

Optimización de lavadores de gases tipo torre de pulverización para calderas acuotubulares

Optimization of spray tower-type gas scrubbers for water-tube boilers

<https://doi.org/10.5281/zenodo.14247031>

AUTORES: Edgar Xavier Mendoza Arce^{1*}

Italo Mendoza Haro²

Jaime Andrés Camacho Gavilanes³

Carla Mendoza Arce⁴

DIRECCIÓN PARA CORRESPONDENCIA: emendozaa9@unemi.edu.ec

Fecha de recepción: 25 / 07 / 2024

Fecha de aceptación: 17 / 09 / 2024

RESUMEN

La Compañía Azucarera Valdez S.A., ubicada en la ciudad de Milagro, Ecuador, enfrenta la necesidad de reducir sus emisiones atmosféricas debido a que no siempre cumple con las normativas vigentes para fuentes fijas de combustión. Dichas normativas establecen un límite máximo de 300 mg/m³ para los equipos instalados antes de 2003. Para abordar esta problemática, se diseñó un eliminador de niebla que opera dentro del lavador de gases húmedo original de la caldera acuotubular N° 10, la cual emplea bagazo como combustible para generar vapor con fines industriales. La investigación realizada fue de tipo experimental y de campo, utilizando una metodología mixta. Esta se enfocó en la comparación de tres tecnologías diferentes de eliminadores de niebla: Demister, Ciclón y Chevron, con el objetivo de identificar la opción más adecuada. Para ello, se elaboró una hoja comparativa que evaluó de manera cuantitativa diversos indicadores previamente

^{1*} <https://orcid.org/0009-0001-4368-6941>, Universidad Estatal de Milagro, emendozaa9@unemi.edu.ec

² <https://orcid.org/0000-0002-6492-6991>, Universidad Estatal de Milagro, emendozah@unemi.edu.ec

³ <https://orcid.org/0000-0002-1826-0834>, Universidad Estatal de Milagro, jcamacho2@unemi.edu.ec

⁴ <https://orcid.org/0009-0004-2110-6047>, Technische Universität Berlin, cmendozaa5@unemi.edu.ec

formulados. Los resultados, obtenidos mediante la aplicación de la metodología de Análisis de Decisión de Criterios Múltiples (MCDA, por sus siglas en inglés), determinaron que el eliminador de gotas tipo Chevron es el más eficiente en la captura de partículas. Además, el diseño estructural del lavador de gases fue representado en 3D utilizando el software AutoCAD, permitiendo una visualización detallada de la propuesta.

Palabras clave: *Caldera acuotubular, separador de gotas, lavador de gases, partículas*

ABSTRACT

Compañía Azucarera Valdez S.A., located in the city of Milagro, Ecuador, is faced with the need to reduce its atmospheric emissions because it does not always comply with current regulations for stationary combustion sources. These regulations establish a maximum limit of 300 mg/m³ for equipment installed before 2003. To address this problem, a mist eliminator was designed to operate inside the original wet gas scrubber of water-tube boiler No. 10, which uses bagasse as fuel to generate steam for industrial purposes. The research carried out was experimental and field type, using a mixed methodology. It focused on the comparison of three different mist eliminator technologies: Demister, Cyclone and Chevron, to identify the most suitable option. To this end, a comparison sheet was prepared that quantitatively evaluated various previously formulated indicators. The results obtained by applying the Multiple Criteria Decision Analysis (MCDA) methodology, determined that the Chevron type droplet eliminator is the most efficient in particle capture. In addition, the structural design of the scrubber was represented in 3D using AutoCAD software, allowing a detailed visualization of the proposal.

Keywords: *Water tube boiler, droplet separator, gas scrubber, particles*

INTRODUCCIÓN

La Compañía Azucarera Valdez S.A. (CAVSA) produce derivados de la caña de azúcar y aprovecha el bagazo para generar vapor, utilizado en la producción de azúcar y la cogeneración de electricidad. Para ello, la empresa emplea calderas acuotubulares identificadas como caldera #10, caldera #11 y caldera #12, las cuales funcionan utilizando el bagazo de caña como combustible. La investigación se enfoca en la caldera #10, fabricada en 1980, con una capacidad de producción de vapor de 65,000 kg/h y una presión

operativa de 21 kg/cm² a 275 °C, siendo la principal fuente de emisiones contaminantes. Según la normativa ecuatoriana sobre emisiones atmosféricas de fuentes fijas, basada en la Ley de Gestión Ambiental, los equipos instalados antes de 2003 tienen un límite máximo permitido de 300 mg/m³ de partículas contaminantes (Tapia Núñez, 2015). Aunque la caldera #10 cumple parcialmente con esta regulación, no se garantiza la estabilidad de las condiciones operativas durante la generación de vapor, comprometiendo su conformidad ambiental.

Este problema motiva el desarrollo de la presente investigación, cuyo objetivo principal es evaluar y mejorar la eficiencia del sistema de control de emisiones contaminantes de la caldera. Se busca diagnosticar la capacidad actual del lavador de gases y diseñar equipos complementarios para optimizar su funcionamiento, reduciendo así las emisiones a la atmósfera y mitigando los riesgos para la salud humana y el medio ambiente. El diseño original del lavador de gases se basa en el principio de una torre de pulverización, en la cual el agua de lavado es inyectada a través de boquillas. Este sistema opera de manera eficiente durante el funcionamiento de la caldera, manejando un flujo de gases de aproximadamente 260,000 m³/h y controlando emisiones de cenizas generadas por la combustión del bagazo, que superan los 800 kg/h. El lavador de gases consiste en un recipiente prismático rectangular, donde los gases de combustión, que contienen cenizas y partículas no quemadas, ingresan por la parte superior en un flujo en contracorriente. El agua, impulsada por los aspersores, forma un cono que captura las partículas mediante impacto inercial, reduciendo así la contaminación ambiental. Las partículas entran en contacto con las pequeñas gotas de líquido en las torres de lavado húmedo a través de diversos mecanismos. Debido a su masa, las partículas con diámetros superiores a Ø 10 µm se recogen generalmente por impacto. Las partículas entre Ø (1-10) µm, y que pasan lo suficientemente cerca de una gota de agua son captadas por interceptación; debido a la tensión superficial de la gota. Para tamaños entre Ø (1,0 a 0,1) µm son objeto de interceptación. Aumento de la densidad de las gotas en el aerosol (Mussatti, 2002). El separador de gotas tipo Chevron (ABB 2 STAGE) mejoró la captación de cenizas en un 4.39%, alcanzando 23,487,000 kg durante el periodo de operación.

