

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**  
**FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**



**EFICIENCIA DE UN LAVADOR DE PARTÍCULAS SCRUBBER PARA LA  
REDUCCIÓN DE LAS EMISIONES DE MATERIAL PARTICULADO EN LA  
EMPRESA AGROPECUARIA ROSSEL S.R.L.**

**Tesis**

**Para optar el título de:**

**INGENIERO AMBIENTAL**

**PRESENTADO POR:**

**MARY CECILIA DURAN RIVERA**

**Tingo María, Perú**

**2025**



**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N°014-2026-FRNR-UNAS**

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 19 de diciembre de 2025, a horas 08:00 a.m. en la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Recursos Naturales Renovables para calificar la tesis titulada:

**“EFICIENCIA DE UN LAVADOR DE PARTÍCULAS SCRUBBER PARA LA  
RECUCCIÓN DE LAS EMISIONES DE MATERIAL PARTICULADO EN LA  
EMPRESA AGROPECUARIA ROSSEL S.R.L.”**

Presentado por la Bachiller: **DURAN RIVERA, MARY CECILIA** después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara **APROBADO** con el calificativo de “MUY BUENA”.

En consecuencia, la sustentante queda apto para optar el Título Profesional de **INGENIERO AMBIENTAL** que será aprobado por el Consejo de Facultad, Tramitándolo al Consejo Universitario para el otorgamiento del Título Correspondiente.

Tingo María, 06 de febrero de 2026

  
Mchlgo. MSc. **LUIS ALBERTO SÁNCHEZ ROMERO**  
**PRESIDENTE**

  
Ing. M. Sc. **ALBERTO FRANCO CERNA CUEVA**  
**MIEMBRO**

  
Blgo. MSc. **CESAR AUGUSTO GOZME SULCA**  
**MIEMBRO**



  
Dr. **VICTOR MANUEL BETETA ALVARADO**  
**ASESOR**



UNAS

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN

UNIDAD DE SOPORTE CIENTÍFICO REPOSITORIO INSTITUCIONAL

"Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres"  
"Año de la Esperanza y el Fortalecimiento de la Democracia"

## CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N 062 - 2026 - CS-RIDUNAS

El Jefe de la Unidad de Soporte Científico de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, quien suscribe,

### CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Investigación; aprobó el proceso de revisión a través del software TURNITIN, evidenciándose en el informe de originalidad un índice de similitud no mayor del 25% y contenido generado por Inteligencia Artificial menor o igual al 20%. Según establece el Art. 29° y 30° del Acuerdo Nro.017-2025-CIUNAS-VRI-UNAS.

### Programa de Estudio:

Ingeniería Ambiental

### Tipo de documento:

Tesis

X

Trabajo de Suficiencia Profesional

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE	
		SIMILITUD	CONTENIDO GENERADO POR INTELIGENCIA ARTIFICIAL
EFICIENCIA DE UN LAVADOR DE PARTÍCULAS SCRUBBER PARA LA REDUCCIÓN DE LAS EMISIONES DE MATERIAL PARTICULADO EN LA EMPRESA AGROPECUARIA ROSSEL S.R.L.	MARY CECILIA DURAN RIVERA	06 % Seis	0 % Cero

Tingo María, 20 de febrero de 2026.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA  
UNIDAD DE SOPORTE CIENTÍFICO

ING. EINSTEIN A. ORTIZ MORALES  
JEFE

C.C. Archivo

## DEDICATORIA

A Dios, por guiarme en cada momento de incertidumbre, siendo mi refugio durante cada una de las dificultades, así como mi compañía constante en cada paso de la vida.

A mis amados padres, Alejandro Duran y Jorgina Rivera, quienes han sido mi mayor apoyo y constante fuente de inspiración. Les agradezco por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia, por su amor incondicional y por los sabios consejos que siempre me han guiado.

A mis queridas hermanas, Florcita, Lucy, Indyra, Sherly y a mis sobrinas Jossely y Arianny; por creer en mí y darme ánimo para seguir adelante en lo profesional y el cariño que siempre me han brindado.

A Elías, por ser mi apoyo incondicional, creer en mí y acompañarme con paciencia en cada etapa de este camino; y Jango por estar siempre a mi lado.

## AGRADECIMIENTOS

A Dios, que me da vida, fortaleza y sabiduría con al cual enfrento los desafíos en este trayecto profesional.

A mis adorados padres, que vienen siendo una de las principales fuentes para inspirarme y motivarme.

A mis hermanas, por su compañía, aliento y confianza en mí. Su apoyo emocional ha sido esencial para mantenerme enfocada y perseverante en mis objetivos.

A mi alma mater, Universidad Nacional Agraria de la Selva, que me brindó esta oportunidad para que me forme profesionalmente, por inculcarme valores, conocimientos y experiencias que han sido fundamentales en mi crecimiento académico y personal.

A las personas encargadas de la empresa agroindustrial Agropecuaria Rossel S.R.L., que me brindaron el espacio y las facilidades necesarias para llevar a cabo el presente estudio.

Al catedrático asesor Dr. Víctor Manuel Beteta Alvarado, quien me otorgó su valiosa orientación, dedicación y paciencia. El apoyo y experiencia fueron cruciales para el éxito de este estudio.

A cada miembro del jurado calificador de la tesis, Mcblgo. Msc. Luis Alberto Sánchez Romero, Msc. Alberto Franco Cerna Cueva, Blgo. Msc. César Augusto Gosme Sulca por sus aportes y observaciones pertinentes en la investigación.

