{(m^3/s)}$	2.200 a 26.000	

El equipo utilizado actualmente por la CAO corresponde a un depurador. Al observar su estado, se advierte su deterioro junto con el de equipos secundarios, presumiblemente debido a la acidez del agua una vez captado el MP.

Si se desea implementar alguno de estos equipos, sería recomendable estabilizar el agua utilizada, mejorando el cuidado de los equipos y disminuyendo el impacto del agua desechada al ambiente. Como referencia, el D.S. N°609 de 1998 del Ministerio de Obras Públicas, permite la descarga de residuos industriales líquidos al sistema de alcantarillado con concentración de sólidos sedimentales menor a 20 [$\frac{ml}{l}$].

2.2.1. Depurador Venturi

Un depurador tipo Venturi (Figura 2.3 [16]), se beneficia del aumento en la velocidad de la corriente gaseosa en la sección más estrecha del tubo, para mejorar el contacto entre el gas y el líquido, debido a la atomización de este último.

Posteriormente, la velocidad del fluido se reduce, y la mezcla de partículas y agua tiende a aglomerarse, siendo finalmente separada de la corriente gaseosa por medio de un ciclón o un eliminador de niebla [15]. La sección estrecha del tubo de Venturi puede ser diseñada de manera ajustable, manteniendo su eficiencia para un rango variable de flujos gaseosos [17].

Este tipo de depurador tiene un diseño simple e instalación relativamente sencilla, necesitando una baja mantención. Al utilizar agua para captar el MP, pueden existir problemas de corrosión en el equipo, aunque es posible neutralizarlos con los aditivos adecuados [15].

2.2.2. Torre de aspersión

Consiste en una cámara cilíndrica vacía, donde ingresan los gases de combustión y agua (mediante atomizadores o aspersores), en contra corriente. El uso de varios aspersores permite una mejor distribución del agua dentro de la cámara.

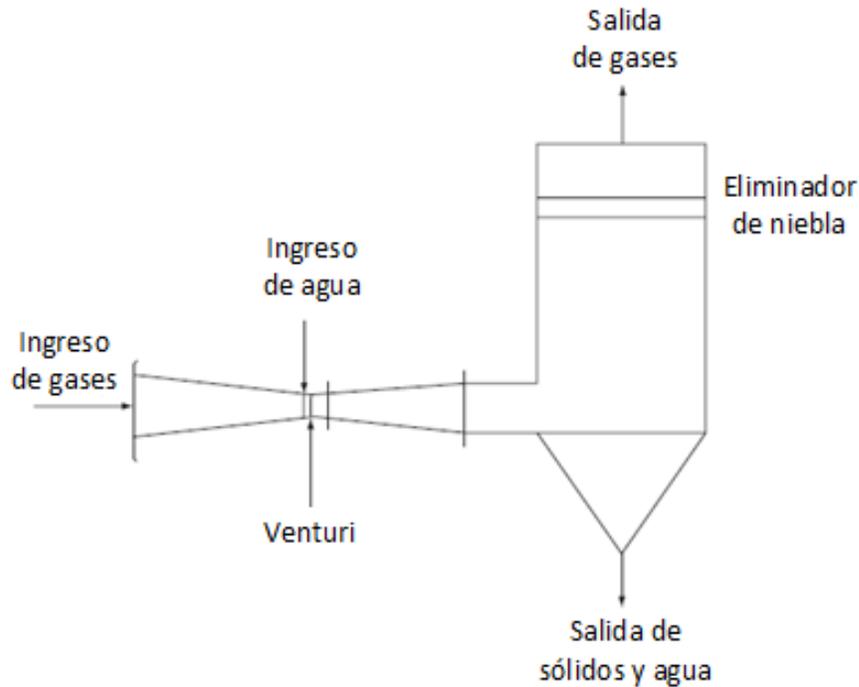


Figura 2.3: Depurador Venturi

El funcionamiento del equipo se basa en la absorción y arrastre del MP por medio del agua. Opcionalmente se incorpora un eliminador de niebla, para impedir que el agua sea expulsada por la parte superior (Figura 2.4 [16]). En general no se recomiendan para el control de MP, debido a que la razón de agua utilizada por volumen de gases tratados es demasiado alta (Tabla 2.2).

Para mejorar su desempeño, se suele ingresar la corriente gaseosa de manera tangencial a la cámara (de manera similar a un ciclón), mientras el agua se rocía desde el centro (Figura 2.5 [16]).

2.2.3. Torre de bandejas

Este tipo de depurador (Figura 2.6 [18]) consiste en una cámara vertical que posee una serie de bandejas horizontales apiladas. Estas bandejas poseen orificios por los que atraviesa el flujo gaseoso, con una trayectoria ascendente, mientras el agua desciende por la cámara. Al igual que los otros depuradores, puede presentar problemas de corrosión.

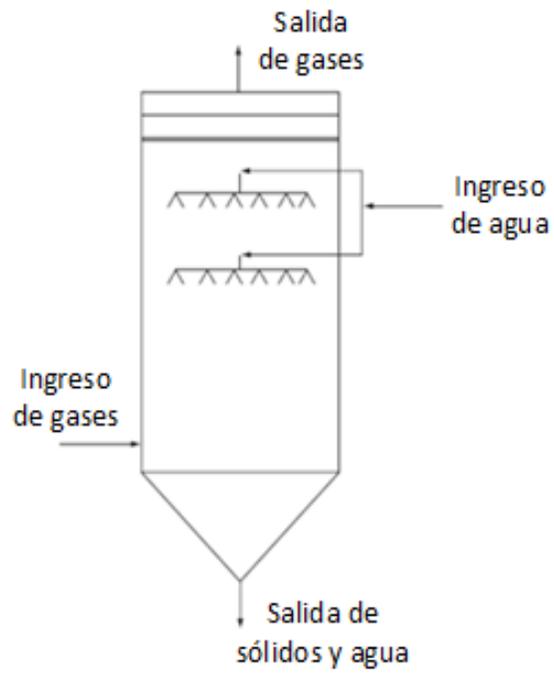


Figura 2.4: Depurador torre de aspersión

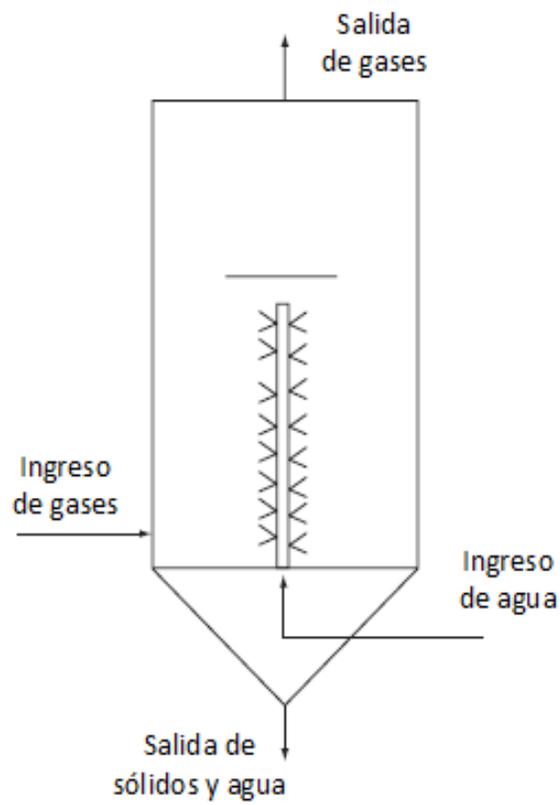


Figura 2.5: Depurador ciclón

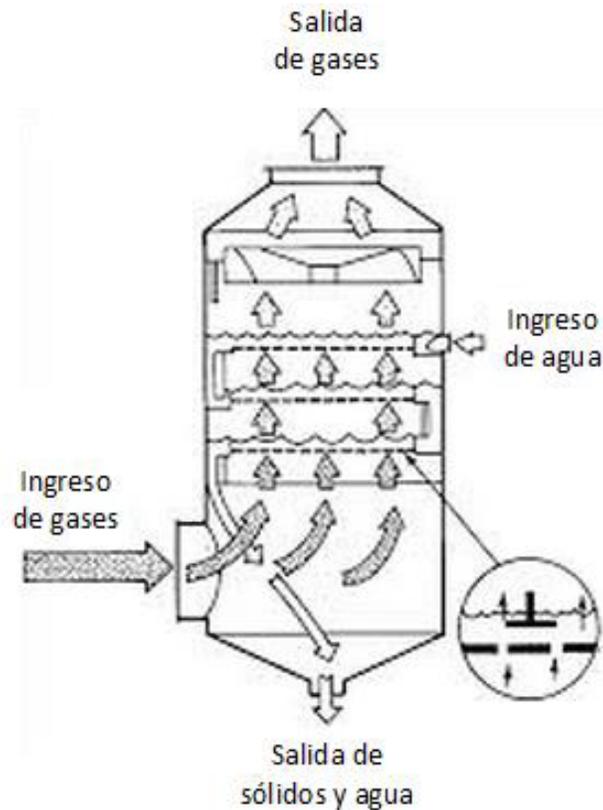


Figura 2.6: Depurador torre de bandejas

2.2.4. Otros depuradores

Depurador orificio

El depurador orificio consta de una cámara con una superficie de agua. Los gases ingresan a la cámara mediante un ducto. La velocidad de los gases permite la formación de gotas de agua que captan el MP. Sólo son eficientes para MP de tamaño mayor a $2 \mu m$, y operan a una temperatura máxima de $150 \text{ }^{\circ}C$ y concentración de hasta $23 \left[\frac{g}{m^3} \right]$.

Depurador mecánico

En un depurador mecánico, el contacto entre el agua y el gas se origina en la aspersion del agua mediante un rotor, accionado por un motor.

Esta tecnología presenta características que resultan poco recomendables para su utilización en el control de MP en una caldera de biomasa. La temperatura máxima de funcionamiento es en torno a los $150 \text{ }^{\circ}C$, y concentración hasta $4,5 \left[\frac{g}{m^3} \right]$. Requiere un alto nivel de mantención.

2.2.5. Características de depuradores

En la Tabla 2.2 se presentan detalles acerca de las características de los depuradores Venturi, torres de bandejas y torre de aspersión [13, 14, 15].

Tabla 2.2: Características de depuradores.

	Venturi	Torre de bandejas	Torre de aspersión
Eficiencia	0 a 2,5 [μm]: 90 % 2,5 a 6 [μm]: 95 % 6 a 10 [μm]: 99 %	0 a 2,5 [μm]: 25 % 2,5 a 6 [μm]: 95 % 6 a 10 [μm]: 99 %	0 a 2,5 [μm]: 20 % 2,5 a 6 [μm]: 80 % 6 a 10 [μm]: 90 %
Caída Presión [kPa]	2,5 a 7,5	1,2 a 3,7	Muy baja
Temperatura de operación [$^{\circ}C$]	4 a 400	4 a 370	Sin especificar
Concentración MP [$\frac{g}{m^3}$]	1 a 115	Sin límite	Sin especificar
Costos de inversión [$\frac{USD}{(m^3/s)}$]	14.500	6.550	15.000
Costo anual O y M [$\frac{USD}{(m^3/s)}$]	13.500 a 375.000	9.600 a 135.000	4.700 a 94.500
Agua requerida [$\frac{L}{m^3}$]	1	Menor que 1	3
Residuos producidos	Lodos		

2.3. Filtros de mangas

Los filtros de mangas son equipos industriales compuestos por un grupo de filtros tubulares en un contenedor. El aire contaminado ingresa al equipo, y el MP se deposita en las paredes de los filtros (Figura 2.7 [16]).

Las principales diferencias entre los tipos de filtros de mangas se encuentran en los mecanismos de limpieza de los filtros y las características del material filtrante. Entre los materiales utilizados se destacan aquellos que resisten altas temperatura, como el nylon, teflón y fiberglass. Cada uno de estos materiales cuenta con ventajas y desventajas con respecto a las emisiones a tratar, como la resistencia a la abrasión, ácidos, sustancias alcalinas, etc. [17] (Tabla 2.3).

Para lograr un funcionamiento continuo de los filtros, existen diversas formas de remover el material acumulado. A continuación se presentan tres mecanismos que permiten realizar esta función [16].

2.3.1. Mecánico

En este diseño, los filtros se encuentran adosados a un agitador mecánico, cuyo funcionamiento se inicia cuando la presión interna de la cámara alcanza cierta magnitud. El movimiento del agitador permite la extracción del MP, que se acumula en la parte inferior del equipo, donde puede ser recolectado (Figura 2.7 [16]).

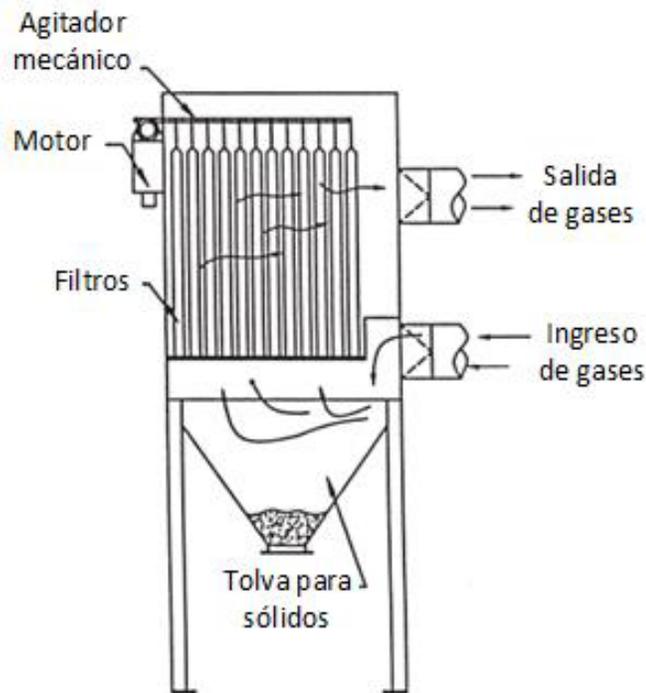


Figura 2.7: Filtro de mangas mecánico

2.3.2. Pulse jet

En el sistema Pulse Jet, el MP es retenido en la parte interior de los filtros tubulares. Según la frecuencia requerida, el MP es retirado de los filtros mediante anillos ubicados en la parte exterior de los filtros, que expulsan aire a alta presión hacia el interior de ellos. Cada unidad de filtración, posee un anillo con la capacidad de moverse a lo largo de éste (Figura 2.8 [16]).

2.3.3. Reverse Air

El sistema Reverse-Air permite la limpieza continua de los filtros, mediante un dispositivo que emite aire proveniente de un ventilador, y cuya rotación abarca todos los filtros. Este aire es proporcionado en sentido contrario a las emisiones contaminantes (Figura 2.9 [16]).

2.3.4. Características filtros de manga

En cuanto a su operación, los filtros de manga presentan características en común, que son detalladas a continuación [11, 12, 13] [17]. Detalles sobre sus aspectos técnicos se presentan en la Tabla 2.4

- Alta mantención (e.g. reemplazo de filtros).

Tabla 2.3: Características de materiales filtrantes.