METODOLOGÍA

Las torres de pulverización son sistemas de limpieza de aire eficientes y económicos que atomizan agua mediante boquillas para capturar partículas. Funcionan al hacer interactuar el aire contaminado con gotas de agua, utilizando mecanismos como impacto, interceptación y difusión. Según el diseño, el flujo de gases puede ser contracorriente, paralelo o perpendicular al flujo de agua. Las gotas con partículas se acumulan en la base de la torre para su evacuación, permitiendo adaptarse a flujos de gases horizontales o verticales. (Ramos-Núñez y Mendoza Haro, 2021).

El fenómeno de arrastre de gotas ocurre cuando algunas quedan suspendidas en el flujo de gas residual, pudiendo escapar al ambiente. Para evitarlo, se utilizan eliminadores de gotas, instalados aguas arriba de las boquillas, que garantizan un control eficiente. (Mussatti, 2002).

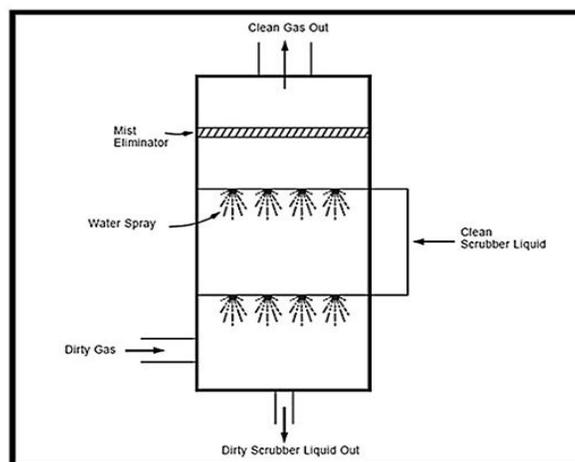


Figura 1. Sistema de limpieza de gases
Fuente: (Mussatti, 2002)

Lavador de Gases

El lavador de gases es un sistema de depuración que elimina partículas de un flujo gaseoso mediante contacto directo con un fluido, generalmente agua, utilizando mecanismos como colisión, adherencia y coalescencia molecular (Ramos-Núñez y Mendoza Haro, 2021).

Los lavadores de gases se clasifican según la energía requerida para impulsar el fluido: baja, media o alta energía. Los de baja energía se usan para partículas grandes o densas,

mientras que los de alta energía son adecuados para partículas finas o aerosoles en procesos más exigentes.

Equipos separadores de partículas

Los dispositivos de control de partículas se emplean para prevenir daños ambientales, especialmente al manejar compuestos tóxicos. Su objetivo es capturar partículas industriales antes de su liberación al ambiente. Según el sistema de separación y las propiedades físicas de las partículas, se seleccionan equipos como cámaras de sedimentación por gravedad y separadores ciclónicos (Lobato y Castillo, 2015).

Eliminadores de neblina

Los eliminadores de neblina eliminan entre el 90 % y 99 % de las gotas líquidas en corrientes de gas. Los modelos más comunes son los tipos Chevron y los de empaquetadura de malla, que recolectan gotas para que coalescan y caigan por gravedad o capilaridad. Los Chevron son ideales para altas cargas de partículas, ya que los de malla pueden obstruirse. Todos generan una caída de presión de 12.7 a 25.4 mm de H₂O (Mussatti, 2002).

Los eliminadores de neblina con empaquetadura de malla, formados por mallas metálicas o plásticas, retienen gotas de líquido arrastradas en el gas, que coalescen y caen por gravedad. Son comunes en procesos como destilación, absorción y evaporación, destacando por su bajo costo, eficiencia en recolección de líquidos y baja caída de presión (Rahimi y Abbaspour, 2008).

El contenido de líquido en un gas puede dañar equipos, por lo que los eliminadores de neblina remueven gotas mediante impacto inercial. Las láminas en zigzag desvían el flujo gaseoso, mientras que las gotas, por su mayor inercia, impactan y se adhieren a las superficies del eliminador. En sistemas de flujo vertical, el líquido acumulado forma una película que drena por gravedad en contraflujo (Narimani y Shahhoseini, 2011).

Los eliminadores de neblina tipo Chevron son más eficientes que otros separadores inerciales, como los de empaquetadura de malla, para capturar gotas pequeñas (10-40 µm) con baja caída de presión. Son ideales para aplicaciones con altas velocidades de gas que requieren eficiencia y bajas pérdidas de presión (Galletti, Brunazzi y Tognotti, 2008).