A mis amigos Ruth, Marloy, Kevin y Max, que de una u otra manera me brindaron su apoyo y aliento a lo largo de mi etapa universitaria.

## ÍNDICE

	<b>Página</b>
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Objetivos.....	2
1.1.1. Objetivo general .....	2
1.1.2. Objetivos específicos.....	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1. Antecedentes.....	3
2.1.1. Internacionales.....	3
2.1.2. Nacionales .....	5
2.2. Proceso productivo de la Palma Aceitera .....	7
2.2.1. Planta extractora .....	7
2.2.2. Planta de refinería.....	11
2.3. Emisiones industriales .....	14
2.3.1. Principales contaminantes atmosféricos.....	14
2.4. Fibra de escobajo .....	16
2.5. Ceniza volante.....	16
2.6. Tipos de tratamientos atmosféricos industriales.....	17
2.6.1. Sistemas de tratamiento correctores .....	17
2.7. Tipos de lavadores de gases.....	20
2.7.1. Torres rociadoras .....	21
2.7.2. Scrubber ciclónicos de rocío.....	22
2.7.3. Scrubber por choque o de placas .....	23
2.7.4. Scrubber de lecho empacado .....	24
2.7.5. Scrubber Venturi .....	25
III. MATERIALES Y MÉTODOS .....	27
3.1. Lugar de ejecución.....	27
3.1.1. Ubicación política.....	27
3.1.2. Ubicación geográfica.....	27
3.1.3. Aspectos sociales y ambientales.....	28
3.2. Materiales y métodos .....	29
3.2.1. Materiales .....	29
3.2.2. Equipos .....	29
3.2.3. Software.....	29

3.2.4. Metodología.....	30
3.3. Tipo y diseño de investigación .....	49
3.3.1. Diseño de investigación.....	49
3.3.2. Variables del estudio .....	49
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	50
4.1. Parámetros de operación del lavador de partículas.....	50
4.1.1. Parámetros para el diseño del lavador .....	50
4.2. Determinación de la estructura del lavador de partículas .....	51
4.2.1. Cálculo y diseño del Lavador de partículas.....	51
4.3. Caracterización del material particulado retenido. ....	53
4.4. Eficiencia de lavador de partículas .....	56
4.5. Parámetros de operación del lavador de partículas.....	59
4.6. Determinar la estructura del lavador de partículas .....	59
4.7. Eficiencia del sistema de tratamiento atmosférico.....	60
4.7.1. Contrastación de la hipótesis de la investigación .....	61
4.7.2. Contrastación de resultados con investigaciones similares .....	61
V. CONCLUSIONES.....	63
VI. PROPUESTAS A FUTURO .....	64
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	65
ANEXO .....	68

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla</b>	<b>Página</b>
1. Registro de datos de campo.....	48
2. Parámetros para el diseño del lavador. ....	50
3. Estructura del lavador de partículas.....	51
4. Determinación de pesos retenidos sin el lavador de partículas en funcionamiento. ...	54
5. Resultados de monitoreo de emisiones gaseosas de agosto del 2020. ....	57
6. Resultados de la medición de emisiones gaseosas de la estación EMI-01 .....	58
7. Determinación de pesos retenidos de material particulado por el Sistema de tratamiento atmosférico. ....	81

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
1. Sistema diseñado para el tratamiento de gases residuales.....	4
2. Sistema de tratamiento atmosférico diseñado para la empresa COVIF&ME SAC. ...	6
3. Proceso de producción de Aceite Crudo de Palma (ACP). ....	9
4. Proceso de producción de Aceite Crudo de Palmiste (PKO). ....	11
5. Proceso productivo de la Oleína de Palma Aceitera.....	14
6. Proceso de absorción para eliminación de gases. ....	17
7. Proceso de adsorción para eliminación de partículas sólidas en emisiones. ....	18
8. Proceso de recolección y atrapamiento de las partículas sólidas en un ciclón. ....	19
9. Partes y proceso de los filtros de mangas. ....	20
10. Maneras en las que las partículas y gases se absorben en el líquido absorbente o se adhieren en el líquido adsorbato. ....	21
11. Funcionamiento y estructura de una torre rociadora. ....	22
12. Partes y funcionamiento de un Scrubber ciclónico de rocío. ....	23
13. Partes y funcionamiento de un Scrubber de placas. ....	24
14. Partes y funcionamiento de un Scrubber de lecho empacado. ....	25
15. Partes y funcionamiento de un Scrubber Venturi.....	26
16. Ubicación de la empresa agroindustrial Agropecuaria Rossel S.R.L.....	27
17. Esquema de entradas y salidas que intervienen en el sistema. ....	31
18. Diagrama del Sistema de funcionamiento del lavador de partículas.....	32
19. Diseño de la columna del lavador de partículas. ....	32
20. Diagrama con esquema aplicado de un plato perforado de flujo transversal. ....	36
21. Arrastre, platos perforados. ....	43
22. Diagrama esquemático de condensación del lavador. ....	44
23. Muestreo de efluentes del lavador de partículas.....	46
24. Fuentes de generación de material particulado.....	51
25. Análisis energético del caldero.....	51
26. Estructura del lavador de partículas.....	53
27. Material particulado hasta 2.0 $\mu m$ (incluye las partículas de 2,5 y 10 $\mu m$ ). ....	54
28. Peso retenido total sin el lavador de partículas en funcionamiento.....	55
29. Determinación de pesos de material particulado retenido por el lavador de partículas .....	55