Material	Temperatura Máxima [$^{\circ}C$]	Resistencia a						
		Abrasión	Flexibilidad	Ácidos minerales	Ácidos orgánicos	Alcalinos	Fluoruros	Solventes
Nylon (Nomex)	205	Ex	Ex	R	R	MB	B	Ex
Teflón	260	R,B	R	Ex	Ex	Ex	Es,R	Ex
Fiberglass	260	Es,B	R	MB	Ex	Es,R	Es	Ex

Es: Escasa, R: Razonable, B: Buena, MB: Muy Buena, Ex: Excelente

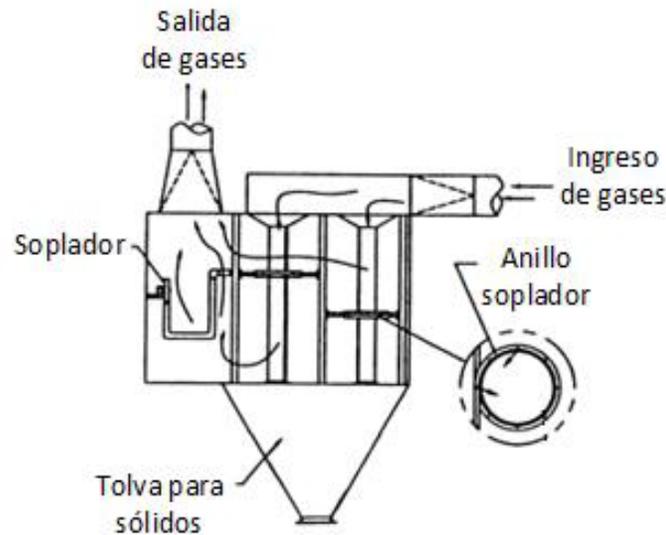


Figura 2.8: Filtro de mangas pulse jet

- Filtros pueden resultar costosos (dependiendo del tamaño de partícula a separar y material del filtro), con una vida útil estimada de 2 años.
- Precaución con la condensación de agua en los filtros.
- Riesgo de inflamabilidad (para concentraciones de MP mayores a $50 \left[\frac{g}{m^3} \right]$ en el interior del contenedor).
- La mantención requiere de elementos de protección personal adecuados.
- MP recolectado en estado sólido.

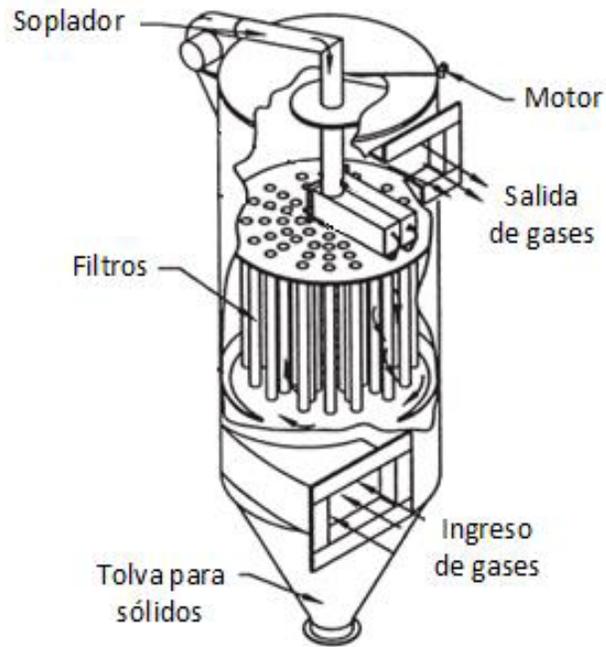


Figura 2.9: Filtro de mangas reverse air

2.4. Otras tecnologías

Además de las tecnologías previamente descritas, existen otros equipos. Muchos de ellos, como los separadores con ayuda mecánica, separadores por momentum, y las cámaras de sedimentación, se han visto superados por los separadores ciclónicos, que tienen mayores eficiencias, menores requerimientos de espacio y costos comparables [19, 20].

De igual modo, se omitirá el análisis de los precipitadores electrostáticos, debido que sus altos costos, así como su nivel de mantención y el flujo de emisiones presumiblemente variable en la caldera, resultan poco recomendados para el caso específico de la CAO [21].

Tabla 2.4: Características de filtros de mangas

	Filtros de mangas		
	Agitador mecánico	Pulse jet	Reverse air
Eficiencia	De 0 a 2,5 [μm]: 99 %. De 2,5 a 10 [μm]: 99,5 % Depende de la velocidad del flujo gaseoso, características del MP, material filtrante, mecanismo de limpieza, etc.		
Caída de Presión [kPa]	1 a 2,5	2 a 2,5	1 a 1,5
Temperatura de operación [$^{\circ}C$]	Fiberglass y Teflón: hasta 260 Nomex: hasta 205		
Concentración MP [$\frac{g}{m^3}$]	1 a 23		
Costos de inversión [$\frac{USD}{(m^3/s)}$]	50.000		
Costo anual O y M [$\frac{USD}{(m^3/s)}$]	13.700 a 75.000	16.000 a 74.000	20.500 a 85.500

Capítulo 3

Elección de la tecnología a diseñar

Para seleccionar el equipo a diseñar es necesario tener información de las características de las emisiones a tratar. Para tener una primera noción, resulta útil realizar una estimación de la concentración y distribución de tamaño del MP que se emite en la combustión de biomasa. Esto permite saber qué tecnologías podrían ser implementadas y cuáles pueden ser descartadas.

Es posible realizar estimaciones de las emisiones de MP en calderas mediante métodos desarrollados por la EPA [22, 23]. Por otro lado, para tener en cuenta mediciones experimentales de situaciones semejantes, se comparan los resultados estimados con las emisiones en sistemas de combustión que utilizan viruta y aserrín de madera. En ambos casos, las emisiones son consideradas en condiciones estándar.

3.1. Estimación y comparación de emisiones de material particulado

Se puede calcular la concentración de MP en la caldera como el cociente entre el flujo másico de MP y el flujo volumétrico de emisiones producido.

El flujo másico de MP se puede estimar mediante el factor de emisión de MP, que se define como el promedio de la tasa de emisión de este contaminante, con el nivel de actividad de su fuente. De éste modo, si se conoce el factor de emisión de MP para la biomasa, y la masa consumida de ésta, es posible estimar el flujo másico de MP producido (ecuación 3.1).

$$\dot{m}_{MP} = FE \cdot \dot{m}_C \quad (3.1)$$

- \dot{m}_{MP} : Flujo másico de MP producido.
- FE : Factor de emisión de MP para la biomasa, *adimensional*.
- \dot{m}_C : Flujo másico de combustible consumido.

El flujo volumétrico de gases emitidos, se puede estimar mediante el Método 19 de la EPA [24], que proporciona las ecuaciones 3.2 y 3.3.

$$F_E = F_d \cdot \left(\frac{20,9}{20,9 - \%O_2} \right) \cdot H \quad (3.2)$$

$$H = \dot{m}_C \cdot HHV \quad (3.3)$$

- F_E : Flujo volumétrico de gases emitidos.
- F_d : Factor de combustible.
- $\%O_2$: Porcentaje de oxígeno en los gases emitidos.
- H : Tasa de calor producido
- \dot{m}_C : Flujo másico de combustible.
- HHV : Poder calorífico superior.

De esta forma, la concentración de MP resulta ser independiente del consumo de combustible (ecuación 3.4).

$$[MP] = \frac{\dot{m}_{MP}}{F_E} = \frac{FE}{F_d \cdot \left(\frac{20,9}{20,9 - \%O_2} \right) \cdot HHV} \quad (3.4)$$

Como resultado, se obtiene que la concentración de MP es de 293 $\left[\frac{mg}{m^3} \right]$ (detalles en anexos A.1). Por otro lado, los valores documentados para la combustión de aserrín y viruta son cercanos a 206 $\left[\frac{mg}{m^3} \right]$ [3].

3.2. Distribución de tamaño de partículas

El MP integra partículas de diversos tamaños, siendo especialmente importantes aquellas con diámetro menor a 10 $[\mu m]$, debido a que son dañinas para la salud de las personas. Por otro lado, la eficiencia de las tecnologías para el control de MP depende del diámetro de éste. Mientras menor sea el diámetro de las partículas, la eficiencia será menor.

Al conocer la distribución de MP y la eficiencia de cada tecnología en cada rango de diámetro de partícula, es posible calcular la disminución en las emisiones de MP que implica utilizar cada una de ellas. Además, estas caracterizaciones servirán de referencia para comparar las mediciones realizadas en la caldera de la CAO.

En la tabla 3.1 se muestran las concentraciones y distribuciones de masa en función del tamaño de partículas calculadas mediante el método de la EPA, y según la combustión de aserrín y viruta de madera.

Tabla 3.1: Distribuciones de tamaños de partículas

	Estimación EPA	Combustión de aserrín y viruta
Concentración $\left[\frac{mg}{m^3}\right]$	293	206
Porcentaje de masa acumulada		
<10 $[\mu m]$	90 %	98 %
<6 $[\mu m]$	86 %	
<2,5 $[\mu m]$	76 %	67 %
<1,25 $[\mu m]$	69 %	
<1 $[\mu m]$	67 %	43 %

3.3. Comparación de emisiones de MP controladas

Considerando las distribuciones másicas de tamaños de partículas, y conociendo las eficiencias de cada tecnología, para cada rango de tamaño, es posible obtener una aproximación de las características de las emisiones con cada tratamiento (ejemplo de cálculo en anexos A.3), lo que se resume en la Tabla 3.2.

Esta comparación permite realizar una primera selección del sistema a diseñar, ya que diferencia a aquellas capaces de disminuir las emisiones de MP a niveles adecuados.

El resultado obtenido de la estimación de concentración de MP es de 293 $\left[\frac{mg}{m^3}\right]$, mientras que el documentado en la combustión de biomasa es de 206 $\left[\frac{mg}{m^3}\right]$ [3]. Advirtiendo las condiciones de humedad del combustible utilizado en la CAO, no se puede descartar que las emisiones logren ese nivel. Debido a esto, se consideran ambos valores en la evaluación del desempeño de los equipos.

Tabla 3.2: Estimación de emisiones controladas

Diámetro menor a	Estimación EPA			Combustión aserrín y viruta		
	2,5 μm	6 μm	10 μm	2,5 μm	6 μm	10 μm
Emisiones sin controlar $\left[\frac{mg}{m^3}\right]$	223	252	264	138	174	203
Emisiones controladas mediante:						
Ciclón $\left[\frac{mg}{m^3}\right]$	200	219	225	124	148	162
Multiciclón $\left[\frac{mg}{m^3}\right]$	45	46	47	69	78	82
Venturi $\left[\frac{mg}{m^3}\right]$	22	24	24	14	16	16
Torre de bandejas $\left[\frac{mg}{m^3}\right]$	167	168	169	103	105	105
Torre aspersión $\left[\frac{mg}{m^3}\right]$	178	184	185	110	118	120
Filtro de mangas $\left[\frac{mg}{m^3}\right]$	2	2	2	1	1	2

3.4. Selección de la tecnología

Observando los resultados preliminares de reducción de MP en la Tabla 3.2, se debe descartar el desarrollo de las siguientes tecnologías, debido a que serían incapaces de reducir las emisiones a los niveles mínimos normados, de 112 $\left[\frac{mg}{m^3}\right]$:

- Ciclón
- Torre de bandejas
- Torre de aspersión

A continuación, se discutirán los distintos aspectos de las tecnologías con resultados más favorables. Para esto, se resumen sus características en la tabla 3.3.

Tabla 3.3: Comparación de tecnologías destacadas

	Multiciclón	Depurador Venturi	Filtros de mangas
Eficiencia	0 a 2,5 [μm]: 50 % 2,5 a 6 [μm]: 75 % 6 a 10 [μm]: 85 %	0 a 2,5 [μm]: 90 % 2,5 a 6 [μm]: 95 % 6 a 10 [μm]: 99 %	0 a 2,5 [μm]: 99 % 2,5 a 10 [μm]: 99,5 %
Caída de presión [kPa]	2 a 2,5	2,5 a 7,5	1 a 2,5
Mantenimiento	Baja mantenimiento	Baja mantenimiento	Alta mantenimiento
Temperatura de operación [$^{\circ}C$]	Hasta 540	4 a 400	hasta 260
Concentración de MP [$\frac{g}{m^3}$]	2,3 a 230	1 a 115	1 a 23
Costos de inversión [$\frac{USD}{(m^3/s)}$]	5.900	14.500	50.000
Costo anual de operación y mantenimiento [$\frac{USD}{(m^3/s)}$]	2.200 a 26.000	13.500 a 375.000	13.700 a 85.500
Agua requerida [$\frac{L}{m^3}$]	No requiere	1	No requiere
Residuos producidos	Sólidos	Lodos	Sólidos

En cuanto a la eficiencia de los equipos, el multiciclón entregaría resultados aceptables, pero se debe tomar en cuenta que su uso es principalmente como etapa primaria de separación. Esto se debe a que su funcionamiento resulta más efectivo cuando las concentraciones de partículas son altas, siendo el límite inferior recomendado para su operación, de 2300 [$\frac{mg}{m^3}$], por lo tanto, los resultados obtenidos se encuentran sobreestimados. El depurador de Venturi y los filtros de manga, por otro lado, presentan mejores resultados, sin problemas en procesos con baja concentración de MP.

Desde un punto de vista energético, es importante considerar que el multiciclón y los filtros de mangas significan una menor pérdida de carga en comparación con el depurador tipo Venturi. Si bien la relación entre la pérdida de carga y la energía utilizada por el sistema es proporcional, sólo en el multiciclón se puede observar una ventaja en términos económicos. Esto se debe a que en el depurador Venturi, los costos de operación pueden ser altos debido al uso de energía, pero sus costos de mantenimiento son reducidos, mientras que en los filtros de mangas ocurre la situación inversa.

El multiciclón y el depurador Venturi destacan por ser equipos simples y sin piezas móviles, lo que facilita su mantenimiento. Los filtros de manga, en cambio, requiere mantenimientos frecuentes y especializadas (para comprobar el estado de los filtros, válvulas y sistema de recolección de sólidos, además de la limpieza de piezas internas del sistema). Lo anterior implicaría la necesidad de detener el funcionamiento de la caldera en periodos de mantenimiento y la contratación de personal capacitado.

Si bien la temperatura esperada de los gases de combustión tiene valores cercanos a los 200°C, y por lo tanto, todos los equipos estarían en condiciones de ser utilizados, también es cierto que en las emisiones gaseosas se pueden observar partículas que continúan en combustión, incluso después de la etapa de depuración actual. En el multiciclón y el depurador Venturi, esto no tiene mayores consecuencias, debido a que son estructuras metálicas. Sin embargo, en los filtros de mangas existe el riesgo de inflamación del material filtrante, lo que conduce al deterioro de los filtros e incluso, asocia un riesgo de incendio [25].

Por otro lado, existen otras condiciones en los gases que afectan la vida útil de los filtros. Además del posible daño debido a partículas a altas temperaturas, mencionado anteriormente, los gases con altos niveles de humedad pueden provocar la obstrucción de los filtros, que ocurre cuando los gases se enfrían bajo el punto de rocío, causando la condensación de la humedad en los sólidos depositados sobre el material filtrante, lo que puede concluir en su rompimiento [25].