Justificación del modelo de eliminador de neblina

El diseño de un eliminador de neblina está orientado a mejorar la captura de cenizas y la purificación en sistemas industriales, siendo ampliamente utilizado en industrias química,

petrolera, de gas y azucarera. En el sector azucarero, se emplea para recuperar gotas con cristales de azúcar y optimizar procesos como la reducción de agua en torres de enfriamiento. El modelo propuesto se centra en capturar gotas de agua en gases de combustión de calderas, aumentando la recolección de cenizas derivadas del bagazo de caña de azúcar. Utiliza un depurador de torre de aspersión con boquillas esféricas y un sistema de distribución de agua a 40°C, que reduce la temperatura y presión de los gases. El diseño considera variables críticas como el espaciamiento entre láminas y velocidades de los gases, que afectan la separación por impacto e inercia.

Velocidades superiores a 6 m/s mejoran la separación, aunque pueden causar arrastres por ruptura de la película líquida. La uniformidad del flujo de gases sigue siendo un reto debido a deflectores que no logran homogeneidad total, concentrando el flujo en la última sección del depurador. Estas variables son clave para optimizar la eficiencia del diseño y operación del eliminador.

Metodología

La metodología aplicada para reducir emisiones de cenizas y material no quemado combina enfoques cuantitativos en una investigación mixta, siguiendo un proceso secuencial que inicia con la identificación del problema de contaminación y culmina en la optimización de la captura de partículas. Como solución, se propuso la instalación de un eliminador de neblina tipo Chevron, diseñado con láminas perfiladas para adaptarse a los parámetros del sistema de depuración de gases y mejorar la eficiencia en la separación de partículas.

"El manejo de partículas en una proporción del 5% del número de partículas emitidas por la combustión de bagazo debe destacarse, ya que la caldera #10 no opera al 100% de su capacidad de diseño para la generación de vapor, sino en cantidades menores. No existen valores históricos de la cantidad de cenizas generadas bajo estas condiciones, aunque se dispone de datos de referencia con la caldera operando al 100%. Un estudio realizado en 1996 por la empresa Análisis Ambiental de Cali - Colombia, arrojó los siguientes resultados" (Ramos-Núñez y Mendoza-Haro, 2021):

- Emisión de material particulado: 891.29 kg/h.
- Flujo de gases en condiciones de chimenea: 265398.5 m³/h.
- Temperatura de los gases: 202.67 ° C.

La emisión de partículas en la operación de la caldera #10 se estima en 44.56 kg/h, lo que equivale a 192,500 kg emitidos al ambiente durante todo el tiempo de operación. Se analizaron variables como el flujo volumétrico de gases y agua, y el flujo másico de cenizas no quemadas en entrada y salida, respaldado por mediciones de recolección de cenizas. Datos previos a la instalación del depurador en 1996 muestran altos niveles de emisión con la caldera operando al 100%. Actualmente, se estima que el depurador no funciona eficientemente, y la investigación busca soluciones para optimizar su desempeño y reducir las emisiones contaminantes.

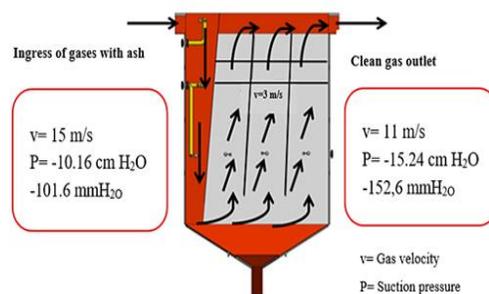


Figura 2. Diagrama de velocidad ideal de los gases de combustión en el lavador. Diagrama de velocidad ideal de los gases de combustión en el lavador

Fuente: Autores

Metodología de investigación

La investigación es de tipo explicativo, con un diseño experimental y un enfoque mixto. Se recopilan datos, se analizan y se formulan inferencias mediante métodos cuantitativos y cualitativos (Tashakkori y Creswell, 2007).

Materiales y procedimiento

El proceso de optimización tiene como objetivo mejorar el rendimiento de los depuradores de torre de aspersión para calderas acuotubulares. Para alcanzar este objetivo, se llevarán a cabo varios pasos:

1. Se realizará una inspección visual de la caldera para identificar problemas. Esto incluye revisar los niveles de agua, la presión de la caldera, el nivel de combustible, la temperatura del agua, el flujo y la presión del aire de salida.
2. Una vez identificados los problemas, se realizarán los ajustes necesarios para mejorar el rendimiento.

Métodos y técnicas

El método explicativo permitirá analizar las causas y efectos en la investigación, enfocándose en el diseño de equipos adicionales que trabajen conjuntamente con el depurador de gases de la caldera acuotubular #10, para alcanzar los objetivos planteados y mejorar su eficiencia operativa.

Método de análisis de decisiones multicriterio (MCDAM)

Para seleccionar la propuesta óptima que favorezca la reducción de la emisión de material contaminante y gases, se utiliza también el método de análisis de decisiones multicriterio (MCDAM). Este método evalúa diferentes criterios con distintas escalas, permitiendo tomar decisiones alineadas con las necesidades de la institución, en este caso CAVSA, y seleccionar la alternativa que funcione de manera eficiente con el depurador de gases de la caldera acuotubular #10.

Técnica de lista de verificación (Checklist)

Se evaluarán alternativas como los eliminadores de neblina tipo Demister, Ciclón y Chevron mediante una lista de verificación cuantitativa para analizar su adecuación según el tiempo, lugar y necesidades del proyecto, asegurando resultados satisfactorios.

Eliminadores de neblina tipo Demister

Los eliminadores de neblina tipo Demister se emplean para separar gotas de líquido en gases, actuando como pre-separadores en flujos con muchas impurezas. Sin embargo, su capacidad para remover sólidos en el líquido es limitada, por lo que se utilizan principalmente en filtros conmutables. Son resistentes a variaciones en condiciones operativas, como presión y velocidad de flujo.