30. Emisiones de material particulado año 2020 y 2024.....	59
31. Gráfico comparativo de la concentración de material particulado <i>PM10</i> y <i>PM2.5</i> (antes y después de la instalación del lavador de partículas) .....	61
32. Punto de inicio de humo o gases en área de caldero. ....	69
33. Área de mantenimiento donde se realizará la construcción del lavador de partículas. ....	69
34. Platos perforados de acuerdo con los cálculos, para instalación en la torre de lavado. ....	70
35. Cuerpo de la torre de lavador siendo armado. ....	70
36. Parte de la estructura del decantador tipo florentino .....	71
37. Cuerpo de la torre de lavado con instalación de los platos perforados.....	71
38. Instalación del 3er cuerpo de la torre de lavado realizada por el área de mantenimiento. ....	72
39. Instalación de los ductos de la torre de lavado y el florentino de recuperación de las aguas residuales. ....	72
40. Instalación completa de la torre de lavado y pintado de la torre de lavado de color negro de alta Resistencia de temperatura. ....	73
41. Monitoreo del funcionamiento del lavador de partículas. ....	73
42. Punto de muestreo para la caracterización de efluentes del lavador de partículas...	74
43. Punto de muestreo para la caracterización de efluentes del lavador de partículas...	74
44. Punto de muestreo para la caracterización de efluentes del lavador de partículas...	75
45. Caracterización del material particulado mediante filtración por una bomba de vacío. ....	75
46. Muestras en jarras de 500 mL sacadas del Florentino de recuperación de aguas residuales del Sistema de tratamiento atmosférico.....	76
47. Filtros con material particulado pesado en una balanza electrónica para obtener el peso de material particulado retenido en el Sistema de tratamiento atmosférico....	76
48. Muestras del monitoreo de gases de emisión de la chimenea con el lavador de partículas implementado.....	77
49. Diagrama de funcionamiento del sistema de lavador de partículas.....	78

## RESUMEN

Esta tesis tuvo como objetivo general el de evaluar la eficiencia de un lavador de partículas Scrubber para la reducción de las emisiones de material particulado en una empresa de palma aceitera. Se determinaron los parámetros de operación, la estructura del lavador (diseño y cálculos de dimensionamiento), se caracterizaron los materiales particulados retenidos por el lavador de partículas y se determinó la eficiencia del sistema de tratamiento atmosférico implementado. Como resultados se obtuvieron la determinación de los parámetros de operación del lavador de partículas, la capacidad del caldero de 7 m<sup>3</sup>/hora de vapor, la fibra de palma aceitera como combustible, la humedad de 5 – 10 % del combustible, la presión de 12 – 14 Bar del caldero, el consumo de 1,500 kg fibra/hora de combustible, la temperatura del agua de 105 °C del agua en el caldero; así como también se calculó el dimensionamiento de la torre de lavado con un diseño Scrubber – torre de platos, que se diseñó con una altura de 4.45 metros, un diámetro de 1.625 metros, con platos deflectores con espaciamiento de 0.60 metros; donde se pudo caracterizar los materiales particulados retenidos por el sistema de tratamiento atmosférico, encontrándose PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>. Concluyendo que el lavador de partículas tiene una eficiencia de remoción del 84 % para la retención de material particulado.

**Palabras clave:** PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, lavador de partículas, eficiencia.

# **The Efficiency of a Particle Washing Scrubber for the Reduction of Particulate Matter Emissions at the Rossel S.R.L. Agriculture Company**

## **Abstract**

The general objective of this thesis was to evaluate the efficiency of a particle washer Scrubber for the reduction of particulate matter emissions in the oil palm company. The operation parameters were determined, the structure of the washer (design and dimensional calculations) [were done], the particulate matter that was retained through the washing of particulates was characterized, and the efficiency of the implemented atmosphere treatment system was determined. For the results, the determination of the operational parameters of the particle washer, the capacity of the cauldron at 7 m<sup>3</sup>/hour of vapor, the fiber from the oil palm as fuel, the humidity at 5 – 10 % of the fuel, the pressure at 12 – 14 Bar of the cauldron, the consumption of 1,500 kg of fiber/hour of fuel, [and] the water temperature of 105 °C from the water in the cauldron were determined; the dimension of the washer tower with a scrubber design – plate tower was also calculated, which was design with a height of 4.45 meters, a diameter of 1.625 meters, with deflector plates spaced at 0.60 meters. Where the particulate matter retained by the atmosphere treatment system could be characterized, finding PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>. It was concluded that the particle washer had a removal efficiency of 84% for the retention of particulate matter.

**Keywords:** PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, particle washer, efficiency.

## I. INTRODUCCIÓN

La contaminación ambiental tiene un efecto negativo en los componentes ambientales, sea en la contaminación del agua, suelo o aire. Las industrias han sido una de las actividades económicas que desataron la contaminación en su máxima expresión, realizando sus actividades sin medir las consecuencias del deterioro ambiental que estaban ocasionando; poco a poco estas industrias han ido mitigando el impacto negativo que generaban al ambiente, esto mediante regulaciones técnicas y legales que impuso cada gobierno en su jurisdicción, de manera que se diseñaron e implementaron sistemas de tratamientos para los vertimientos, los derrames y las emisiones atmosféricas.