Los costos de inversión de las tecnologías propuestas son considerablemente menores en el caso del multiciclón y el depurador Venturi. Una ventaja que supone además el depurador, es que el tratamiento actual funciona de manera similar, por lo que las características de los ductos, equipos auxiliares y disposición general del proceso podrían ser compatibles con su desarrollo, disminuyendo sus costos de inversión.

Es necesario mencionar la producción de lodos en el depurador Venturi, en contraste con los sólidos recolectados por los filtros de mangas y el multiciclón. Sin embargo, existen métodos para el tratamiento y la reutilización de agua, de manera similar a como se realiza actualmente en la CAO.

En cuanto a la operación de los equipos, se debe destacar que la caldera posee flujos variables de gases. Estas diferencias se deben principalmente a la activación discontinua del ventilador de tiro inducido. Sin embargo, también existen variaciones instantáneas en el flujo volumétrico. Estas características suponen un problema para el uso de un multiciclón, ya que su diseño es específico en relación al flujo a tratar.

En resumen, el depurador Venturi destaca por ser un equipo capaz de lograr el objetivo de disminuir las emisiones de MP frente a las condiciones de temperatura, humedad y flujo variable de la caldera, sin incurrir en riesgos de seguridad, y adecuándose a los requisitos operativos de la caldera. Además, es un sistema semejante al tratamiento actual, por lo tanto, el personal de la CAO podría adaptarse fácilmente a su operación. Con respecto a los costos asociados, se puede observar que los sistemas de alta eficiencia conllevan costos de operación y mantención más elevados que las alternativas con menor rendimiento. En cuanto a la inversión, el depurador Venturi resulta más conveniente que los filtros de mangas, y sus semejanzas con el proceso actual lo hacen aún más económicamente atractivo.

Debido a lo expuesto en esta sección, se decidió continuar con el desarrollo del depurador tipo Venturi.

Capítulo 4

Caracterización del material particulado

4.1. Metodología de mediciones

A continuación se presenta la metodología utilizada para realizar las mediciones a las emisiones de la caldera de biomasa de la CAO, con el objetivo de caracterizarlas y definir un sistema de reducción de MP, junto con determinar las condiciones de operación para su diseño.

Como se observa en la Figura 4.1, los gases de combustión, provenientes de la caldera, son impulsados hacia un equipo de depuración que reduce la concentración de MP en la corriente gaseosa. El ventilador tiene un funcionamiento intermitente, activándose cuando se ingresa biomasa a la caldera y deteniéndose cuando se ha logrado la presión de vapor requerida.

Las mediciones se realizaron en la sección de tubería anterior al depurador, como se indica en la Figura 4.1, lo que permite conocer las características del flujo gaseoso en condiciones semejantes a las que enfrentará el equipo a diseñar.

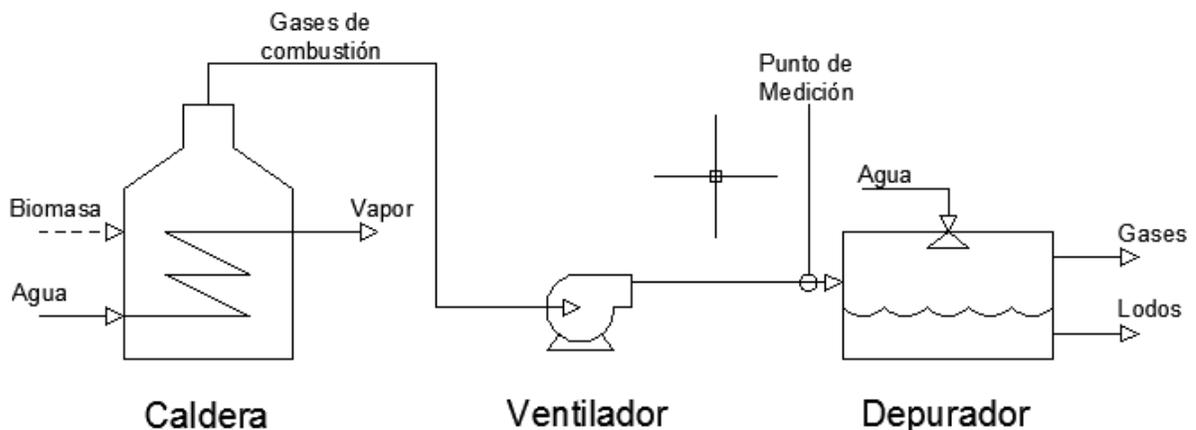


Figura 4.1: Esquema del proceso y punto de medición

Las mediciones se realizaron a las 08:00, 12:00 y 20:00 horas, con tres condiciones distintas en cada ocasión:

- Mientras se ingresaba biomasa húmeda a la caldera.
- Mientras se ingresaba biomasa seca a la caldera.
- Mientras el ventilador se encontraba detenido.

De este modo, se pueden buscar diferencias en las emisiones según el estado del combustible, las condiciones ambientales y las condiciones de operación de la caldera.

4.1.1. Variables a medir

- Concentración de MP.
- Temperatura de gases.
- Flujo de gases.
- Presión de gases.

4.1.2. Materiales e instrumentos

- Balanza analítica.
- Sensor de temperatura PT100.
- Tubo de Pitot.
- Jeringas de 60 [ml].
- Filtros para jeringas de 0,2 [μm], 1 [μm] y 5 [μm].
- Tubo muestreador.

4.1.3. Procedimiento

1. Medir la masa inicial de los filtros de 0,2 [μm], 1 [μm] y 5 [μm] con la balanza analítica.
2. Medir presión, velocidad y temperatura de los gases en la tubería.
3. Extraer 60 [ml] de gases mediante la jeringa conectada por una sonda al muestreador.
4. Conectar un filtro de cada tipo en serie, como se indica en la Figura 4.2.
5. Con las jeringas de 60 [ml], extraer 3000 [ml] de gases a través de este dispositivo.
6. Medir presión, velocidad y temperatura de los gases en la tubería.
7. Secar los filtros.
8. Medir la masa final de los filtros de 0,2 [μm], 1 [μm] y 5 [μm] con la balanza analítica.

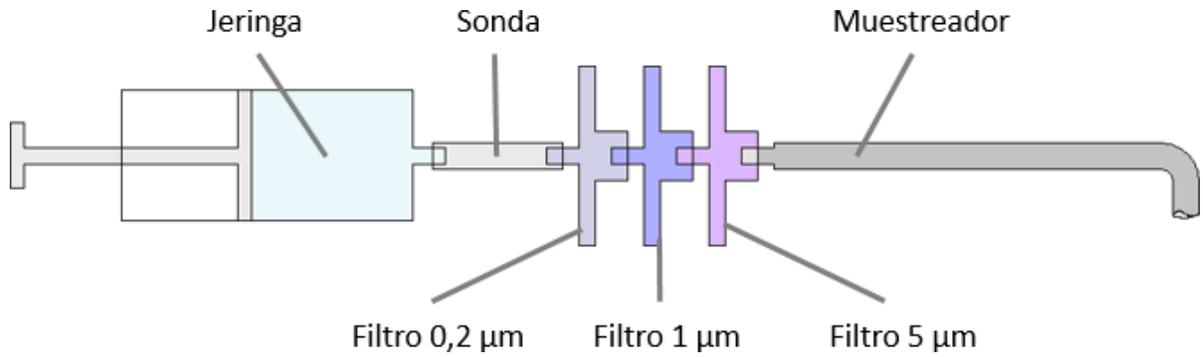


Figura 4.2: Dispositivo para muestras gaseosas

4.2. Resultados

La concentración de material particulado se calculó mediante la diferencia de masa de los filtros antes y después de ser utilizados, y el volumen de gases extraídos en las muestras. Se asumió que el tamaño aerodinámico de las partículas captadas por los filtros es igual o mayor al tamaño de los poros de la membrana filtrante.

Los filtros contienen humedad proveniente del ambiente, y al filtrar los gases de la caldera condensa parte del vapor contenido en éstos. Para conocer la humedad inicial de los filtros, se midió la diferencia de masa provocada por el secado en filtros no empleados en la caldera (ver Anexo B.1).

Este valor se adicionó a la diferencia de masa inicial y final de filtros usados en las mediciones. El resultado corresponde a la masa de MP retenida por los filtros (Anexo B.2).

Las concentraciones de MP se calcularon mediante los volúmenes de gases filtrados (Anexo B.3), asumiendo la inexistencia de partículas con tamaño menor a $0,2 [\mu m]$. Basándose en el comportamiento de los datos obtenidos de bibliografía, se ajustaron las concentraciones acumuladas de partículas a curvas potenciales (definidas por las ecuaciones 4.1, 4.2 y 4.3, para los casos de biomasa húmeda, biomasa seca y ventilador inactivo, respectivamente).

$$[M(d_p)]_{ac} = 117,94 \cdot (d_p - 0,2)^{0,3932} \quad (4.1)$$

$$[M(d_p)]_{ac} = 209,94 \cdot (d_p - 0,2)^{0,4407} \quad (4.2)$$

$$[M(d_p)]_{ac} = 90,777 \cdot (d_p - 0,2)^{0,3099} \quad (4.3)$$

La Figura 4.3 muestra las regresiones potenciales de las mediciones de concentración de MP en las emisiones de la caldera en las tres condiciones de operación definidas en la metodología, y se comparan con las referencias de bibliografía.

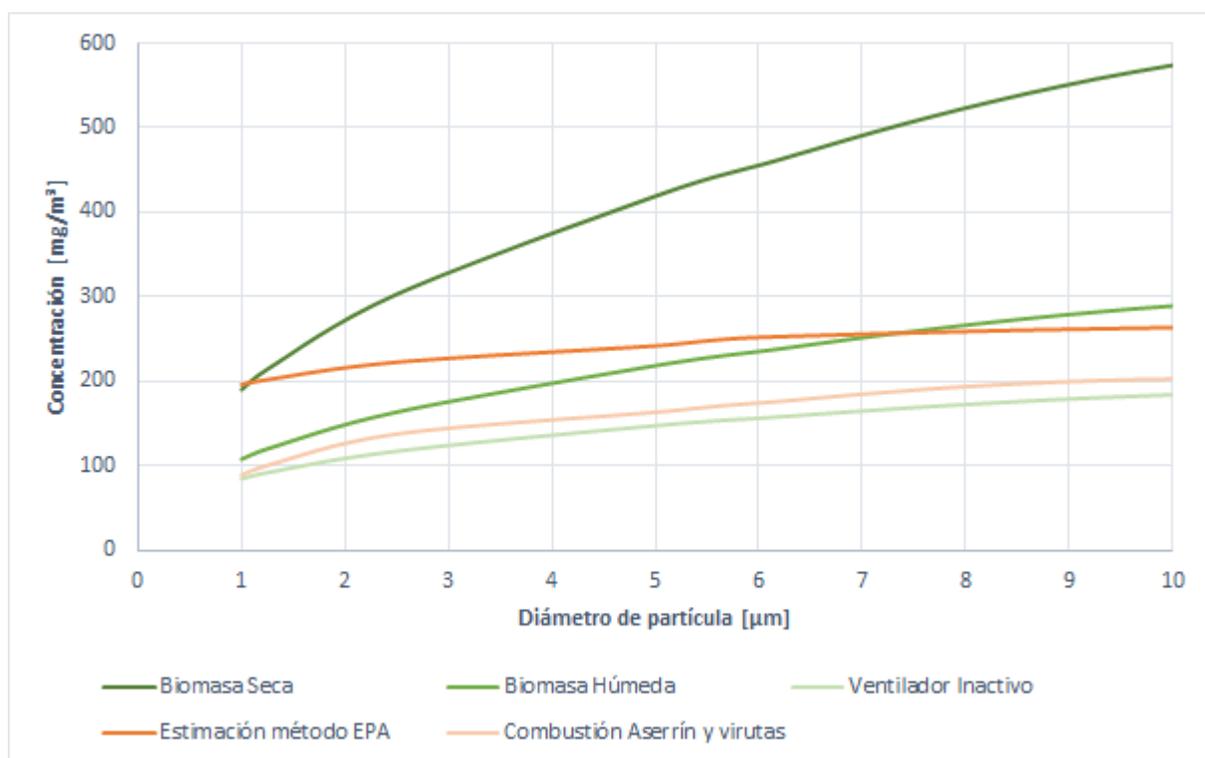


Figura 4.3: Distribución de concentración de MP en función del tamaño de partícula

Las temperaturas, presiones y flujos promedios, junto con la desviación estándar relativa de las mediciones en cada uno de estos casos se presentan en la Tabla 4.1. Para detalles de las mediciones ver Anexo B.4.

Tabla 4.1: Mediciones de temperatura, presión y flujo

		Temperatura [°C]	Presión Relativa [Pa]	Flujo $\frac{m^3}{s}$
Biomasa Húmeda	Promedio	173	24	1,22
	σ relativa	12 %	20 %	8 %
Biomasa Seca	Promedio	186	25	1,28
	σ relativa	8 %	13 %	9 %
Ventilador Inactivo	Promedio	139	2	0,45
	σ relativa	5 %	20 %	18 %

4.3. Análisis

Como se observa en la Figura 4.3, las concentraciones de MP se encuentran en los rangos esperados, mientras que las medidas de temperatura, flujo y presión poseen valores de desviación estándar relativa menores a 20 % (Tabla 4.1), lo que permite confiar en el procedimiento experimental y los resultados obtenidos. Sin embargo, se debe advertir que el muestreo no es isocinético, debido a las dificultades para extraer los gases a la velocidad adecuada, ya que el flujo era variable, y la extracción se realizó de manera manual.

En el caso de la "Biomasa Seca", la concentración medida fue la de mayor magnitud. Esto puede parecer poco intuitivo, sin embargo, los factores de emisión de MP para madera seca son mayores que para madera húmeda (detalles en Anexo B.5).

En cuanto a las condiciones de temperatura, presión y flujos medidos (Tabla 4.1), no se encontraron mayores diferencias entre usar biomasa seca y húmeda. Sin embargo, al detener el ventilador sí se midieron magnitudes menores, debido a la disminución en la combustión en la caldera.

Considerando que la principal diferencia en la operación de la caldera es la activación o detención del ventilador, y tomando en cuenta que las concentraciones mayores de MP ocurren al utilizar combustible seco, se decidió diseñar el depurador tipo Venturi para dos casos:

- Al utilizar biomasa seca, debido a sus condiciones extremas de emisión de MP.
- Cuando el ventilador está inactivo, ya que la mayor parte del tiempo se encuentra en este estado, y el flujo a tratar es menor, por lo que requiere menos energía para su operación.

El caso de la biomasa húmeda se descartó como condición de diseño, ya que el flujo a tratar es semejante al de biomasa seca. Por otro lado, es recomendable la utilización de biomasa seca debido a su mayor poder calorífico, que, además de significar un menor consumo de biomasa, implica un menor tiempo de funcionamiento de la caldera con el ventilador activado, disminuyendo el consumo energético del sistema.