Eliminadores de neblina tipo ciclón

Los eliminadores de neblina tipo ciclón separan componentes por fuerza centrífuga, hasta 2000 veces mayor que la gravedad en equipos pequeños a alta presión. Son ampliamente utilizados en aplicaciones como manejo de condensados y recolección de polvo de hornos (Castiñeiras, 2023; Cao y Bian, 2019; Wang et al., 2019; Wasilewski y Brar, 2019).

En este equipo, el gas y las gotas ingresan tangencialmente a una sección cilíndrica o cónica, descendiendo en espiral. Las partículas más pesadas impactan contra las paredes, donde las gotas forman una película líquida que desciende y se elimina por la parte inferior (Bahadori, 2014).

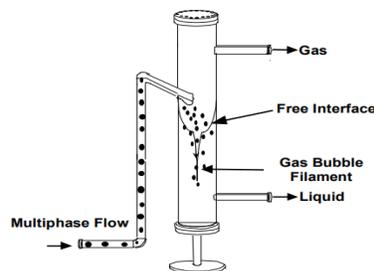


Figura 3. Diagrama esquemático del separador ciclónico gas-líquido
Fuente: (Erdal y Shirazi, 2004)

Eficiencia de control de los eliminadores de neblina

El rango de eficiencia de control de los ciclones convencionales varía según el tamaño de las partículas. Se estima entre un 70% y 90% para partículas con diámetros superiores a 20 μm , entre un 30% y 90% para partículas mayores a 10 μm , y entre un 0% y 40% para partículas con diámetros superiores a 2.5 μm .

Eliminadores de neblina tipo spray

Los eliminadores de neblina tipo spray remueven entre el 90% y el 99% de las gotas líquidas en gases residuales. Los diseños principales son los tipos Chevron y los de empaquetadura de malla. En ambos, las gotas coalescen y caen por gravedad o capilaridad al alcanzar mayor tamaño. Debido a la obstrucción frecuente en los de malla, los tipos Chevron son los más utilizados. Estos eliminadores presentan una baja caída de presión, entre 1.27 y 2.54 $\text{cm H}_2\text{O}$ (ver Figura 4).

Mantenimiento de los eliminadores de neblina tipo spray

Todos los eliminadores de neblina tipo spray requieren de un lavado periódico para eliminar las partículas acumuladas, lo que asegura su correcto funcionamiento y eficiencia operativa.



Figura 4. Eliminador de niebla tipo Chevron.

Fuente: (China Chevron Vane Type Mist Eliminator Suppliers, 2023)

RESULTADOS

El diseño del eliminador de neblina se basa en el análisis del depurador, el flujo de gases, la eficiencia de recolección, el modelo y la facilidad de mantenimiento, considerando ubicación, dimensiones y especificaciones técnicas. En la caracterización de las boquillas, se utilizó una bomba centrífuga de 1.67 m³/min con un motor de 29,828 W y presión nominal de 482,633 Pa, optimizando la tubería y accesorios a Ø25.4 mm para mejorar su desempeño.

Se incorporó un reductor de diámetro de Ø12.7 mm a Ø25.4 mm, junto con una válvula y un manómetro antes del aspersor de prueba, para medir la presión de salida y definir el patrón del cono. Para más detalles, consulte la Tabla 1.

Presión [Kg/cm ²]	Radio del cono [cm].	Peso [cm]	Grosor del cono [cm]
1,4062	53.34	50	17.78
	83.82	100	17.78
	119.38	157	17.78
2,1092	53.34	50	20.32
	83.82	100	20.32
	116.84	157	20.32
2,8123	53.34	50	20.32
	83.82	100	20.32
	116.84	157	20.32
3,9372	53.34	50	22.86
	83.82	100	22.86
	119.38	157	22.86

Tabla 1. Caracterización de las duchas de lavado

Características físicas de las boquillas de limpieza Schedule 40

Las boquillas de limpieza Schedule 40 presentan las siguientes características físicas: cuentan con un diámetro nominal de la esfera de 100 mm, un espesor de 3 mm, un diámetro de boquilla de 14 mm y un diámetro de tubería de entrada de agua de 19.05 mm. Estas boquillas generan un flujo tangencial en forma de cono, como se observa en los gráficos presentados en la Figura 5.



Figura 5. (a) Vista del tubo de \varnothing 19,05 mm en las toberas y (b) Vista del orificio de la tobera

Fuente: Autores

La Figura 6 muestra la caracterización de las duchas de lavado, que llevan a la formación del cono con la boquilla de prueba, descrita en la Figura 7, donde se puede observar la forma del cono y su variación con la presión.

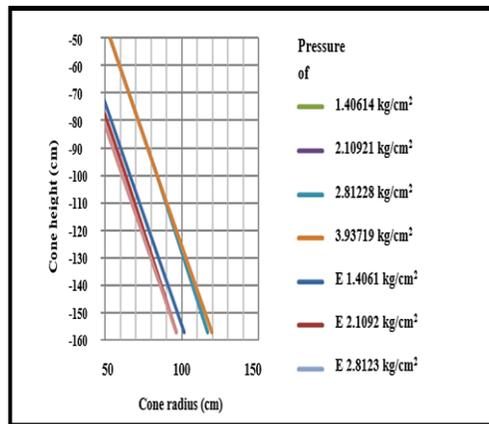


Figura 6. Perfil del cono formado por los aspersores a diferentes presiones

Fuente: Autores

Análisis de datos y eficiencia en la recolección de gotas líquidas

Los datos fueron obtenidos a -50 cm de altura, tomando como referencia el punto cero en la boquilla de aspersión. Se observó una notable diferencia entre la velocidad de los gases y la de las gotas de agua, influenciada directamente por la presión de salida de la boquilla. Una mayor presión produce gotas más pequeñas, destacando la importancia de determinar una presión adecuada para mantener altas velocidades relativas. El rango óptimo de presión para formar el cono es entre 206,843 Pa y 275,790 Pa.