Uno de los componentes que mayor ha sido alterado es la calidad del aire, teniendo como consecuencias un incremento de la concentración en los óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>), óxidos de carbono (CO<sub>x</sub>), material particulado (MP<sub>x</sub>) y óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>); dando paso a que se deteriore gradualmente la capa de ozono y con ello el calentamiento global que cada año va en aumento, donde también los pobladores han sufrido enfermedades cardiovasculares y respiratorias.

Los sistemas de tratamiento de emisiones atmosféricas son medidas correctivas que las industrias han implementado en sus procesos, de manera que las emisiones atmosféricas no alteren la calidad del aire de manera directa o indirecta, por lo cual se plantea la siguiente interrogante, ¿Cuál será la eficiencia de un Lavador de Partículas para la reducción de las emisiones de Material Particulado en una agroindustria de palma aceitera?; por ello nos planteamos la siguiente hipótesis: El lavador de partículas diseñado e implementado en la empresa Agroindustrial reducirá más del 80% de las concentraciones de los materiales particulados  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ . Es por ello, que se realizó el diseño, construcción, así como se implemente un lavador de partículas como sistema para el tratamiento de las emisiones generadas en una empresa agroindustrial de palma aceitera, de manera que se pueda implementar como medida correctiva para la reducción, control y mitigación de la emisión atmosférica generado durante el proceso productivo.

La empresa Agropecuaria Rossel S.R.L. consintiendo el desarrollo socioeconómico y ambiental, permite realizar esta investigación con fines de que se reduzcan las emisiones generadas

en la industria; que cuenta con una planta extractora y una planta de refinería; en la planta extractora se encuentra un caldero y en la planta de refinería dos calderos; para esta investigación se implementó un sistema de tratamiento en el caldero de la planta de extracción, el cual está compuesto por un lavador de partículas; para ello la empresa ya cuenta con un diseño del tipo de lavador – Scrubber torre de platos, este lavador estará compuesto por una columna de lavado en la cual se encuentran platos o deflectores y además el sistema cuenta con un decantador tipo florentino, este componente nos ayudó a que el agua (solución absorbente) que se utilizó para el lavado de las partículas se pueda recuperar y pueda ser insertado nuevamente al sistema de lavado, de manera que el sistema reutilice el agua. Para la implementación del sistema diseñado, se realizaron los cálculos estructurales y los cálculos hidráulicos, de manera que el sistema no tenga fugas ni pérdidas o caídas de presión que perjudiquen al proceso productivo.

Esta investigación será beneficioso para la población colindante a la empresa, de manera que no sufra alteraciones la calidad del aire que respiran y mantengan su calidad de vida aceptable, asimismo, la empresa esté cumpliendo con las obligaciones ambientales que le son fiscalizables.

## **1.1. Objetivos**

### **1.1.1. Objetivo general**

Evaluar la eficiencia de un Lavador de partículas Scrubber para la reducción de las emisiones de Material Particulado en una empresa de palma aceitera.

### **1.1.2. Objetivos específicos**

- Determinar los parámetros de operación del lavador de partículas.
- Determinar la estructura del lavador de partículas.
- Caracterizar los materiales particulados del lavador de partículas  $PM_{10}$   $PM_{2.5}$ .
- Calcular la eficiencia del lavador de partículas de emisiones atmosférica.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. Antecedentes

#### 2.1.1. Internacionales

Cruz, A. (2023). Realizó la investigación denominada “**Diseño, simulación y validación de un lavador de aire solar tubular en Cuernavaca Morelos**”, obteniendo como objetivo rediseñar y realizar la construcción de un prototipo de lavador de aire tubular que tendrá como funcionamiento a través de energía solar con respaldo de un sistema fotovoltaico para que se implemente en la cocina del instituto de Energía Renovables; donde el investigador concluyó que el diseño del lavador permite la recirculación de 20 L de agua/solución para la reducción de un mes de los gases de cocción de alimentos.

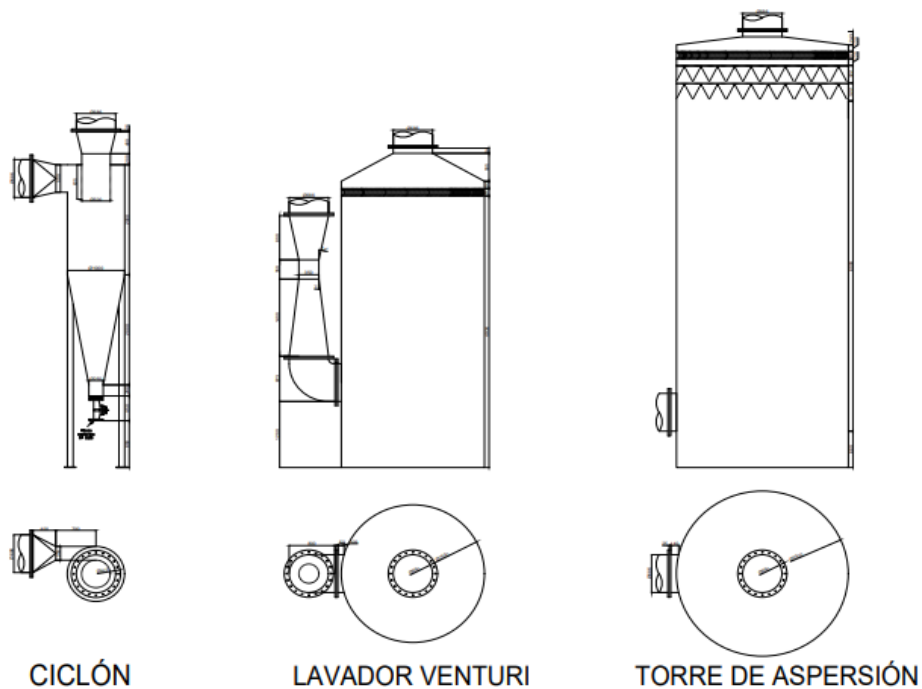
Diaz, A. (2017). Realizó la investigación denominada “**Propuesta de una metodología para seleccionar un lavador de gases en Valparaíso**”, donde concluyó que la investigación realizada sirve como apoyo técnico durante la decisión para seleccionar el lavador de gases gracias a los criterios tomados, y que posterior a ello se tiene que realizar los cálculos para el dimensionamiento y operatividad del sistema a implementar.