Capítulo 5

Diseño del sistema de depuración

El funcionamiento de un depurador tipo Venturi requiere la presencia de algunos equipos secundarios, relacionados de la forma indicada en la Figura 5.1, y que cumplen las siguientes funciones:

- Bomba: impulsa el agua que actúa en el depurador, captando el MP.
- Eliminador de niebla: permite separar el agua atomizada del flujo gaseoso.
- Ventilador: extrae gases desde la caldera, a través del depurador y del eliminador de niebla.
- Sedimentador: permite disminuir la concentración de partículas en el agua residual, para su reutilización.
- Estanque: contiene el agua que se suministrará al depurador.

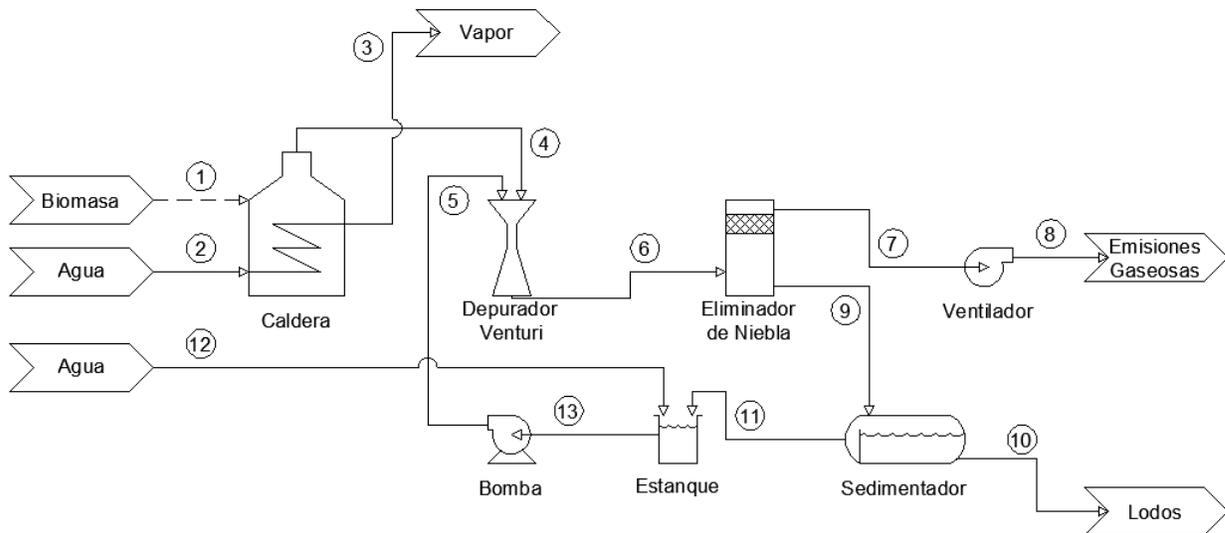


Figura 5.1: Sistema de depuración

El objetivo de este trabajo es el diseño de un sistema para la reducción del MP emitido. Para esto, se diseñará un depurador tipo Venturi y el estanque para el eliminador de niebla, mientras que los equipos secundarios serán dimensionados.

El diseño y dimensionamiento del sistema de depuración debe tener las características necesarias para operar en dos casos:

- Cuando la combustión en la caldera es alta (flujo máximo).
- Cuando la combustión en la caldera es baja (flujo mínimo).

Para simplificar su operación, se buscarán condiciones tales que permitan disminuir la concentración de MP a niveles adecuados para ambos casos, sin que se deban realizar mayores modificaciones a las condiciones de operación del sistema entre estos estados.

5.1. Depurador Venturi

El objetivo del diseño del depurador tipo Venturi, es la minimización de la concentración de las emisiones de MP en la caldera de biomasa. Para esto, se requiere conocer las emisiones de MP y la eficiencia del equipo.

Las emisiones de MP ya fueron caracterizadas anteriormente, por lo que se conoce su concentración y distribución de tamaños.

Por otro lado, la eficiencia del equipo se puede determinar y optimizar mediante la aplicación de un modelo del depurador. La principal característica del depurador tipo Venturi es su sección estrecha, donde se capta la mayor parte de la masa de MP mediante agua.

El modelo infinite-throat [26], relaciona la captura de MP con las características geométricas y condiciones de operación que enfrenta el equipo. En particular, permite determinar el agua necesaria para la depuración, y el diámetro y longitud de la sección estrecha de un depurador tipo Venturi de geometría cilíndrica. Estudios indican que este método logra predecir el desempeño de depuradores tipo Venturi existentes [26, 27].

Finalmente, el diseño de la sección convergente y divergente, se realiza utilizando parámetros recomendados para sus longitudes y ángulos, mientras que los materiales de construcción del equipo se deben seleccionar considerando la erosión y la presión externa sobre éste.

5.1.1. Objetivo del diseño

Al diseñar el depurador tipo Venturi, se desea minimizar las emisiones de MP, lo que es equivalente a minimizar la concentración de estas emisiones.

Utilizando un modelo empírico para el diseño del depurador tipo Venturi, es posible determinar la eficiencia del equipo mediante la selección de ciertas variables, que determinan sus características geométricas y de operación. Esta selección se puede realizar de tal modo, que el equipo diseñado cumpla su objetivo de minimizar las emisiones de MP.

A continuación se presenta la forma en que se enfrentará el problema, y la función objetivo de éste.

La masa total de MP proveniente de la caldera, corresponde a la suma de las masas de cada diámetro de partícula existentes (ecuación 5.1).

$$M_T = \int_0^{\infty} m(d_p) \cdot dd_p \quad (5.1)$$

- M_T : Masa total de MP proveniente de la caldera.
- $m(d_p)$: Masa de MP de partículas de diámetro d_p .
- d_p : Diámetro de partícula.

Al considerar la eficiencia del depurador en función del diámetro de partícula, la masa de MP emitida al ambiente se calcula según la ecuación 5.2.

$$M_E = \int_0^{\infty} m(d_p) \cdot (1 - \eta) \cdot dd_p \quad (5.2)$$

- M_E : Masa de MP emitida al ambiente.
- η : Eficiencia del depurador.

La masa de MP de diámetro d_p , se puede expresar como el producto entre la concentración de partículas de ese diámetro y el volumen de las emisiones (ecuación 5.3). Reemplazando esta igualdad en la ecuación 5.2, resulta la expresión 5.4. El propósito del diseño del depurador tipo Venturi, es que posea las características apropiadas para minimizar la concentración del MP emitido al ambiente.

$$m(d_p) = [M(d_p)] \cdot V \quad (5.3)$$

- $[M(d_p)]$: Concentración de MP con diámetro de partícula d_p .
- V : Volumen de las emisiones gaseosas.

$$[M]_E = \frac{M_E}{V} = \int_0^{\infty} [M(d_p)] \cdot (1 - \eta) \cdot dd_p \quad (5.4)$$

- $[M]_E$: Concentración de MP en los gases emitidos al ambiente.

5.1.2. Emisiones de MP

Las concentraciones de MP, en función del diámetro de partícula, se obtienen de las curvas de concentración de las mediciones realizadas en la caldera. Estas curvas muestran la concentración del MP menor a cada diámetro de partícula. Al derivar estas funciones, es posible estimar la concentración de MP para cada diámetro.

Las concentraciones acumuladas de MP están dadas por las funciones 4.2 y 4.3, determinadas de las mediciones experimentales. Sus derivadas corresponden a 5.5 y 5.6, para el caso de “Flujo mínimo” y “Flujo máximo”, respectivamente.

$$[M(d_p)] = \frac{92,5206}{(d_p - 0,2)^{0,5593}} \quad (5.5)$$

$$[M(d_p)] = \frac{28,1318}{(d_p - 0,2)^{0,6901}} \quad (5.6)$$

- $[M(d_p)]_{ac}$: Concentración de MP de diámetro menor a d_p .
- $[M(d_p)]$: Concentración de MP de diámetro d_p .

5.1.3. Modelo

En el modelo infinite-throat [26], se calcula la eficiencia del depurador (η) para cada diámetro de partícula (d_p), dependiendo de la velocidad de los gases en la sección estrecha (v_{gt}), su relación volumétrica con el agua utilizada (L/G) y el largo de la sección estrecha (l_t). Mediante la elección de estos tres parámetros, se puede diseñar el depurador.

Se define el grado de penetración (P_t) para las partículas de diámetro d_p , como la fracción de aquellas que no son captadas por el depurador (por lo tanto, se relaciona con la eficiencia según la ecuación 5.7), y se puede calcular mediante parámetros relacionados con las características geométricas y condiciones de operación del depurador (ecuación 5.8, detallada en anexos C.1.1).

$$\eta(d_p) = 1 - P_t(d_p) \quad (5.7)$$

- $\eta(d_p)$: Eficiencia del depurador para las partículas de diámetro d_p .
- $P_t(d_p)$: Grado de penetración de las partículas de diámetro d_p .

$$P_t = P_t(B, K_{po}, u_{de}^*) \quad (5.8)$$

- B : Parámetro de caracterización líquido-gas, *adimensional*.
- K_{po} : Parámetro inercial, *adimensional*.
- u_{de}^* : Razón de velocidades líquido-gases en la sección estrecha, *adimensional*.

La ecuación 5.8 se desarrolló asumiendo que el depurador tipo Venturi posee una sección estrecha de largo infinito. Este supuesto es válido cuando se cumple la condición de la relación 5.9.

$$l = \frac{3 \cdot l_t \cdot C_D \cdot \rho_g}{2 \cdot d_d \cdot \rho_l} > 2 \quad (5.9)$$

- l : Parámetro de largo de la sección estrecha del depurador tipo Venturi, *adimensional*.
- l_t : Largo de la sección estrecha del depurador tipo Venturi, $[m]$.
- C_D : Coeficiente de arrastre, *adimensional*.
- ρ_g : Densidad de los gases, $[\frac{kg}{m^3}]$.
- d_d : Diámetro de las gotas, $[m]$.
- ρ_l : Densidad del líquido, $[\frac{kg}{m^3}]$.

Para calcular el grado de penetración se deben calcular, K_{po} (ecuación 5.10), B (ecuación 5.12) y u_{de}^* (ecuación 5.15). De estos, sólo el primero depende del diámetro de partícula.

K_{po} se encuentra en función de d_d , que corresponde al diámetro de las gotas de agua en el depurador (estimado con la relación empírica de la ecuación 5.11).

$$K_{po} = \frac{d_p^2 \cdot v_{gt}}{9 \cdot \mu_g \cdot d_d} \quad (5.10)$$

- d_p : Diámetro de partícula, $[mA]$ ¹.
- v_{gt} : Velocidad de los gases, $[\frac{m}{s}]$.
- μ_g : Viscosidad dinámica, $[Pa \cdot s]$.
- d_d : Diámetro de gotas, $[m]$.

$$d_d = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{v_{gt}} + 0,918 \cdot (L/G)^{1,5} \quad (5.11)$$

- v_{gt} : Velocidad de los gases, $[\frac{m}{s}]$.
- L/G : Razón de flujo líquido-gas, *adimensional*.

Por otro lado, B depende del valor del coeficiente de arrastre C_D 5.13, que a su vez, está relacionado con el número de Reynolds 5.14.

$$B = L/G \cdot \frac{\rho_l}{\rho_g \cdot C_D} \quad (5.12)$$

- L/G : Razón de flujo líquido-gas, *adimensional*.
- ρ_l : Densidad del líquido, $[\frac{kg}{m^3}]$.
- ρ_g : Densidad de los gases, $[\frac{kg}{m^3}]$.
- C_D : Coeficiente de arrastre, *adimensional*.

$$C_D = 0,22 + \frac{24}{N_R} \cdot (1 + 0,15 \cdot N_R^{0,6}) \quad (5.13)$$

¹"Diámetro aerodinámico, su unidad de medida es $[mA] = \left[m \left(\frac{kg}{m^3} \right)^{0,5} \right]$ "

- N_R : Número de Reynolds, *adimensional*

$$N_R = \frac{v_{gt} \cdot d_d \cdot \rho_g}{\mu_g} \quad (5.14)$$

- v_{gt} : Velocidad de los gases, $[\frac{m}{s}]$.
- d_d : Diámetro de gotas, $[m]$.
- ρ_g : Densidad de los gases, $[\frac{kg}{m^3}]$.
- μ_g : Viscosidad dinámica, $[Pa \cdot s]$.

El último parámetro necesario para calcular el grado de penetración, es decir, la velocidad relativa líquido-gas, se puede estimar mediante la ecuación 5.15

$$u_{de}^* = 2 \left(1 - \left(\frac{l+8}{8} \right)^2 + \left(\frac{l+8}{8} \right) \left[\left(\frac{l+8}{8} \right)^2 - 1 \right]^{0,5} \right) \quad (5.15)$$

- l : Parámetro de largo de la sección estrecha, *adimensional*.

Finalmente, la correlación 5.16 permite realizar una estimación de la caída de presión en el depurador.

$$P = 1,01 \cdot 10^3 \cdot u_{de}^* \cdot v_{gt}^2 \cdot L/G \quad (5.16)$$

- u_{de}^* : Razón de velocidad líquido-gas en la sección estrecha, *adimensional*.
- v_{gt} : Velocidad de los gases, $[\frac{m}{s}]$.
- L/G : Razón de flujo líquido-gas, *adimensional*.

5.1.4. Procedimiento de diseño y resultados

El modelo anterior utiliza tres variables del proceso (velocidad de los gases en la sección estrecha, largo de esta sección y la razón de flujo líquido-gas). El conjunto de ecuaciones planteadas en el modelo permiten definir las características del depurador tipo Venturi, siendo la más importante la estimación de las emisiones de MP.

Se debe tener en cuenta que la selección de los valores, de las tres variables anteriores, se traducirán en un cierto diseño del equipo. Para cumplir el objetivo del diseño, de minimizar las emisiones de MP, se consideraron valores dentro de rangos recomendados para el depurador, y se utilizó una herramienta de optimización.

Para obtener un diseño adecuado del depurador, primero se resolvió el problema para el caso de flujo máximo, ya que sus condiciones son las más exigentes. Tanto en este caso, como en el de flujo mínimo, se asumió que $\eta = 100\%$ para partículas con diámetro mayor a 10 $[\mu m]$ [15].

Luego, se pueden buscar valores de L/G , l y v_{gt} óptimos para el modelo, de los que derivan la longitud y el diámetro de la sección estrecha del depurador, junto con la pérdida de presión en el equipo.

Se tomaron como restricciones del sistema la condición del modelo ($l > 2$) y valores para las condiciones de operación dentro de rangos recomendados (tabla 5.1) [28].

Tabla 5.1: Restricciones para el primer caso de diseño

	Mínimo	Máximo	Unidades
v_{gt}	45	150	$\left[\frac{m}{s}\right]$
L/G	0,0007	0,0017	<i>adimensional</i>
Caída de presión	2.500	11.250	$[Pa]$
l	2	-	<i>adimensional</i>

Las propiedades físico-químicas de los gases se muestran en anexos C.1.2, mientras que para el líquido se asumieron iguales a las del agua.