Un estudio experimental evaluó la eficiencia de recolección de gotas líquidas a distintas velocidades de gas (1 m/s, 2 m/s y 5 m/s). Se concluyó que la eficiencia aumenta con el tamaño de las gotas y la velocidad del gas. Para gotas de Ø18 µm, la eficiencia supera el 90% en todas las velocidades, mientras que para gotas de Ø10 µm varía del 54% a 1 m/s al 97% a 5 m/s. Además, el número de curvas en el sistema mejora la eficiencia, especialmente en la primera y segunda curva a altas velocidades. La recolección depende del tamaño de las gotas, la velocidad del gas y la configuración interna, factores clave para optimizar sistemas de control de emisiones.

Caudal de gas $\bar{U}_g (ms^{-1})$	1° curva	2° curva	3° curva	4° curva	5° curva	6° curva	Salida
$\bar{d}=15 \mu m$	6.66	4.64	7.35	4.40	6.75	2.95	67.23
2.96	10.21	10.73	12.08	6.94	9.51	4.40	46.13
4.14	16.13	20.19	16.21	7.68	9.23	4.44	26.12
6.00	21.50	25.90	18.01	6.71	8.13	3.78	15.93
8.00							
$\bar{d}=20 \mu m$	13.87	18.99	14.19	7.45	7.86	4.22	33.42
2.96	20.98	27.38	16.22	6.38	7.32	3.27	18.44
4.14	29.58	33.67	16.13	4.69	5.11	2.11	8.72
6.00	36.98	36.02	13.98	3.28	3.60	1.40	4.74
8.00							
$\bar{d}=15 \mu m$	24.31	31.22	15.02	5.83	5.66	2.81	15.15
2.96	33.33	35.85	13.94	3.81	4.09	1.64	7.34
4.14	43.14	37.14	10.75	2.29	2.34	0.87	3.20
6.00	50.04	37.29	7.9	1.44	1.46	0.52	1.66
8.00							

Tabla 2. Porcentaje de líquido atrapado en cada curva (James et al., 2005)

El perfil adoptado para el proyecto piloto se basa en el diseño descrito en la Patente de EE. UU. No. 6,083,302, del año 2000, en la cual los autores realizaron pruebas para determinar la eficiencia de recolección.

El objetivo del eliminador de neblina es recolectar las gotas de agua, con o sin partículas de ceniza, arrastradas por los gases de combustión. Basándose en los parámetros establecidos, se utilizó un diseño de una sola etapa con dos pasajes, incorporando una extensión en la salida para mejorar la captura y facilitar la limpieza. Los criterios de diseño adoptados son los siguientes:

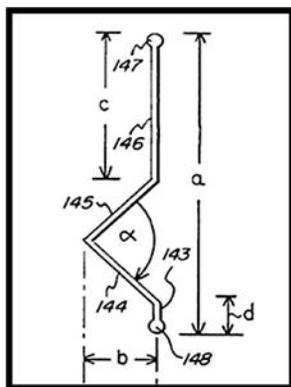


Figura 7. Dimensiones del perfil del separador de gotas

Fuente: (Rafeea, Rahimzadeh y Ahmadi, 2010)

La Figura 7 muestra el perfil del eliminador de neblina de una sola etapa y dos pasajes. Los pasajes están definidos por el ángulo α , mientras que el ancho del perfil se denota con la letra "b". Una extensión en la salida está representada por la letra "c".

Nomenclatura	Dimensiones [mm]
a	230.89
b	56.31
c	101.36
d	22.52
Nomenclatura	Dimensiones [mm]

Tabla 3. Dimensiones del perfil de diseño, detallando las medidas específicas del perfil de las láminas utilizadas en el eliminador de neblina

Tipos de tecnologías evaluadas

En el proceso de evaluación y selección del tipo de tecnología para proporcionar soporte tecnológico al depurador de gases de la caldera #10 de CAVSA, se analizaron tres propuestas, como se detalla en la Tabla 4.

N.-	Tecnologías
1	Eliminador de vaho Demister
2	Nebulizador ciclónico
3	Nebulizador tipo Chevron

Tabla 4. Tecnologías

Factores de decisión

La selección de la propuesta se basó en factores clave como costos de mantenimiento y operación, calidad del aire, consumo de energía, área ocupada, y facilidad de implementación y uso. A cada factor se asignó un peso relativo según su importancia: 3 para alto impacto, 2 para impacto intermedio y 1 para impacto bajo, permitiendo priorizar los aspectos más críticos en la toma de decisión. Ver Tabla 5:

Factor de decisión	Peso relativo
Costos de operación y mantenimiento	3
Calidad del aire	3
Consumo de energía	2
Superficie ocupada	1
Facilidad de uso y aplicación	1

Tabla 5. Peso relativo de los factores de decisión.

Matriz de Evaluación

La matriz de evaluación, basada en factores de decisión y pesos relativos, permitió calificar las tecnologías en una escala de 1 a 5. El puntaje total se obtuvo multiplicando las calificaciones por los pesos, con un margen de error mínimo. El eliminador de neblina tipo Chevron fue seleccionado como la opción más adecuada, con un puntaje máximo de 47.