Gavidia, L. y Pilay, D. (2020). Realizó un “Estudio y diseño de un ciclón para el control de partículas para una empresa productora de libros en la ciudad de Guayaquil”; mediante el cual determinaron para el proceso productivo empleada por la empresa, se recomienda que se cambie su sistema usado para recolectar partículas por el ciclón de entrada tangencial y descarga axial de tipo Stairmand de acuerdo con la cual se aumentaría la eficiencia para recolectar partículas al 96% disminuyendo la concentración de los agentes contaminantes en el aire, por medio de que se implemente el tratamiento atmosférico tipo ciclón, teniendo ventajas sobre la reducción en el tiempo de paro al recolectar o limpiar el polvillo, etc.

Gil, M. y Molina, A. (2020). Diseñaron y realizaron la construcción de un prototipo de columna de lavado cuyo destino fue controlar el material particulado de un hogar. Diseñaron y construyeron un prototipo de columna de lavado en material novedoso para este tipo de tratamientos (acrílico transparente) cuya dimensión fue 68 cm

de alto, con 38 cm en el área de los empaques y 15 cm de la parte diametral, de manera que el sistema remueve el PM que se concentra en el aire y se aproveche la ventilación intramural mediante el extractor con 110V, por lo cual permite el funcionamiento eficiente y no tiene complicaciones al pasar de manera continua el aire por cada empaque, se determinó que al existir elevadas concentraciones de partículas en el aire sometidas a la columna de lavado, es posible que se presenten valores porcentuales de eficiencias elevadas cuando el equipo esté sometido a bajas concentraciones contaminantes en el aire, se observarán patrones constantes con bajos valores porcentuales de remoción.

Hernández, L. (2018). Realizó la investigación denominada **“Diseño de un sistema de tratamiento de gases residuales para una fábrica de fertilizantes ubicada en Sarrión (Teruel)”**, en esta investigación, la autora concluyó que para el sistema de tratamiento de las emisiones atmosféricas se optó por el sistema compuesto mediante distintas etapas, donde la etapa inicial consistirá en que se eliminen partículas de mayor tamaño, para ello se optó un ciclón debido a que presentaba un elevado rendimiento respecto a las partículas con dimensiones superiores a los  $75\mu\text{m}$ ; para la segunda etapa se optó por un lavador de Venturi, y en la tercera se optó por una torre de aspersión debido al elevado rendimiento para la retención de partículas de tamaños menores.



Fuente: Hernández (2018).

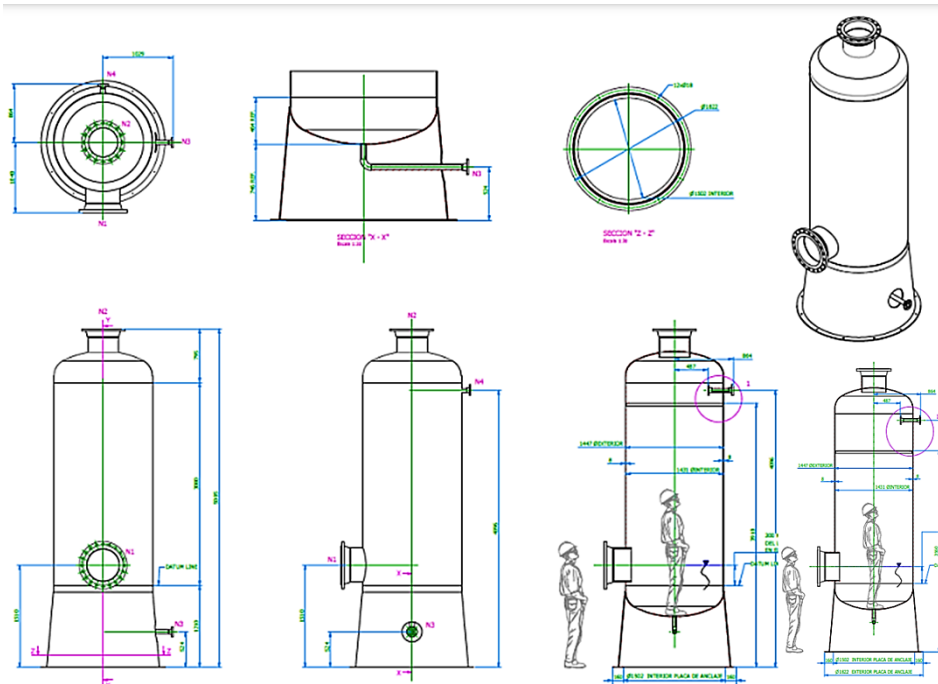
**Figura 1.** Sistema diseñado para el tratamiento de gases residuales.