Los resultados de la optimización del sistema, cuyo objetivo es la minimización de la concentración de MP en las emisiones (ecuación 5.4), son los siguientes:

- Parámetro $l=3,59$.
- Velocidad de los gases $v_{gt} = 108,22 \left[\frac{m}{s}\right]$.
- Razón líquido-gas $L/G=0,0011$.
- Caída de presión $P=11.250 [Pa]$.
- Diámetro $D=0,123 [m]$.
- Largo de la sección estrecha $l_t=0,366 [m]$.
- MP emitido= $89,5 \left[\frac{mg}{m^3}\right]$.
- Eficiencia global=90,5 % (de $937 \left[\frac{mg}{m^3}\right]$ a $89,5 \left[\frac{mg}{m^3}\right]$).

Para facilitar su eventual fabricación, se corrigieron las dimensiones de diámetro y longitud (a $12 [cm]$ y $37 [cm]$ respectivamente), y se resolvió nuevamente el sistema considerando estas restricciones. Los resultados son:

- Parámetro $l=4,05$.
- Velocidad de los gases $v_{gt} = 113,18 \left[\frac{m}{s}\right]$.
- Razón líquido-gas $L/G=0,0010$.
- Caída de presión $P=11.250 [Pa]$.
- Diámetro $D=0,12 [m]$.
- Largo de la sección estrecha $l_t=0,37 [m]$.
- MP emitido= $89,9 \left[\frac{mg}{m^3}\right]$.
- Eficiencia global=90,4 % (de $937 \left[\frac{mg}{m^3}\right]$ a $89,5 \left[\frac{mg}{m^3}\right]$).

Bajo estas condiciones de geometría, se resolvió el problema para el caso de "Flujo mínimo". Considerando que el flujo de emisiones es menor, se relajó la condición de velocidad mínima y presión mínima. Las restricciones consideradas se muestran en la tabla 5.2.

Tabla 5.2: Restricciones para el segundo caso de diseño

	Mínimo	Máximo	Unidades
v_{gt}	0	150	$\left[\frac{m}{s}\right]$
L/G	0,0007	0,0017	<i>adimensional</i>
Caída de presión	0	11.250	$[Pa]$
l	2	-	<i>adimensional</i>
l_t	0,37		$[m]$
Diámetro	0,12		$[m]$

Los resultados obtenidos son:

- Parámetro $l=2$.
- Velocidad de los gases $v_{gt} = 39,79 \left[\frac{m}{s}\right]$.
- Razón líquido-gas $L/G=0,0013$.
- Caída de presión $P=1.595 [Pa]$.
- MP emitido= $79,1 \left[\frac{mg}{m^3}\right]$.
- Eficiencia global= $69,6 \%$ (de $260 \left[\frac{mg}{m^3}\right]$ a $79,1 \left[\frac{mg}{m^3}\right]$).

Las secciones convergentes y divergentes se determinaron mediante parámetros típicos de diseño para los ángulos de éstos componentes, equivalentes a 25° y 7° respectivamente [29]. El resultado final se puede observar en la Figura 5.2

5.1.5. Material de construcción

El acero inoxidable presenta las condiciones suficientes para ser utilizado en la fabricación de este equipo, gracias a sus propiedades mecánicas, su resistencia a la corrosión, durabilidad y facilidad de limpieza y mantenimiento.

El espesor de las paredes se calcula con la ecuación 5.17 [30], que relaciona la presión externa a la que se encuentra sometida el equipo, el material de construcción y la geometría del estanque (detalles de los cálculos en anexo C.1.3). Como resultado, las paredes de acero inoxidable deben tener un espesor de $4 [mm]$.

$$P_c = K_c E \left(\frac{t}{D_i + t} \right)^3 \quad (5.17)$$

- P_c : Presión crítica, $[kPa]$.
- K_c : Coeficiente de colapso *adimensional*.
- E : Módulo de Young, $[kPa]$.
- t : Espesor de la pared, $[cm]$.
- D_i : Diámetro interno, $[cm]$.

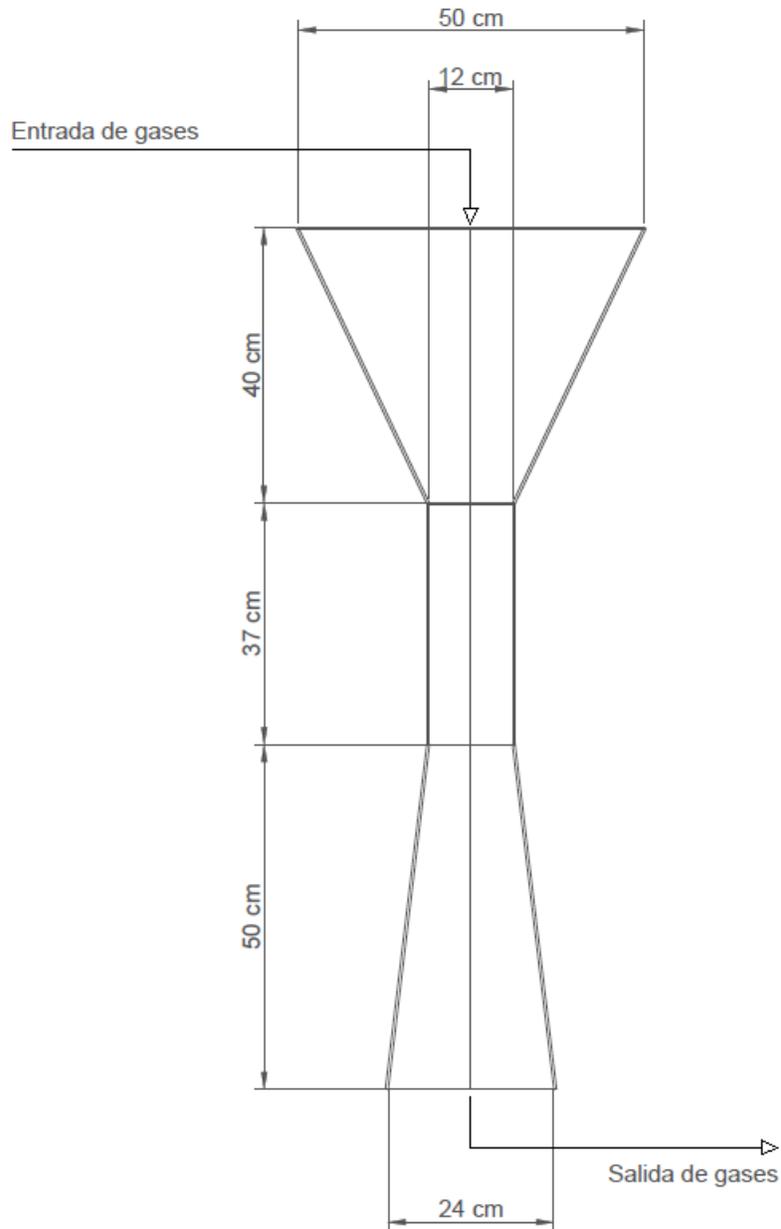


Figura 5.2: Diseño de depurador tipo Venturi

5.2. Eliminador de niebla

El propósito del eliminador de niebla es capturar el agua de la corriente gaseosa. Su elección para esta etapa se debe a que permite tratar flujos variables, además, tiene la ventaja de producir bajas pérdidas de carga.

Para diseñar el tanque del eliminador de niebla, es necesario conocer el diámetro de las gotas del líquido que se captará, seleccionar un tipo de eliminador de niebla, un tipo de estanque y su determinar área transversal.

El diámetro esperado de las gotas de agua es entre 75 $[\mu m]$ y 160 $[\mu m]$ (ecuación 5.11) (Anexo C.2.1). Los eliminadores tienen eficiencias mayores a 99 % para gotas de diámetro mayor a 20 $[\mu m]$ [31].

Entre los tipos de eliminadores de niebla, los más destacados son los tipos "Vane" y "Mesh". Los eliminadores tipo "Vane", son los que presentan mayores beneficios para el proceso de depuración, ya que pueden funcionar prolongadamente sin necesidad de ser limpiados, y su mantención es sencilla. Además, son resistentes a la corrosión y provocan menores caídas de presión que los eliminadores tipo "Mesh".

Se seleccionó el estanque vertical debido a su simplicidad y factibilidad. Considerando el flujo máximo de operación, y la velocidad de diseño para el eliminador de niebla (ecuación 5.18), se calcula la sección transversal, que corresponde a un estanque cilíndrico con diámetro de 55 $[cm]$.

$$V_g = K \cdot \left(\frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_g} \right) \quad (5.18)$$

El eliminador de niebla tiene un rendimiento aceptable cuando la velocidad de operación se encuentra entre un 30 % y un 110 % de la velocidad de diseño. Para el caso de menor flujo, la velocidad corresponde al 35 %.

Mediante las curvas de comportamiento de los eliminadores de niebla [31], se obtiene que la eficiencia esperada es mayor a 99 %, mientras que la caída de presión es de 0,1 $[kPa]$.

Existen recomendaciones para las proporciones en el estanque del eliminador (anexo C.2.2), con las que se determinaron las dimensiones expuestas en la Figura 5.3

Finalmente, el espesor de las paredes se estimó en 4 $[cm]$, bajo los mismos criterios utilizados para el espesor de pared del depurador.

5.3. Dimensionamiento de equipos secundarios

5.3.1. Bomba

A partir de las observaciones realizadas en la CAO, en que la bomba utilizada se renueva periódicamente debido a las características del agua impulsada, que podría contener partículas y sustancias ácidas, se propone la adquisición de una bomba de doble diafragma.

Para el dimensionamiento de la bomba, se consideró el caudal máximo de operación, correspondiente a 1,3 $[\frac{l}{s}]$. Las pérdidas de carga se asignaron a las secciones de succión y descarga, presencia de singularidades y salida del agua hacia el depurador.

Las condiciones de succión y descarga de la bomba provocan pérdidas de carga de 1,5 $[m]$ y 0,9 $[m]$ respectivamente (anexo C.3.1)

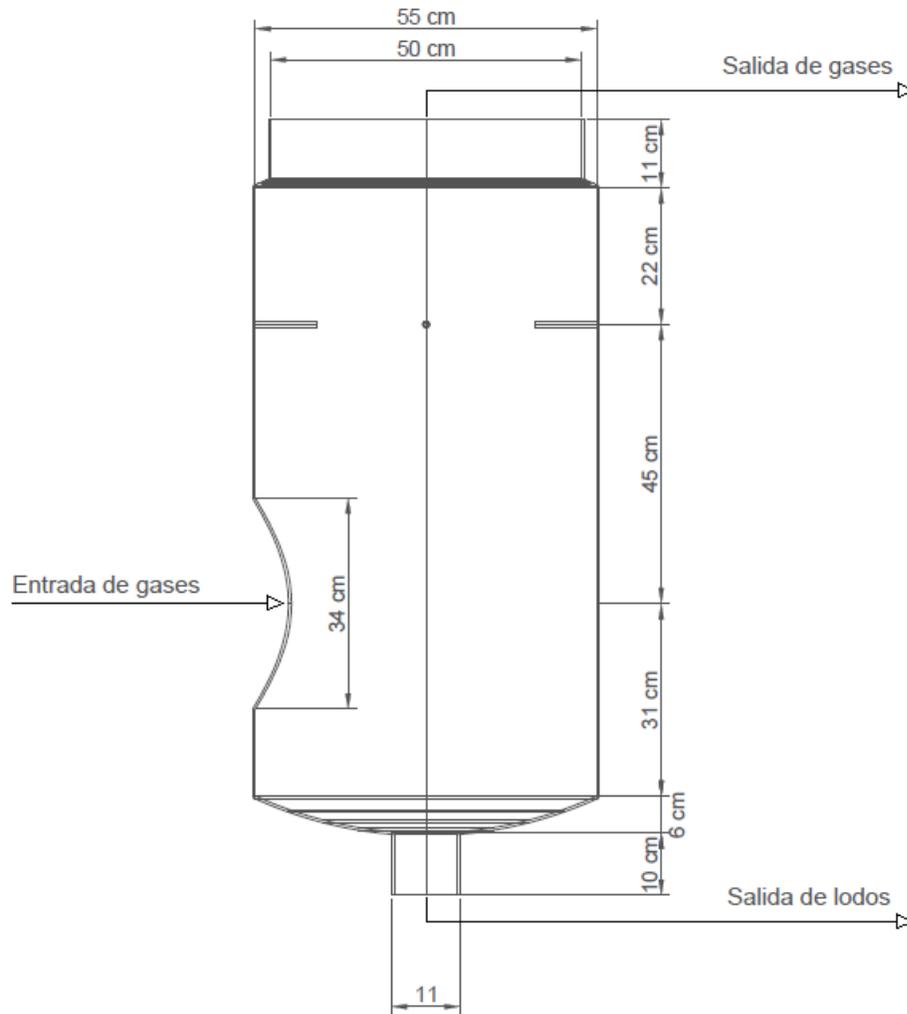


Figura 5.3: Estanque para eliminador de niebla

Las singularidades consideradas fueron 4 curvas de 90° . Dadas las condiciones de operación, la pérdida de carga corresponde a $1,4 [m]$ (anexo C.3.2).

A pesar de que no es necesario un aspersor en el ingreso del agua al depurador, debido a que la atomización del agua se produce por la alta velocidad de los gases en la sección estrecha del depurador, se contempló de este modo en la pérdida de carga, estimada en $10,2 [m]$

Finalmente, mediante la ecuación de Bernoulli (anexo C.3.3), se calcula la potencia efectiva de la bomba. Si se asume una eficiencia de 70% , entonces la potencia real del equipo es de $289 [W]$.

5.3.2. Ventilador

El ventilador requerido por el proceso es de tiro inducido, es decir, su instalación se sitúa en la salida de la caldera. En el caso de integrar el sistema de depuración, se debe situar de manera posterior a éste.

El dimensionamiento del ventilador debe asegurar el funcionamiento del proceso, cuyo flujo máximo de gases es de $1,28 \left[\frac{m^3}{s} \right]$, y las pérdidas de carga deben considerar el depurador, eliminador de niebla, y la extracción de los gases de la caldera.

Debido a que el depurador es el equipo que provoca la mayor pérdida de carga, se estimó el aumento de presión del ventilador en función de este equipo, es decir, en $11,25 [kPa]$. Considerando un factor de seguridad de 20 %, el ventilador debe tener una capacidad de $13,5 [kPa]$.

5.3.3. Sedimentador

Actualmente, el sistema de depuración cuenta con un sedimentador de $4,8 [m^2]$, separado en cuatro etapas.

Se dimensionó el nuevo sedimentador mediante el método de Coe y Clevenger (anexos C.4.1). Para esto se observó experimentalmente la velocidad de sedimentación de cenizas en agua, y se determinó un periodo de 90 minutos para alcanzar el estado estacionario en el recipiente de sedimentación.

Se estableció como criterio la recuperación del 95 % del flujo ingresado en el equipo, con una concentración del 5 % con respecto a la inicial.

Bajo estas condiciones, el sedimentador deberá tener un área superficial de $5,8 [m^2]$, y una profundidad de $1,2 [m]$.