		Fog eliminator type					
		Demister		Cyclonic		Chevron	
Decisión factor	Peso	(1-5)	Total	(1-5)	Total	(1-5)	Total
Costos de operación y mantenimiento	3	3	9	4	12	5	15
Calidad del aire	3	4	12	4	12	5	15
Consumo de energía	2	5	10	1	2	4	8
Superficie ocupada	1	4	4	3	3	4	4
Facilidad de uso y aplicación	1	4	4	3	3	5	5
Suma	10		39		32		47

Tabla 6. Tabla comparativa según el tipo de eliminador

Diseño y construcción del eliminador de neblina

El diseño del equipo adicional busca mejorar la captura de cenizas mediante un dispositivo económico, fácil de instalar y mantener. Los eliminadores de neblina, ampliamente usados en las industrias química, petrolera y de gas, capturan gotas de líquido en flujos de gas o

vapor, reducen emisiones contaminantes y previenen daños por corrosión en los equipos (Galletti, Brunazzi y Tognotti, 2008).

El módulo del eliminador de neblina tipo Chevron (ver Figura 8) fue diseñado con acero inoxidable AISI 304, utilizando láminas de 0.78 mm de espesor, tubos y varillas de Ø 9.53 mm. Sus dimensiones son 2778 mm de longitud y 1183.21 mm de ancho.

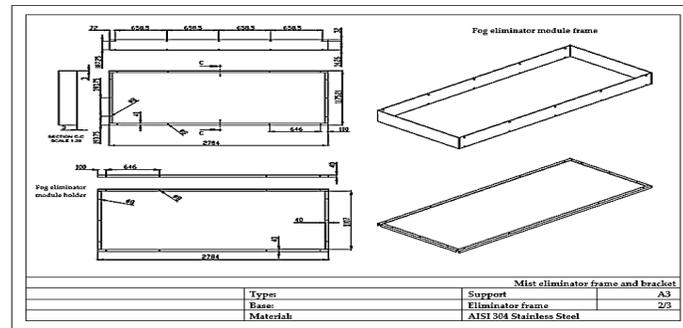


Figura 8. Diseño del módulo: Separador de gotas tipo Chevron CAVSA nº 10
Fuente: Autores

En el diseño del soporte de la estructura (ver Figura 9), el módulo del eliminador de neblina tiene las siguientes dimensiones: longitud 2784 mm x ancho 1183.21 mm, mientras que el soporte para el módulo del eliminador de neblina tiene dimensiones de 2784 mm x 1107 mm.

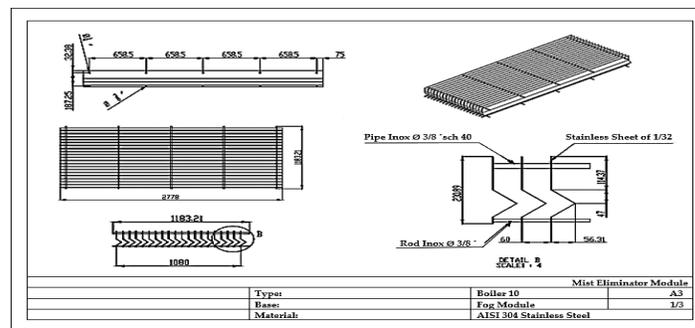


Figura 9. Diseño de la estructura de soporte
Fuente: Autores

Diseño del módulo, marco y soporte del eliminador de neblina, y construcción

Se procede al diseño del módulo, el marco y el soporte del eliminador de neblina para su construcción. La Figura 10 muestra la ubicación del depurador de gases dentro de la planta.

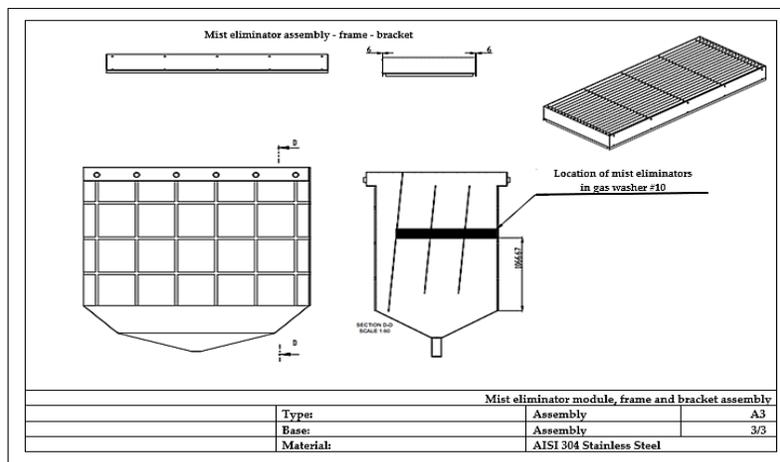


Figura 10. Ensamblajes de módulos y estructuras de soporte
Fuente: Autores

Costos de construcción y ensamblaje

Los costos asociados al diseño e implementación del proyecto se presentan en las siguientes tablas, que incluyen: costos de mano de obra, materiales y el costo total del proyecto.

La Tabla 7 muestra los costos de mano de obra, especificando las actividades a realizar, el número de veces, los pesos unitarios, los pesos totales, los costos promedio por actividad y el costo total.

Mano de obra del eliminador de gotas de dos pasos					
Descripción	Unidad	Peso unitario (kg)	Peso total (kg)	Coste medio (\$)	Costo total (\$)
Disposición y montaje de las lamas del separador de gotas de 0,794 mm de espesor x 30,5 mm de ancho x 2779 mm de largo.	180	5.29	952.20	0.80	761.76
Doblado de las lamas para formar el perfil de 0,794 mm de espesor (según plano).	540	5.29	2856.60	0.25	714.15
Taladrado de orificios de Ø 9,53 mm en las lamas (según plano).	855	1.00	855.00	0.25	213.75
Perforación de orificios para varillas de Ø 9,53 mm en las palas (según plano).	855	1.00	855.00	0.25	213.75
Trazado y montaje de los tubos de soporte de acero inoxidable para las lamas del separador de gotas Ø 9,53 cm, longitud 40 x 1169 mm.	9	4.90	44.10	1.60	70.56
Trazado y montaje de la varilla de soporte de acero inoxidable para la cuchilla del separador de gotas Ø 9,53 cm x 1169 mm de longitud.	9	2.19	19.71	1.60	31.54

Disposición y montaje del bastidor de soporte del separador de gotas de 23,1 mm x 2785 mm x 1179 mm	9	65.18	586.60	0.80	469.28
Disposición y montaje del soporte del separador de gotas con ángulo de acero inoxidable de 40 mm.	9	14.64	131.79	0.80	105.43
Total			6301	Total (\$)	2580

Tabla 7. Costos de mano de obra para el eliminador de neblina

La tabla 8 enumera los materiales necesarios para construir el diseño del eliminador de neblina, incluyendo la cantidad, el precio, el costo por pedido y el costo total de los materiales.