### 2.1.2. Nacionales

Apaza, D. y Flores, J. (2022). Realizaron el diseño de un sistema de lavador de gases tipo torre, con la finalidad de reducir la emisión de gases contaminantes al fundir el plomo. Para ello realizaron el monitoreo ambiental donde se pudo determinar y diseñar la hidráulica del sistema con la finalidad de que se seleccione cada componente del sistema lavador de gases. Determinando el caudal del fluido en  $18.8 \text{ mm}^3/\text{h}$ , para el cual seleccionaron cuatro aspersores de  $3/8''$  de la marca VERLEK, una tubería de descarga de  $2.0''$  y de succión de  $2 \frac{1}{2}''$  y con ello fue capaz de que se seleccione la bomba PEDROLLO cuyo modelo fue F40/125C de 1.5 hp, enseguida se pudo iniciar con dimensionar y seleccionar cada componente y accesorio, con la cual posteriormente se inició a ensamblar el componente hidráulico del sistema de tratamiento.

En Lima se realizó una investigación denominada **“Diseño de un sistema de extracción y tratamiento de gases en un ambiente de forja y soldadura”**, donde se concluyó que se diseñaron dos sistemas de extracción y tratamientos de gases para los procesos de la empresa, y que los sistemas que se diseñaron tienen la garantía de extraer eficientemente los humos y gases producidos en la empresa (Delgado, M., 2016).

Flores, y Apaza; (2022), realizaron un estudio titulado **“Diseño de un sistema de lavador de gases tipo torre para reducir la emisión de gases contaminantes en la fundición de plomo. COVIF&ME SAC – Callao”**, donde los autores concluyeron que determinaron el diseño para el sistema de lavador de gases tipo torre, también que se determinaron los diseños hidráulicos y mecánicos, por lo cual determinaron los niveles de gases contaminantes por debajo de los valores iniciales.



Fuente: Flores y Apaza (2022)

**Figura 2.** Sistema de tratamiento atmosférico diseñado para la empresa COVIF&ME SAC.

Pacherrez, (2019). Realizó una investigación denominada “**Diseño de un lavador de gases para determinar la disminución del material particulado de la caldera acuotubular N° 06 en Agroindustrial Pomalca, Lambayeque**”, donde el investigador concluyó que el lavador de gases es eficiente en un 91.591 % respecto a recolectar material particulado, de manera que se puede reducir en 59 915,20 toneladas por cada año de CO<sub>2</sub> emitido a la atmósfera.

Sifuentes, N. (2018). Ejecutó la tesis denominada “**Reducción de la concentración de Monóxido de Carbono optimizando el proceso de lavado de gases de la empresa MYFRANVER, San Juan de Lurigancho - 2019**”, donde el investigador concluyó que se determinó la optimización del proceso de lavado de gases y se redujo la concentración de monóxido de carbono desde 5326,90 hasta los 3010,53 mg/Nm<sup>3</sup>, además que al aplicar el hidróxido de monóxido de sodio en el agua y al ajustar los escenarios operativos, como la cantidad de oxígeno, la temperatura del agua, la cantidad de aire durante el proceso de lavado de gases hacen que los procesos se optimicen, de manera que se reduce la concentración del monóxido de carbono.

## 2.2. Proceso productivo de la Palma Aceitera

### 2.2.1. Planta extractora

#### a) Extracción de aceite crudo de palma

##### - Recepción de frutos

La recepción de frutos inicia con el pesado de los frutos en la balanza electrónica, lo siguiente es pasar por el control de calidad para la materia prima, donde es verificado cada racimo fresco de la palma pasando a la recepción y los racimos que estén verdes o podridos no son recepcionados. Pasado este procedimiento los racimos son depositados en una rampa donde un sistema de tolvas (compuertas) almacenan los frutos hasta que el transportador de cadenas o Redler transporta los frutos hacia las autoclaves o esterilizadores (Agropecuaria Rossel S.R.L., 2023).

##### - Esterilización

En los esterilizadores que vienen a ser las autoclaves, se esterilizan los frutos por medio de vapor de agua, así como también se varían las presiones en las autoclaves; además, los tiempos del ciclo de esterilización varían según la madurez de los frutos, siendo que para los frutos frescos toma un tiempo entre 80 a 90 minutos, mientras que para los frutos sobre maduros tome un tiempo entre 50 a 60 minutos; de esta manera el proceso suele acelerar el ablandamiento de cada fruto, también es factible que se separen, se extrae el aceite y se desprenda la almendra de la cáscara de nuez (Agropecuaria Rossel S.R.L., 2023).

##### - Desfrutamiento

El desfrutado es un proceso que se realiza por medio del funcionamiento de un tambor rotativo que gira la caja con los frutos a 180°, posteriormente se logra que se separe cada racimo esterilizado obteniendo los frutos sueltos, racimos vacíos y el raquis, seguidamente cada fruto es enviado al digestor por medio de transportadores sinfín y columnas elevadoras, de manera que cada raquis luego sea transportado para que se utilicen en campo como abono orgánicos, lo cual beneficia a las plantaciones debido a que contiene valores elevados de potasio y nitrógeno (Oleaginosas Amazónicas S.A., 2017).