Por otro lado, se debe tener en consideración la diferencia de altura necesaria entre el sedimentador y el nivel del agua en el eliminador de niebla, para que no se produzcan problemas en el flujo de gases, y el agua fluya hacía el sedimentador. Aplicando el principio de Bernoulli entre estas dos secciones, se deduce que esta diferencia debe ser mayor a $1,2 [m]$ (cálculos en anexo C.4.2).

Finalmente, se estimó que los sólidos sedimentales en el agua poseen una concentración cercana a los $15 \left[\frac{ml}{l} \right]$, mientras que la norma indica un máximo de $20 \left[\frac{ml}{l} \right]$.

5.3.4. Estanque de agua

En el sistema actual no se cuenta con un estanque de este tipo, y el agua es bombeada desde la última división del sedimentador.

Para dimensionar el estanque de agua, es importante tomar en cuenta la autonomía requerida por el proceso.

El flujo promedio de agua utilizada es de $0,8 \left[\frac{L}{s} \right]$ (considerando que el ventilador se encuentra activo la mitad del tiempo). Si se considera una autonomía de 90 minutos, entonces el volumen de almacenamiento requerido será de $4,3 \left[m^3 \right]$.

5.4. Costos de operación

Los costos de operación se calcularon de forma separada para los estados de flujo máximo y mínimo, asumiendo que el 30 % del tiempo se opera a flujo máximo. Sólo se consideró el uso de agua y energía eléctrica en el proceso.

El agua utilizada corresponde a aquella desechada en forma de lodo en el sedimentador y el agua evaporada en el proceso (anexos, tabla C.4).

La energía eléctrica es la necesaria para el funcionamiento de la bomba (anexos, tabla C.5) y el ventilador (anexos, tabla C.6).

Considerando costos de energía y agua de $112 \left[\frac{\$}{kWh} \right]$ y $167 \left[\frac{\$}{m^3} \right]$ respectivamente, se estiman los costos mensuales de operación en \$ 638.730 (Tabla 5.3).

Tabla 5.3: Costos de operación del sistema de depuración

	Consumo		Costo	
Agua	419	$\left[\frac{m^3}{mes} \right]$	70.043	$\left[\frac{\$}{mes} \right]$
Energía Ventilador	3.472	$\left[\frac{kWh}{mes} \right]$	555.540	$\left[\frac{\$}{mes} \right]$
Energía Bomba	117	$\left[\frac{kWh}{mes} \right]$	13.147	$\left[\frac{\$}{mes} \right]$
		Total	638.730	$\left[\frac{\$}{mes} \right]$

5.5. Cotizaciones

En la tabla 5.4 se presentan las estimaciones de costos de los equipos diseñados y dimensionados anteriormente. En el caso del depurador tipo Venturi con el estanque para el eliminador de niebla, se realizó la cotización de su fabricación en acero, y según las especificaciones indicadas en su diseño (anexo D, Figura D.1).

La eliminador de niebla fue cotizado a una empresa especializada en este tipo de productos (anexo D, Figura D.2)

Los costos de la bomba de doble diafragma y el ventilador de tiro inducido se estimaron mediante el uso de catálogos de equipos (anexo D, Figuras D.3 y D.4).

Al igual que el eliminador de niebla y el depurador, el estanque de agua fue cotizado en el mercado nacional (anexo D, Figura D.5)

Finalmente, se estimó el costo del sedimentador considerando la necesidad de una obra de excavación y un estanque de las dimensiones adecuadas para la sedimentación.

Tabla 5.4: Costos de los equipos

	Costo sin IVA	IVA	Costo
Depurador tipo Venturi con estanque para eliminador de niebla	\$ 1.620.000	\$ 307.800	\$ 1.927.800
Eliminador de niebla	\$ 1.545.600	\$ 293.664	\$ 1.839.264
Bomba	\$ 571.800	\$ 108.642	\$ 680.442
Ventilador	\$ 8.556.000	\$ 1.625.640	\$ 10.181.640
Estanque	\$ 336.126	\$ 63.864	\$ 399.990
Sedimentador	\$ 2.521.008	\$ 478.992	\$ 3.000.000
		Total	\$ 17.029.136

5.6. Discusiones y conclusiones

Se logró diseñar un depurador tipo Venturi, capaz de reducir la concentración de MP en las emisiones de la caldera de biomasa de la CAO a niveles adecuados. Como referencia, se consideraron los límites establecidos en Santiago y Temuco, de $112 \left[\frac{mg}{m^3} \right]$, que son precedentes importantes en cuanto a las normas de emisiones atmosféricas.

La concentración de MP alcanzaría valores menores a $91 \left[\frac{mg}{m^3} \right]$. Sin embargo, se debe tomar en cuenta que el modelo utilizado para su diseño puede presentar limitaciones, debido a que corresponde a un modelo empírico general, y no necesariamente derivado de experiencias similares a las de este proyecto.

Los resultados del diseño, muestran que la eficiencia será menor a lo que se esperaba inicialmente. Esto se puede deber que la información utilizada no ofrece una gran precisión. Las propiedades de los gases de combustión fueron aproximadas por sus principales componentes y, como se comentó previamente, las curvas de distribución de tamaño de partículas se elaboraron bajo diversos supuestos.

Con respecto a los resultados del segundo caso de diseño, se debe destacar que las condiciones de velocidad y caída de presión obtenidas para el depurador, se encuentran fuera de los rangos recomendados, aunque equivalen al 89 % y 71 % de los valores mínimos. Esto podría traer como consecuencia una eficiencia menor a la esperada (de $79 \left[\frac{mg}{m^3} \right]$), pero considerando sus magnitudes, sería poco probable que superaran los límites normados.

Un aspecto de los resultados, que podría ser inquietante, es la diferencia en las capacidades necesarias de los equipos entre los dos estados de operación. Para evitar este inconveniente, se podría estudiar la factibilidad de que la operación con el flujo máximo de gases sea menor al actual. Esto provocaría una combustión más lenta, por lo que se debe tomar en cuenta

que el flujo de gases debe ser lo suficientemente alto como para que la combustión permita la producción del vapor requerido por la CAO. Sin embargo, si se toma esta decisión, se deberá volver a diseñar y dimensionar los equipos presentados en este capítulo.

Las características de los equipos secundarios dimensionados presentan diferencias relativamente importantes con los equipos actualmente utilizados.

La bomba actual tiene una capacidad de flujo de $50 \left[\frac{l}{min} \right]$, mientras que el flujo requerido por el proceso propuesto es cercano a $80 \left[\frac{l}{min} \right]$, por lo que su reemplazo es necesario para la ejecución del proyecto.

El ventilador del sistema de depuración propuesto tiene la capacidad necesaria para mantener la caída de presión de los gases en el depurador, mientras que en las condiciones actuales, las pérdidas de presión son mínimas.

Por último, el sedimentador dimensionado es de $6 [m^2]$, y permitiría la recirculación de agua en el proceso, pero se debe tener en cuenta que también existen partículas sólidas que permanecen en suspensión, por lo que es recomendable renovar el agua de manera periódica. Las características del sedimentador son semejantes a las del equipo actual, por lo que se recomienda continuar con su uso para observar y evaluar su comportamiento. Sin embargo, se debe tener precaución con la diferencia de altura entre el estanque del eliminador de niebla y el sedimentador.

Capítulo 6

Metodologías de implementación

Para la implementación de un proyecto se pueden plantear distintas formas o métodos, como las que se exponen a continuación:

- Directo: reemplazando completamente el sistema antiguo por el nuevo de una vez.
- Paralelo: implementar el sistema nuevo en conjunto con el antiguo, de modo que ambos puedan ejecutarse según sea deseado.
- Piloto: implementando el sistema nuevo a menor escala, para verificar que los resultados sean adecuados.
- Fases: reemplazando progresivamente el sistema antiguo por el nuevo.

El método directo puede ser riesgoso y complicado, ya que si ocurre una falla en algún equipo, se vería afectado todo el sistema de depuración. Además, cambiar todos los equipos a la vez podría provocar la detención del proceso durante un periodo extenso.

El método paralelo no es aplicable debido al espacio necesario. Además, se requeriría realizar modificaciones a los ductos de gases para conectar ambos sistemas a la vez, lo que sería poco práctico e inútil a largo plazo.

Del mismo modo, el método piloto resulta poco práctico para el caso de la CAO, ya que implicaría la necesidad de realizar estudios e investigación extensa sobre el equipo, lo que no es razonable tomando en cuenta los objetivos del proyecto.

Finalmente, el método por fases parece ser la forma más adecuada, ya que ambos sistemas poseen etapas similares, y al reemplazar los equipos secuencialmente, es más fácil verificar que funcionen de forma correcta. Al aceptar este tipo de implementación, se debe pensar qué orden es el adecuado para reemplazar los equipos. Con respecto a esto se recomienda:

1. Bomba: Debido a las condiciones actuales de operación, que han conllevado a que la bomba deba ser reemplazada periódicamente debido al desgaste en el equipo, y considerando la propuesta de una bomba de doble diafragma, resistente a estas condiciones, se recomienda que éste sea el primer equipo a reemplazar.

Al realizar esta acción, el sistema actual de depuración puede seguir funcionando con

la nueva bomba, sin requerir de su máxima capacidad, y sólo sería necesario realizar las intervenciones para su instalación.

2. Ventilador: La instalación del ventilador debe ser previa al depurador, ya que éste equipo entrega las condiciones necesarias para su operación. Tal como la bomba, puede funcionar a menor capacidad, para adaptarse a las condiciones del sistema antiguo.
3. Eliminador de niebla: Se debe instalar antes que el depurador. Esto se debe a que el depurador no puede separar el MP por sí mismo (sólo permite su captura en el agua). La presencia del eliminador de niebla implica una mayor pérdida de carga y la disminución de agua emitida al ambiente junto a los gases.
4. Depurador: Una vez instalados los equipos anteriores, el depurador podrá contar con las condiciones para su operación.
5. Sedimentador y estanque: Se recomienda que la instalación de estos equipos sea al final, ya que el tamaño propuesto es semejante al actual, y los criterios utilizados para dimensionar el sedimentador podrían entregar un valor mayor al realmente necesario. De este modo, es posible que el equipo actual pueda seguir siendo útil en el escenario futuro.

Finalmente, se recomienda llevar un registro periódico de mediciones de temperatura, presión, caudal y MP en el flujo gaseoso, para verificar el desempeño de la depuración y enfocar las mejoras y modificaciones necesarias al proceso.

Capítulo 7

Conclusiones y recomendaciones

Se logró diseñar un sistema de depuración, cuyos niveles estimados de emisión de MP se encuentran en los límites previstos de $112 \left[\frac{mg}{m^3} \right]$.

Se seleccionó el depurador tipo Venturi sobre las otras tecnologías disponibles debido a las ventajas de su operación y seguridad. Entre sus características destacan la semejanza con el sistema de tratamiento actualmente utilizado, lo que facilitaría la adaptación por parte de la CAO y sus trabajadores y la baja necesidad de mantenciones, que permite compatibilizar su operación con la caldera.

El diseño del depurador se realizó en base a mediciones directas de las emisiones gaseosas y del MP de la caldera, teniendo como objetivo la minimización de la concentración de MP y la simplicidad en su operación. La cotización de la fabricación del equipo principal y las cotizaciones y estimaciones de los equipos secundarios junto al cálculo de los costos de operación, permiten tener un alto grado de certeza sobre los costos del proyecto, cuya aprobación depende exclusivamente de la CAO.

La metodología propuesta para su implementación, permite que esta sea gradual, con el fin de evitar complicaciones y verificar el funcionamiento del proceso propuesto.

Finalmente, se realizan las siguientes recomendaciones:

- Utilizar madera con baja humedad, debido a su relación con las emisiones de MP y su mayor poder calorífico. Con respecto a esto último, el utilizar menos combustible también produce una reducción en los costos de operación, ya que disminuiría la extensión de los periodos de flujo máximo.
- Determinar el menor flujo máximo de operación de la caldera para reducir la diferencia entre el flujo mínimo y máximo. Esto trae como consecuencia dos ventajas: se podría diseñar un sistema de mayor eficiencia y se podría disminuir la capacidad ociosa de los equipos en el estado de operación de flujo máximo.
- Reemplazar la bomba actual por una bomba de doble diafragma, que tendrá una mayor vida útil.
- Sólo reemplazar el sedimentador en caso de que la experiencia, o ensayos de laboratorio

específicos lo determinen.

- Caracterizar los residuos industriales líquidos emitidos en el sedimentador, debido a que, aunque las estimaciones indican que la concentración de sólidos sedimentales respetan las normas, podrían existir sustancias no indicadas para ser descargadas al sistema de alcantarillado.

Bibliografía

- [1] MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE, G.D.C. Presidenta Bachelet anuncia Planes de Descontaminación 2014-2018, con énfasis en ciudades del sur. [en línea] <<http://www.mma.gob.cl/1304/w3-article-56177.html>>, 2014. [Consulta: 15 de Agosto de 2014].
- [2] MORAGUES, J.A. Manual de tecnologías de medición de concentración de gases y material particulado en chimeneas y atmósfera. Inf. téc., Ministerio de Desarrollo Social y Medio Ambiente.
- [3] EHRLICH, C., NOLL, G., KALKOFF, W., BAUMBACH, G., DREISEIDLER, A. PM10, PM2.5 and PM1.0—Emissions from industrial plants—Results from measurement programmes in Germany. *Atmospheric Environment*, 41: 6236–6254, 2007.
- [4] HOWSTUFFWORKS. Water-tube Boiler. [en línea] <<http://s.hswstatic.com/gif/steam-boiler-wt-b.gif>>. [Consulta: 15 de Agosto de 2014].
- [5] MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE, G.D.C. Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire. [en línea] <<http://sinca.mma.gob.cl/index.php/region/index/id/X>>. [Consulta: 01 de Agosto de 2014].
- [6] GÓMEZ-LOBO, A., LIMA, J.L., HILL, C., MENESES, M. Diagnóstico del Mercado de la Leña en Chile. Inf. téc., Centro Micro Datos.
- [7] PETERS, M., TIMMERHAUS, K., WEST, R. Equipment Costs: Plant Desing and Economics for Chemical Engineers. [en línea] <<http://www.mhhe.com/engcs/chemical/peters/data/ce.html>>. [Consulta: 15 de Agosto de 2014].
- [8] MILLIGAN, D. Matches' Process Equipment Cost Estimates. [en línea] <<http://www.matche.com/equipcost/Default.html>>. [Consulta: 15 de Agosto de 2014].
- [9] CLEAN AIR TECHNOLOGY CENTER, C.A.T.C. Air Pollution Technology Fact Sheets (Cyclone). Inf. téc., EPA, 2003.
- [10] CLEAN AIR TECHNOLOGY CENTER, C.A.T.C. Air Pollution Technology Fact Sheets (Fabric Filter - Mechanical Shaker-Cleaned Type with & without Sonic Horn Enhancement). Inf. téc., EPA, 2003.
- [11] CLEAN AIR TECHNOLOGY CENTER, C.A.T.C. Air Pollution Technology Fact Sheets