Materiales para el eliminador de gotas de dos pasos					
Descripción	Cantidad	Precio (\$ c/u)	Total (\$)	Coste medio (\$)	Costo total (\$)
Placa de acero inoxidable AISI 304, 1219,2 mm x 2438,4 mm por 0,79375 mm	180 kg	5.29	952.20	3.05	2901.35
Placa de acero inoxidable AISI 304 de 3175 mm	9 kg	65.18	586.60	3.17	1858.94
Tubo de acero inoxidable AISI 304 9.525 mm Schedule 40	9 kg	5.85	52.61	6.73	354.03
Varilla de acero inoxidable AISI 304 Ø 6,35 mm	9 kg	2.19	19.71	0.99	19.51
Ángulo de 40mm x 40mm x 4 mm. Sp.	9 m	7.91	71.17	10.17	723.82
				Total (\$)	5858

Tabla 8. Materiales para el diseño del separador de gotas

La tabla 9 muestra los valores para cada kg de material de entrada

Equipo	Total (kg)	Costo unitario (\$)	Costo total (\$)
Mano de obra para el eliminador de gotas de dos pasos con ext.	6301	\$ 0,41	\$ 2580
Materiales para el eliminador de gotas de dos pasos con ext.	1.00	\$ 5857,66	\$ 5858
Subtotal	6.301,00		\$ 8438
10%			\$ 844
Total			\$ 9282

Tabla 9. Coste total de la propuesta

La figura 11 representa los resultados de las pruebas realizadas para el flujo de aire vertical, los cuales corresponden a la eficiencia de recolección de gotas de agua. La configuración analizada es el modelo de dos etapas y dos pasos (ABB 2 STAGE).

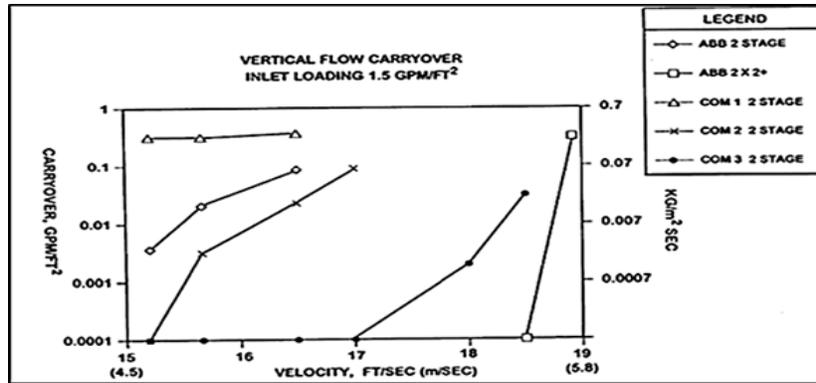


Figura 11. Banco de pruebas para flujo vertical
Fuente: (Bauver, Anderson y Kingston, 2023)

Los resultados en flujo vertical muestran que el eliminador de neblina ABB 2 STAGE tiene un arrastre de 0.07 kg/sm² a una velocidad de 4.62 m/s, capturando casi toda la carga de entrada de 1.12 kg/sm². En comparación, un separador de una etapa y dos pasos tiene una eficiencia de recolección de 0.014 kg/s*m².

Carga a la que estará sometido el sistema:

- **Carga líquida:** 1.67 m³/min
- **Área de sección transversal de los eliminadores de neblina:** 24.81 m²
- **Carga aplicada:** 1.12 kg/s*m²
- **Arrastre estimado del agua (20% de la carga):** 0.224 kg/s*m²

Input load (Kg/s*m ²)	Inlet load (l/min*m ²)	Arrastre (Kg/s*m ²)	Eficiencia (l/min*m ²)	Acumulado
Estudio en EEUU				
1.5	61.1	0,005	0,204	99,96
Resultados esperados de la propuesta.				
1,12	67,2	0.008	0,407	99,39

Tabla 13. Eficacia de la recogida

La Tabla 13 muestra los resultados obtenidos para el eliminador de neblina del estudio, indicando que tendría una eficiencia de recolección del 99.39%, lo cual reduce significativamente las emisiones de partículas a la atmósfera.

La Tabla 14 compara los datos obtenidos en el estudio de 1996 con la eficiencia proyectada al incorporar el eliminador de neblina al depurador original.

Emisión de partículas (kg/h)	Eficiencia	Emisión de partículas a la atmósfera (kg/h)	Horas de operación	Emisión de partículas en el periodo de operación (kg)
Sin eliminador de niebla				
891	95	44.6	4320	192519
Con el eliminador de niebla				
891	99.4	5.4	4320	23487

Tabla 14. Resultados esperados al implementar el eliminador de neblina

CONCLUSIONES

La contaminación generada por las calderas acuotubulares de CAVSA impacta a cerca de 5,000 personas en el barrio Chirijos-Milagro, a pesar de contar con depuradores con una eficiencia del 95%. Durante la operación de la caldera #10, estos equipos no son suficientes para mitigar completamente las emisiones contaminantes.