### - **Digestión o malaxado**

Los frutos son descargados hacia el digestor, estos están provistos de paletas rotativas e inyección de manera directa del vapor, que vienen a ser tanques cilíndricos; en la parte interna del digestor suele afectarse de manera severa las estructuras del mesocarpio, en este proceso cada fruto es macerado hasta que se logre formar una masa blanda y homogénea (Oleaginosas Amazónicas S.A., 2017).

### - **Prensado**

Una vez que se obtuvo la masa homogénea y blanda pasan a la prensa, donde mediante prensas de tornillo sinfín se extrae el aceite. Al salir del digestor se aplica agua caliente con la finalidad de que las fibras sean lavadas para que se obtenga casi la totalidad de aceite. El licor de prensa que contiene aceite, lodo y agua pasa al equipo conocido como tamiz vibratorio, donde son separadas las partículas sólidas con la que se facilita que se clarifique el aceite (Oleaginosas Amazónicas S.A., 2017).

### - **Clarificación**

Viene a ser el proceso donde se va a separar y purificar el aceite crudo encontrada en la mezcla líquida que se obtuvo del prensado, la cual contiene agua, aceite y lodo; para que se logre esta separación suele aprovecharse la inmiscibilidad que tiene el aceite y el agua. La separación es realizada mediante separación dinámica (aquí es necesario el movimiento por fuerza centrífuga con la cual se obtiene la separación) o estática (aquí la separación se logra por medio de la decantación), y por diferencia de densidades y temperatura (Agropecuaria Rossel S.R.L., 2023).

### - **Secado o deshidratación**

Al aceite se le ingresa al tanque de secado que está compuesto por un sistema de serpientes, donde se realiza el secado a una temperatura entre los 90 a 105° Celsius; durante dicho proceso se tiene que eliminar la totalidad del agua contenida en el aceite, de manera que se llega a obtener una humedad menor al 0.14% (Oleaginosas Padre Abad, 2018).

### - **Almacenamiento**

Culminado la actividad del secado, el aceite se bombea hacia cada tanque de almacenamiento por medio de tuberías, estos tanques operan con

serpentines de tal manera que mantenga el aceite crudo de palma donde la temperatura suele ser 60° Celsius, a fin de evitar la oxidación del aceite (Oleaginosas Padre Abad, 2018).



Fuente: Induagro (2014).

**Figura 3.** Proceso de producción de Aceite Crudo de Palma (ACP).

## b) Aceite crudo de palmiste y harina de palmiste

### - Desfibrado

**Transportador de paletas:** La torta de prensa (fibras del racimo, nueces de diferentes tamaños y fracciones bajas de aceite) es desmenuzada y secada parcialmente por medio de un sistema de vapor de chaquetas, las funciones que cumple son, bajar el porcentaje de humedad existente en la torta que provienen de cada prensa, desmenuzarlas para luego transportarla en dirección al sistema de separación neumática siendo el lugar para separar a la nuez de las fibras (Oleaginosas Padre Abad S.A., 2018).

**Desfibración neumática:** Aquí la fibra se separa de las nueces, este sistema está compuesto por una columna vertical que tiene una sección rectangular, por donde se hace correr aire, permitiendo a las fibras menos pesadas que se arrastren a la parte más alta de la columna y por gravedad, cada nuez suele caer en la parte inferior Agropecuaria Rossel S.R.L. (2023).

### - **Preparación de las nueces**

**Tambor pulidor:** Cada nuez será separada en la desfibración, luego llevados por un transportador sinfín hacia un tambor pulidor giratorio, en este proceso serán desprendidas las fibras que estaban adheridas a la nuez, y también se eliminan cada impureza, piedra y demás materiales que ingresaron al sistema (Agropecuaria Rossel S.R.L., 2023).

**Silos de almacenamiento de nueces:** Del tambor pulidor pasan mediante fajas transportadoras hacia silos de almacenamiento, donde se procede a realizar el secado mediante ventiladores que están provistos para soplar aire caliente, de manera que se facilite su posterior trituración ya que las nueces al perder humedad facilitan su trituración (Agropecuaria Rossel S.R.L., 2023).

### - **Trituración**

Una vez que se realiza la clasificación de tamaño de las nueces, pasarán a la trituración; en esta fase se realiza la separación de la nuez de la almendra. Esta actividad es realizada a través de un molino rotatorio, que también se denomina “Ripple Mill”, teniendo como objetivo principal que se rompa la nuez evitando ocasionar rotura en las almendras (Oleaginosas Padre Abad S.A., 2018).

### - **Separación de la almendra**

**Hidrociclones:** La mezcla que fue triturada y que se compone por algunas fibras, polvo, cáscaras y almendras, son llevadas hacia un sistema para separar denominado ciclones; dentro de dicho sistema se opera bajo el principio de centrifugación, y como resultado se obtiene la separación de almendras y cáscaras (Agropecuaria Rossel S.R.L., 2023).

**Secado de almendras:** Las almendras que fueron recuperadas son transportadas hacia cada silo de secado, aquí se reducirá en contenido de su humedad entre los 6 a 7% (Agropecuaria Rossel S.R.L., 2023).