- (Fabric Filter - Reverse-Air/Reverse-Jet Cleaned Type with & without Sonic Horn enhancement). Inf. téc., EPA, 2003.
- [12] CLEAN AIR TECHNOLOGY CENTER, C.A.T.C. Air Pollution Technology Fact Sheets (Fabric Filter - Pulse-Jet Cleaned Type). Inf. téc., EPA, 2003.
- [13] CLEAN AIR TECHNOLOGY CENTER, C.A.T.C. Air Pollution Technology Fact Sheets (Impingement-Plate/ Tray-Tower Scrubber). Inf. téc., EPA, 2003.
- [14] CLEAN AIR TECHNOLOGY CENTER, C.A.T.C. Air Pollution Technology Fact Sheets (Spray-Chamber/ Spray-Tower Wet Scrubber). Inf. téc., EPA, 2003.
- [15] CLEAN AIR TECHNOLOGY CENTER, C.A.T.C. Air Pollution Technology Fact Sheets (Venturi Scrubber). Inf. téc., EPA, 2003.
- [16] COUPER, J.R., PENNEY, W.R., FAIR, J., WALAS, S.M. Chemical Process Equipment: Selection and Design, cap. 20: Gas-Solid Separations. 2da ed^{ón}. 2005.
- [17] NIESSEN, W.R. Combustion and Incineration Processes, cap. 14: Air Pollution Control for Incineration Systems. 3ra ed^{ón}. 2002.
- [18] FURNACEINDIAN. Impingement wet scrubber. [en línea] <<http://www.furnaceindian.com/images/products/wet.jpg>>. [Consulta: 15 de Agosto de 2014].
- [19] CLEAN AIR TECHNOLOGY CENTER, C.A.T.C. Air Pollution Technology Fact Sheets (Settling Chambers). Inf. téc., EPA, 2003.
- [20] CLEAN AIR TECHNOLOGY CENTER, C.A.T.C. Air Pollution Technology Fact Sheets (Momentum Separators). Inf. téc., EPA, 2003.
- [21] CLEAN AIR TECHNOLOGY CENTER, C.A.T.C. Air Pollution Technology Fact Sheets (Dry Electrostatic Precipitator). Inf. téc., EPA, 2003.
- [22] EPA. Emissions Factors & AP 42, Compilation of Air Pollutant Emission Factors, tomo I, cap. 1.6 Wood Residue Combustion in Boilers. 5ta ed^{ón}. 1996.
- [23] EASTERN RESEARCH GROUP INC., E.R.G. Emission Inventory Improvement Program, Technical Report Series, tomo II: Point Sources, cap. 2: Preferred and Alternative Methods for Estimating Air Emissions from Boilers. 2001.
- [24] EPA. Method 19 - SO₂ Removal and PM, SO₂, NO_x Rates from Electric Utility Steam Generators. Inf. téc., EPA.
- [25] HINCKLEY, J. Emission Controls for Small Wood-Fired Boilers. Inf. téc., Resource Systems Group, Inc., 2010.
- [26] YUNG, S.C., CALVERT, S., BARBARIKA, J.F. Venturi Scrubber Performance Model. Inf. téc., EPA, 1977.
- [27] S. CALVERT. How to choose a particulate scrubber. Chemical Engineering, 1977.

- [28] MUSSATTI, D. Air Pollution Control Cost Manual, tomo 6, cap. 2: Wet Scrubbers for Particulate Matter. 2002.
- [29] MCKETTA, J.J., OLLERO, P. Encyclopedia of Chemical Processing and Design, tomo 49, cap. Scrubbers, Venturi, Efficiency. 1994.
- [30] SINNOTT, R.K. Chemical Engineering Design, tomo 6, cap. 13: Mechanical Design of Process Equipment. 4ta ed^{ón}. 2005.
- [31] AMITSCO. Mesh and Vane Mist Eliminators. Inf. téc., 2004.
- [32] KOCH-GLITSCH. Model 943 Spray Nozzle Distributor. Inf. téc.
- [33] EPA. Emissions Factors & AP 42, Compilation of Air Pollutant Emission Factors, tomo I, cap. Appendix B.2: Generalized Particle Size Distributions. 5ta ed^{ón}. 1996.
- [34] STEWARD, R. Conversion of biomass boiler emission concentration data for comparison with Renewable Heat Incentive emission criteria. Inf. téc., AEA Technology plc, 2012.

Anexos

Anexos A

Elección de la tecnología a diseñar

A.1. Estimación de la concentración de material particulado

Se calcula la concentración de las emisiones de MP como la razón entre el flujo másico de MP y el flujo volumétrico de emisiones. Se asumió un valor de 10 % de O₂ [34]. El valor de F_d utilizado corresponde al de la madera [23]. Los factores FE_m y HHV son característicos de la madera húmeda [22].

$$m_{MP} = FE_m \cdot Q_f$$

$$Q_{em} = F_d \cdot \left(\frac{20,9}{20,9 - \%O_2}\right) \cdot Q_f \cdot HHV$$

$$[MP] = \frac{m_{MP}}{Q_{em}} = \frac{FE_m}{F_d \cdot \left(\frac{20,9}{20,9 - \%O_2}\right) \cdot HHV}$$

$$[MP] = \frac{0,00149 \frac{kg}{kg}}{9420 \frac{ft^3}{MMbtu} \cdot \left(\frac{20,9}{20,9 - 10}\right) \cdot 0,0045 \frac{MMbtu}{lb}}$$

$$[MP] = 1,83 \cdot 10^{-5} \frac{lb}{ft^3} \cdot 1,6 \cdot 10^7 \frac{mg/m^3}{lb/ft^3} = 293 \left[\frac{mg}{m^3}\right]$$

A.2. Factor de emisión

Se calcula el factor de emisión en función de la masa (FE_m) de combustible a partir del factor de emisión (FE) [22] en función de la energía producida por un combustible y su poder calorífico superior (HHV) [22].

$$FE_m = FE \cdot HVV$$

$$FE_m = 0,33 \frac{lb}{MMbtu} \cdot 0,0045 \frac{MMbtu}{lb}$$

$$FE_m = 0,00149 \frac{lb}{lb} = 0,00149 \frac{kg}{kg}$$

A.3. Estimación de las emisiones controladas

La estimación de la concentración emitida por la fuente, en presencia de una etapa de control de MP, se determinó mediante la distribución de tamaño del MP y la efectividad de cada tecnología para disminuir esas emisiones. A modo de ejemplo, se calculan las emisiones controladas mediante un depurador Venturi.

Tabla A.1: Distribución de concentración de MP con respecto a su tamaño

Tamaño	0-2,5	0-6	0-10
% distribución masa	76 %	86 %	90 %
Concentración $\left[\frac{mg}{m^3} \right]$	223	252	264

Tabla A.2: Emisiones controladas mediante depurador Venturi

Tamaño	0-2,5	2,5-6	6,0-10
Eficiencia	90 %	95 %	99 %
Emisiones sin controlar $\left[\frac{mg}{m^3} \right]$	223	29	12
Emisiones controladas $\left[\frac{mg}{m^3} \right]$	22,3	1,5	0,1
Emisión total $\left[\frac{mg}{m^3} \right]$	24		

Anexos B

Caracterización del MP en la caldera de biomasa de la CAO.

Los filtros están etiquetados de la forma XYZ, y las mediciones de la forma XZ, donde:

- X: Horario (A: 12:00 hrs, B: 20:00 hrs. y C: 08:00 hrs.)
- Y: Tipo de filtro (0: 0,2 μm , 1: 1 μm y 5: 5 μm)
- Z: Condición en la caldera (1: Biomasa húmeda, 2: Biomasa seca, 3: Ventilador inactivo)

B.1. Humedad en los filtros

Tabla B.1: Humedad en filtros

Filtro	Masa inicial [g]	Masa final [g]	Agua evaporada [g]
0,2 μm	2,1544	2,1527	0,0017
1 μm	2,3213	2,3202	0,0011
5 μm	0,9033	0,9031	0,0002

B.2. Masa inicial, masa final y masa de MP.

Tabla B.2: Masa retenida por los filtros

Tag Filtro	Masa inicial [g]	Masa final [g]	Masa MP [g]
A01	2,1640	2,1626	0,0003
A11	2,3176	2,3168	0,0003
A51	0,8995	0,8999	0,0006
A02	2,1499	2,1485	0,0003
A12	2,3309	2,3302	0,0004
A52	0,9001	0,9008	0,0009
A03	2,1522	2,1507	0,0002
A13	2,3216	2,3207	0,0002
A53	0,9005	0,9005	0,0002
B01	2,1940	2,1927	0,0004
B11	2,3311	2,3303	0,0003
B51	0,9007	0,9012	0,0007
B02	2,1709	2,1695	0,0003
B12	2,3302	2,3294	0,0003
B52	0,8968	0,8975	0,0009
B03	2,1550	2,1536	0,0003
B13	2,3210	2,3202	0,0003
B53	0,8930	0,8932	0,0004
C01	2,1557	2,1543	0,0003
C11	2,3210	2,3202	0,0003
C51	0,8871	0,8875	0,0006
C02	2,1986	2,1973	0,0004
C12	2,3268	2,3260	0,0003
C52	0,8923	0,8928	0,0007
C03	2,1839	2,1825	0,0003
C13	2,3233	2,3223	0,0001
C53	0,9012	0,9013	0,0003

B.3. Volumen filtrado y Concentración de MP.

La concentración de material particulado de la muestra XZ se calcula como:

- $MP_{Total}(XZ) = \frac{M(X,0,Z)+M(X,1,Z)+M(X,5,Z)}{V(XZ)}$
- $MP_5(XZ) = \frac{M(X,0,Z)+M(X,1,Z)}{V(XZ)}$
- $MP_1(XZ) = \frac{M(X,0,Z)}{V(XZ)}$

Donde $M(X,Y,Z)$ corresponde a la masa del filtro con etiqueta XYZ , y $V(X,Z)$ al volumen de la muestra XZ .

Tabla B.3: Volumen filtrado y concentración de MP

Medición	V filtrado [ml]	MP_{Total} [$\frac{mg}{m^3}$]	MP_5 [$\frac{mg}{m^3}$]	MP_1 [$\frac{mg}{m^3}$]
A1	3000	400	200	100
A2	1500	1067	467	200
A3	3000	200	133	67
B1	3000	467	233	133
B2	1800	833	333	167
B3	3000	333	200	100
C1	2520	476	238	119
C2	1500	933	467	267
C3	3000	233	133	100

B.4. Condiciones de muestras gaseosas

Tabla B.4: Condiciones de las emisiones

Medición	T inicial [°C]	T final [°C]	Flujo [m ³ /s]	Presión [Pa]
A1	195	152	1,08	18
A2	208	172	1,16	22
A3	142	129	0,33	2
B1	188	153	1,26	30
B2	193	170	1,24	24
B3	147	136	0,51	3
C1	196	155	1,32	25
C2	197	173	1,43	30
C3	146	134	0,49	2

B.5. Factores de emisión másicos y energéticos de madera húmeda y seca.

Los factores de emisión de MP se presentan en la tabla B.5 [22].

Tabla B.5: Factores de emisión (FE) de biomasa seca y húmeda

	Poder calorífico [$\frac{BTU}{lb}$]	FE [$\frac{lb}{MBTU}$]	FE [$\frac{kg}{kg}$]
Biomasa húmeda	4500	0,33	0,00149
Biomasa seca	8000	0,4	0,00320

Anexos C

Diseño del sistema de depuración

C.1. Depurador Venturi

C.1.1. Grado de penetración

La ecuación que permite obtener el grado de penetración en función del diámetro aerodinámico de la partícula, es la siguiente:

$$\ln(P_t(d_p)) = \frac{B}{K_{po}\alpha + 0,7} \cdot \left(4K_{po}\alpha^{1,5} + 4,2\alpha^{0,5} - 5,02K_{po}^{0,5} \left(\alpha + \frac{0,7}{K_{po}} \right) \arctan \left(\left(\frac{\alpha K_{po}}{0,7} \right)^{0,5} \right) \right) - \frac{B}{K_{po} + 0,7} \left(4K_{po} + 4,2 - 5,02K_{po}^{0,5} \left(1 + \frac{0,7}{K_{po}} \right) \arctan \left(\left(\frac{K_{po}}{0,7} \right)^{0,5} \right) \right) \quad (C.1)$$

Con:

$$\alpha = 1 - u_{de}^* \quad (C.2)$$

C.1.2. Propiedades físico-químicas de los gases

Las tablas C.1 y C.2 muestran las propiedades de los gases a 139 y 186 respectivamente, que fueron aproximados asumiendo una composición equivalente de los principales gases expulsado por la caldera.

Tabla C.1: Propiedades a 139°C

139	Vapor	N2	O2	CO2	Gases emitidos	
Densidad	0,5306	0,816	0,9466	1,2868	0,895	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
Viscosidad dinámica	13,75	22,73	26,311	20,278	20,76725	$[10^{-6} Pa \cdot s]$
Viscosidad cinemática	25,92	27,89	27,79527	15,76	24,34132	$[10^{-6} \frac{m^2}{s}]$

Tabla C.2: Propiedades a 186°C

186	Vapor	N2	O2	CO2	Gases emitidos	
Densidad	0,4747	0,7354	0,8496	1,157	0,804175	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
Viscosidad dinámica	15,61	24,51	28,614	22,29	22,756	$[10^{-6} Pa \cdot s]$
Viscosidad cinemática	32,89	33,46	33,67938	19,26	29,82234	$[10^{-6} \frac{m^2}{s}]$

C.1.3. Espesor de pared

La ecuación C.3 permite calcular el espesor mínimo de las paredes de tuberías y estanques que se ven afectadas por presiones externas, como en este caso que, la presión de los fluidos en el interior es menor a la atmosférica.

Para calcular el espesor se designó un diámetro interno de 50 cm, ya que es el punto más delicado, mientras que el coeficiente de colapso se asumió como el mínimo posible. Es sencillo comprobar que el valor de $t = 0,33 [cm]$ resuelve esta ecuación.

$$P_c = K_c E \left(\frac{t}{D_i + t} \right)^3 \quad (C.3)$$

- $P_c = 101,325$ kPa.
- $K_c = 2$.
- $E = 188$ GPa.
- $D_i = 50$ cm.