La incorporación del eliminador de neblina tipo Chevron (ABB 2 STAGE) al depurador de la caldera #10 incrementó la eficiencia de recolección de cenizas a un 99.39%, capturando 23,487,000 kg adicionales durante el periodo operativo, con costos operativos bajos en relación con su diseño e instalación.

Aunque Ecuador cuenta con regulaciones ambientales, carece de un marco legal que garantice auditorías efectivas para controlar procesos industriales contaminantes. El análisis MCDA respaldó decisiones sostenibles, identificando al eliminador de neblina tipo Chevron como la mejor opción para optimizar el desempeño del sistema, considerando criterios técnicos, económicos y ambientales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bahadori, A. (2014). *Natural Gas Processing: Technology and Engineering Design*. Gulf Professional Publishing. Disponible en: https://books.google.com.ec/books/about/Natural_Gas_Processing.html?id=cffoQEACAAJ&redir_esc=y
- Bauver, I. W. P., Anderson, D. K., & Kingston, W. H. (2000). Mist eliminator for wet gas scrubbing [United States Patent No. 6,083,302]. Disponible en: <https://patents.google.com/patent/US6083302A/en>

- Cao, X., & Bian, J. (2019). Supersonic separation technology for natural gas processing: A review. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 136, 138–151. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2019.01.007>
- Castiñeiras, S. (n.d.). How to calculate a droplet separator [Internet]. Collaborative Engineering. Disponible en: <https://ingenieriacolaborativa.com/separador-de-gotas/>
- China Chevron Vane Type Mist Eliminator Suppliers, Manufacturers - Wholesale Price - YUANFENG. (n.d.). Wuxi Yuanfeng Environmental Protection Technology Co., Ltd. Disponible en: <https://es.yfenvironment.com/mist-eliminator/chevron-vane-type-mist-eliminator.html>
- Erdal, F. M., & Shirazi, S. A. (2004). Local Velocity Measurements and Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulations of Swirling Flow in a Cylindrical Cyclone Separator. *Journal of Energy Resources Technology*, 126(4), 326–333. <https://doi.org/10.1115/1.1805539>
- Galletti, C., Brunazzi, E., & Tognotti, L. (2008). A numerical model for gas flow and droplet motion in wave-plate mist eliminators with drainage channels. *Chemical Engineering Science*, 63(23), 5639–5652. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2008.08.011>
- Hernández Sampieri, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2010). *Research methodology* (6^a ed.). McGraw-Hill/Interamericana Editores. Disponible en: <https://www.uca.ac.cr/wp-content/uploads/2017/10/Investigacion.pdf>
- James, P. W., Azzopardi, B. J., Wang, Y., & Hughes, J. P. (2005). A Model for Liquid Film Flow and Separation in a Wave-Plate Mist Eliminator. *Chemical Engineering Research and Design*, 83(5), 469–477. <https://doi.org/10.1205/cherd.04150>
- Lobato Freire, G. E., & Castillo Castillo, Á. F. (2015). Design and construction of a cyclonic separator with tangential input and axial discharge for particulate matter smaller than 40 μm [Internet]. *dspace.esPOCH.edu.ec*. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/4852>
- Narimani, E., & Shahhoseini, S. (2011). Optimization of vane mist eliminators. *Applied Thermal Engineering*, 31(2–3), 188–193. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.08.016>

- Rahimi, R., & Abbaspour, D. (2008). Determination of pressure drop in wire mesh mist eliminator by CFD. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 47(9–10), 1504–1508. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2007.09.004>
- Rafeea, R., Rahimzadeh, H., & Ahmadi, G. (2010). Numerical simulations of airflow and droplet transport in a wave-plate mist eliminator. *Chemical Engineering Research and Design*, 88(10), 1393–1404. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2010.02.013>
- Ramos Núñez, L. J., & Mendoza Haro, C. (2021). Environmental sustainability, optimization of the gas scrubber for water-tube boilers in Sugar Company Valdez S.A. [Tesis]. Unemi Repository, Milagro State University "UNEMI." Disponible en: <https://repositorio.unemi.edu.ec/bitstream/123456789/5583/1/Ramos%20Nu%C3%B1ez%20Leidy%20Jocelyne.pdf>
- Research Triangle Park, NC 27711, North Carolina, USA: Air Quality Strategies and Standards Division of the Office of Air Quality Planning and Standards, U.S. (2002). Disponible en: https://www3.epa.gov/ttnecat1/cica/files/c_allchs-s.pdf
- Tashakkori, A., & Creswell, J. W. (2007). Editorial: Exploring the Nature of Research Questions in Mixed Methods Research. *Journal of Mixed Methods Research*, 1(3), 207–211. <https://doi.org/10.1177/1558689807302814>
- Tapia Núñez, L. (2015). Air emission standards from stationary sources. Disponible en: <https://maeorellana.files.wordpress.com/2015/11/anexo-3aire-fuentes-fijas.pdf>
- Wang, S., Li, H., Wang, R., Wang, X., Tian, R., & Sun, Q. (2019). Effect of the inlet angle on the performance of a cyclone separator using CFD-DEM. *Advanced Powder Technology*, 30(2), 227–239. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2018.12.030>
- Wasilewski, M., & Brar, L. S. (2019). Effect of the inlet duct angle on the performance of cyclone separators. *Separation and Purification Technology*, 213, 19–33. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.12.023>
- YUANFENG (n.d.). Chevron Vane Type Mist Eliminator Suppliers, Manufacturers [Internet]. Wuxi Anaya Environmental Protection Technology Co., Ltd. Disponible en: <https://es.yfenvironment.com/mist-eliminator/chevron-vane-type-mist-eliminator.html>