C.2. Eliminador de niebla

C.2.1. Diámetro de gotas de agua

Se calcula el diámetro esperado de las gotas de agua para ambos casos de diseño, con la ecuación C.4.

$$d_d = \frac{50}{v_{gt}} + 91,8 \cdot (L/G)^{1,5} \quad (C.4)$$

Ejemplo "Biomasa seca":

$$\begin{aligned}
 d_d[cm] &= \frac{50}{11,318cm/s} + 91,8 \cdot (0,001)^{1,5} \\
 d_d[cm] &= 0,007 \\
 d_d &= 70\mu m
 \end{aligned}
 \tag{C.5}$$

C.2.2. Tanque para eliminador de niebla: Medidas recomendadas

Las medidas recomendadas para el diseño del estanque, con el objetivo de mantener perfiles de velocidad planos, son las siguientes (Figura C.1, modificada de [31]):

- $H_1 > \frac{D}{2}, H_1 > 12''$
- $H_2 > \frac{D}{2} + \frac{D_i}{2}, H_2 > 12''$
- $H_3 > \frac{D}{2} - \frac{D_o}{2}$

C.3. Bomba

C.3.1. Pérdidas de carga por succión y descarga

Tabla C.3: Condiciones de operación de la bomba

	Succión	Descarga	Dimensiones
Presión	101325	101325	Pa
Diámetro	0,0254	0,0254	m
Velocidad	2,6	2,6	m/s
Altura	0	2	m
Longitud tubería	5	3	m
Rugosidad acero inoxidable	0,000015	0,000015	m
Rugosidad relativa	0,0006	0,0006	adim
Reynolds	66.097	66.097	adim
Factor de fricción de Darcy	0,022	0,022	adim
Pérdida de carga	1,5	0,9	m

C.3.2. Pérdidas de carga por singularidades

Se consideran 4 curvas de 90° ($K=1$), velocidad de 2,6 m/s y $g=9,8 \frac{m}{s^2}$. Se calcula la pérdida de carga para cada singularidad con la ecuación C.6.

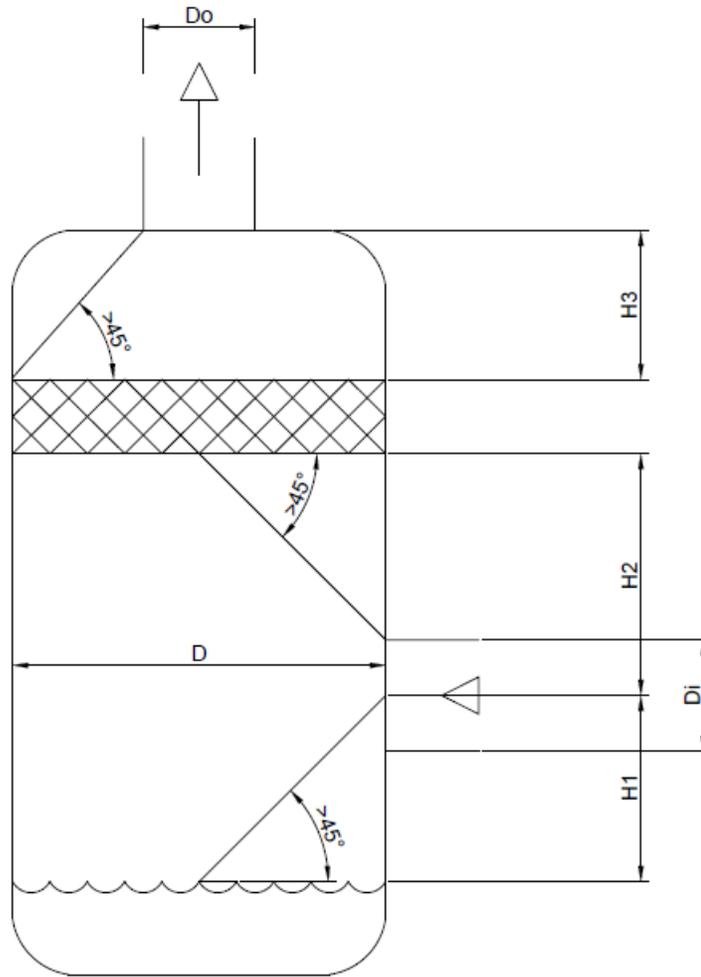


Figura C.1: Medidas típicas para estanques cilíndricos

$$h_v = K \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad (C.6)$$

C.3.3. Potencia requerida

La potencia efectiva de la bomba se calcula mediante la ecuación de Bernoulli C.7, mientras que la potencia consumida se calcula con la ecuación C.8. Las condiciones de altura, presión y velocidad corresponden a los expuestos en la tabla C.3

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + H_e = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + \lambda \quad (C.7)$$

$$P_{consumida} = \frac{\rho g H_e Q}{\eta} \quad (C.8)$$

C.4. Sedimentador

C.4.1. Coe y Clevenger

El método de Coe y Clevenger se resumen en la ecuación C.9, que permite determinar el área del sedimentador, dependiendo de la velocidad de sedimentación de las partículas.

El flujo y la concentración de entrada al equipo tienen las características del agua utilizada en el depurador, la velocidad de sedimentación se aproximó mediante la sedimentación de cenizas, y la concentración de partículas en la interfaz (c) se asumió igual a la concentración del entrada (correspondiente al caso menos favorable).

La concentración de partículas en los lodos se determinó en función de las características de entrada y las condiciones deseadas del agua a recuperar.

La altura del sedimentador se calculó mediante el área y un tiempo de residencia de 90 minutos.

$$A = \frac{F_{in} \cdot c_{in}}{v} \left(\frac{1}{c} - \frac{1}{c_u} \right) \quad (C.9)$$

$$c_u = \frac{F_{in} \cdot c_{in} - F_o \cdot c_o}{F_u} \quad (C.10)$$

$$h = \frac{F_o \cdot t}{A} \quad (C.11)$$

- A : Área del sedimentador [m^2].
- c : Concentración de partículas en la interfaz [$\frac{kg}{m^3}$].
- c_{in} : Concentración de partículas en la entrada [$\frac{kg}{m^3}$].
- c_o : Concentración de partículas en agua recuperada [$\frac{kg}{m^3}$].
- c_u : Concentración de partículas en lodos [$\frac{kg}{m^3}$].
- F_{in} : Flujo de entrada [$\frac{m^3}{s}$].
- F_o : Flujo de agua recuperada [$\frac{m^3}{s}$].
- F_u : Flujo de lodos [$\frac{m^3}{s}$].
- h : Profundidad del sedimentador [m].
- v : Velocidad de sedimentación [$\frac{m}{s}$].

C.4.2. Diferencia de altura

La ecuación de Bernoulli corresponde a :

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + H_e = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + \lambda \quad (C.12)$$

Considerando reposo en ambas secciones, presión atmosférica en el sedimentador, presión absoluta de 90 [kPa] en el estanque del eliminador de niebla y densidad del líquido igual al agua, se determina una diferencia de altura mínima de 1,2 [m].

C.5. Costos de operación

A continuación se presenta el detalle de los cálculos para los costos de operación del sistema propuesto. Se determinó de manera separada los costos para la operación durante los periodos de flujo máximo y mínimo.

Para el consumo de agua (tabla C.4), se consideró la reposición del 20 % del agua utilizada, debido a su evaporación y a la descarga de lodos.

Tabla C.4: Consumo de agua

	Flujo mínimo	Flujo máximo	
Flujo de agua	0,60	1,30	$\frac{l}{s}$
Consumo mensual	217	202	$\frac{m^3}{mes}$
	\$ 36.265	\$ 33.778	$\frac{\$}{mes}$

El consumo energético del ventilador se estimó con los flujos gaseosos y la presión de vacío ejercida por el equipo. Su eficiencia se asumió en un 70 % (tabla C.5).

Tabla C.5: Consumo de energía: Ventilador

	Flujo mínimo	Flujo máximo	
Gases	0,45	1,28	$\frac{m^3}{s}$
Ventilador	1.595	11.250	[Pa]
Energía	362	3.110	$\frac{kWh}{mes}$
	\$ 57.876	\$ 497.664	$\frac{\$}{mes}$

Finalmente, el consumo energético de la bomba se determinó mediante su potencia requerida en cada estado de operación (tabla C.6)

Tabla C.6: Consumo de energía: Bomba

	Flujo mínimo	Flujo máximo	
Potencia	109	289	[W]
Energía	55	62	$\frac{kWh}{mes}$
	\$ 6.153	\$ 6.994	$\frac{\$}{mes}$

Anexos D

Cotizaciones

A continuación se presentan las cotizaciones siguientes equipos:

- Ventilador de tiro inducido
- Bomba de doble diafragma
- Depurador tipo Venturi con estanque para eliminador de niebla
- Eliminador de niebla
- Estanque de agua



ABASTECEDORA DE ACEROS BARBATO E HIJO Y CIA. LTDA
76.237.450-1

COTIZACION REQUERIMIENTO PARA:

N°COTIZACIÓN

11.412

EMPRESA

R.U.T :

NOMBRE DEL CONTACTO : GABRIEL MARTINEZ

FONO

A.- Validez OFERTA :

7 DIAS

FECHA :

23/07/2014

B.-Plazo de entrega :

DIAS HABILES

PLAZO SUJETO A CAMBIOS POR RAZONES DE PRODUCCION

ITEM	DESCRIPCIÓN PROD Y/O SERV.	CANT	UM	VALOR UNIT	SUBTOTALES
1	FABRICACIÓN ESTRUCTURA EN ACERO INOX. DE 4mm ESP. SEGÚN ESPECIFICACIONES DE CROQUIS.	1	U	1.620.000	1.620.000
2			U		0
3			U		0
4			U		0
5					0
6					0
7					0
8					0

FORMA DE PAGO : 50% CON ORDEN DE COMPRA, SALDO CONTADO C/ENTREGA.

PAGOS POR TRANSFERENCIA :

BANCO DE CHILE

000-48822-04

RUT: 76,237,450-1

INOXIDABLES BARBATO LTDA.

PAGOS CON CHEQUE:

NOMINATIVO CRUZADO A NOMBRE

DE INOXIDABLES BARBATO LTDA.

ORDEN DE COMPRA: CUANDO SEA RECIBIDA DEBERA SER ABONADA O CANCELADA SEGÚN CORRESPONDA PARA SER PROCESADA. UNA VEZ INDICADA LA FECHA DE ENTREGA Y EL MATERIAL NO FUERA RETIRADO PASADOS LOS 10 DIAS, QUEDARA A LIBRE DISPOSICION PARA SU VENTA COMO DESPUNTE.

VENTAS@BARBATO.CL

SANTIAGO CONCHA 2102 SANTIAGO

2551-7642 / 2544-3768 / 2554-0254

WWW.BARBATO.CL

TOTAL NETO: 1.620.000

IVA 307.800

TOTAL : 1.927.800

ANTONIO BARBATO RAVERA

Figura D.1: Depurador Venturi y estanque de eliminador de niebla



5. VALORES

Respecto de las alternativas ofrecidas, a continuación se entregan los valores por alternativa.

5.1. DEMISTER®

Ítem	Aplicación	Cant	Style	Diam (mm)	Espesor* (mm)	Material (Mallas y Rejas)	Precio Unitario (USD) (Sin IVA)	Precio Total (USD) (Sin IVA)
1	Gases combustión	1	708	550	250	AISI 304L	2.909	2.909
Total (Dos mil novecientos nueve Dólares Americanos)								2.909

*Espesor total: añadir 50 mm adicionales por concepto de rejillas.

5.2. VANE SEPARATOR™

Ítem	Aplicación	Cant	Style	Diam (mm)	Espesor* (mm)	Material	Precio Unitario (USD) (Sin IVA)	Precio Total (USD) (Sin IVA)
1	Gases combustión	1	3.11.30V	550	N/A	AISI 304L	2.576	2.576
Total (Dos mil quinientos setenta y seis Dólares Americanos)								2.576

Los siguientes materiales están excluidos:

- Materiales (chapas) para fabricación de la suportación del eliminador de nieblas.
- Instalación y suportación
- Cualquier otro tipo de material que no esté descrito en esta propuesta.

5.3. ENTREGA

Plazo de entrega: Planos para aprobación en 2 semanas desde recepción de Orden de Compra.
Aprobación de planos por cliente: 1 semana (tiempo estimado)
Fabricación de acuerdo al diseño aprobado y envío a Chile, 5 - 6 semanas.

Figura D.2: Eliminador de niebla



How can we improve our [Product Images?](#)

Regenerative Blower, 30 HP, 3561 CFM

FUJI

Price:
\$14,260.00 / each

Deliver one time only

Auto-Reorder Every

1 Month

1

Add to Cart

+ Add to List

Check Availability
Product ships within 6 business days from supplier ⓘ

Add Repair & Replacement Coverage for \$2,199.00 each.

☆☆☆☆☆ Be the first to write a review | [Ask & Answer](#)

Item # 1XDX4

Mfr. Model # VFT73-2

UNSPSC # 40101601

Catalog Page # 3653

Shipping Weight 903.0 lbs.

Country of Origin **Germany** | *Country of Origin is subject to change.*

Technical Specs

Item	Regenerative Blower	Max. Vacuum	44.4" WC
Inlet Size	6.30"	Max. Ambient Temp.	104 Degrees F
Outlet Size	6.30"	Housing Material	Aluminum Alloy
HP	30	Motor Enclosure	Totally Enclosed Fan-Cooled
Voltage	208-230/460	Thermal Protection	Pilot Duty
Phase	3	Overall Length	55-1/8"
Full Load Amps	67.6/33.8	Overall Height	32-7/8"
Max. Pressure	71" WC	Overall Depth	30"
Max. Flow Rate	3561 CFM	Standards	Class B NEMA Insulation

Figura D.3: Ventilador de tiro inducido



Pump, AODD, Aluminum, 3/4 In, 28 GPM

DAYTON

Price:
\$953.00 / each

Deliver one time only

Auto-Reorder Every

1 Month

1

Add to Cart

+ Add to List

Check
Availability
Limited
Quantity
Available

Add Repair & Replacement Coverage for \$129.00 each.

☆☆☆☆ Be the first to write a review | Ask & Answer

Item # 3HJW8

Mfr. Model # 3HJW8

UNSPSC # 40151548

Catalog Page # 3770

Shipping Weight 22.04 lbs.

Country of Origin **Japan** | Country of Origin is subject to change.

How can we improve our Product Images?

Technical Specs			
Item	Double Diaphragm Pump	Ball Material	EPDM
Operation Type	Air Operated	Check Seat Material	Stainless Steel
Valve Type	Ball	Max. Dia. Solids	1/16"
Body Material	Aluminum	Manifold Connection	Single
Inlet/Outlet Size	3/4"	Length	9-51/64"
Connection Style	NPT	Width	12-13/32"
Air Inlet Size	1/4" FNPT	Height	12-9/16"
Max. Flow GPM	28	Self-Priming Dry	18 ft.
Max. Operating Pressure	100 psi	Self-Priming Wet	28 ft.
Max. Temp.	212 Degrees F	Manufacturers Warranty Length	1 yr.
Diaphragm Material	Santoprene(R)		

Figura D.4: Bomba de doble diafragma



Infraplast Estanque Vertical 5450 lts

SKU: 6900-0

\$399.990 C/U

Ficha Técnica	
Atributos	Detalle
Modelo	EVS-5450
Marca	Infraplast
Capacidad	5450 lts
Material	Poliétileno LLDPE
Alto	2.06 mt
Ancho	2.1 mt
Largo	2.1 mt
Peso	112 kg
Uso	Almacenamiento de agua potable en superficie
Características	Estanque cónico en Polietileno que permite un almacenamiento seguro y totalmente atóxico para la salud. Su temperatura máxima de almacenamiento es 60°C
Incluye	Tapa rosca de 460 mm
Tipo	Estanque agua en superficie
Advertencia	El producto sólo se despacha en la zona urbana de la región metropolitana
Origen	Chile
Garantía	5 años

Figura D.5: Estanque de agua