### - **Prensa de Expeller**

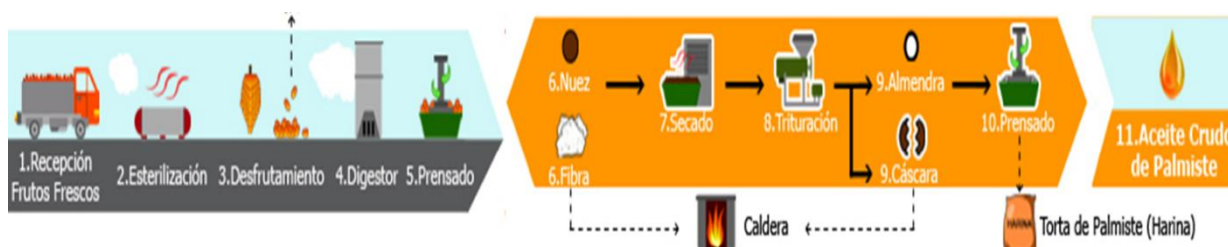
La función de la prensa es extraer todo el aceite de palmiste, para luego pasar a las prensas monotornillo, estas son desplazadas a través de tolvas donde se asegura su constante alimentación (Agropecuaria Rossel S.R.L., 2023).

### - Filtro prensa

El filtro prensa tiene como función de cristalizar el aceite por medio de lonas que detienen en el transcurso el material sólido que es contenido mediante suspensión en un líquido, y la parte líquida es llevada al tanque de recepción donde posteriormente sería llevado hacia el almacenamiento en tanques (Oleaginosas Padre Abad, 2018).

### - Almacenamiento

El aceite de palmiste que fue filtrado es almacenado en un tanque que mantiene su temperatura entre 50 – 55° Celsius (Agropecuaria Rossel S.R.L., 2023).



Fuente: Induagro (2014).

**Figura 4.** Proceso de producción de Aceite Crudo de Palmiste (PKO).

## 2.2.2. Planta de refinería

### a) Proceso de refinado del aceite crudo en la planta

#### - Recepción de materia prima

El aceite crudo de palmera se almacena en un tanque, donde mantiene una temperatura entre 40° a 60° Celsius, antes de enviar el aceite al blanqueador se realiza el análisis de control de calidad (Agropecuaria Rossel S.R.L., 2023).

#### - Calentamiento

Este proceso está compuesto por un tanque de blanqueo, aquí se realiza el calentamiento del aceite a través de serpentines que son inyectados con vapor directo; alcanzando temperaturas entre 60° a 65° Celsius, y se mantiene una agitación de 30 minutos (Agropecuaria Rossel S.R.L., 2023).

- **Desgomado**

En este proceso se realiza la eliminación de gomas y fosfolípidos, mediante el tratamiento con ácido cítrico ( $C_6H_8O_7$ ) que se encuentra a una concentración entre el 30 y 35%, con la finalidad de convertir los fosfolípidos no hidratables, y posterior realizar la separación con adición de agua a temperatura entre 60° a 65° Celsius (Agropecuaria Rossel S.R.L., 2023).

- **Blanqueado**

El blanqueado es un proceso que se lleva a cabo por el método de adsorción, en donde es necesario utilizar tierra activa al 1.1 hasta 1.2%, la finalidad de este proceso es que se eliminen los pigmentos, trazas e impurezas donde se les suele encontrar a las gomas y jabones del aceite, así como la eliminación del agua contenida (Agropecuaria Rossel S.R.L., 2023).

- **Filtrado Niagara**

El aceite que fue blanqueado en el proceso anterior será recirculado por un filtro Niágara, este proceso tiene como finalidad retener las partículas de tierra activa; aquí el objetivo es obtener un grado de impureza máximo de 10 y contenido de jabones de 0 ppm, una vez que se obtengan estos resultados, el laboratorio da la conformidad del proceso de blanqueo (Agropecuaria Rossel S.R.L., 2023).

- **Almacenamiento de aceite blanqueado**

A los aceites que fueron blanqueados se les envía al tanque de almacenamiento, donde estará a una temperatura de 115° a 120° antes de ser enviado al desaireador (Agropecuaria Rossel S.R.L., 2023).

- **Desaireado**

En este proceso se mantiene al aceite bajo vacío y a temperatura entre 90° a 110° Celsius, para posteriormente remover el aire contenido y las trazas de humedad, cuya finalidad es que se eviten las posibles reacciones de hidrólisis u oxidación que se generan por los compuestos glicéricos durante las posteriores etapas (Agropecuaria Rossel S.R.L., 2023).

#### - **Desodorizado**

Este proceso es la etapa principal del refinado del aceite, la desodorización es un proceso donde es necesario realizar para eliminar los ácidos grasos libres, así como también las sustancias que provocan malos sabores y olores. El aceite blanqueado antes de ser cargado es sometida a vacío, luego el producto (aceite) se ingresa por un intercambiador energético (calor) a la columna de desodorizado mediante una directa inyección de vapor seco, posteriormente ingresa a otro intercambiador de calor en la cual el aceite es blanqueado directamente a través del aceite térmico (Agropecuaria Rossel S.R.L., 2023).

Una vez que el aceite llega a su temperatura correspondiente, hasta que se obtenga RBD (refinado, blanqueado y desodorizado), y por último este pasa por un control de calidad (Agropecuaria Rossel S.R.L., 2023).

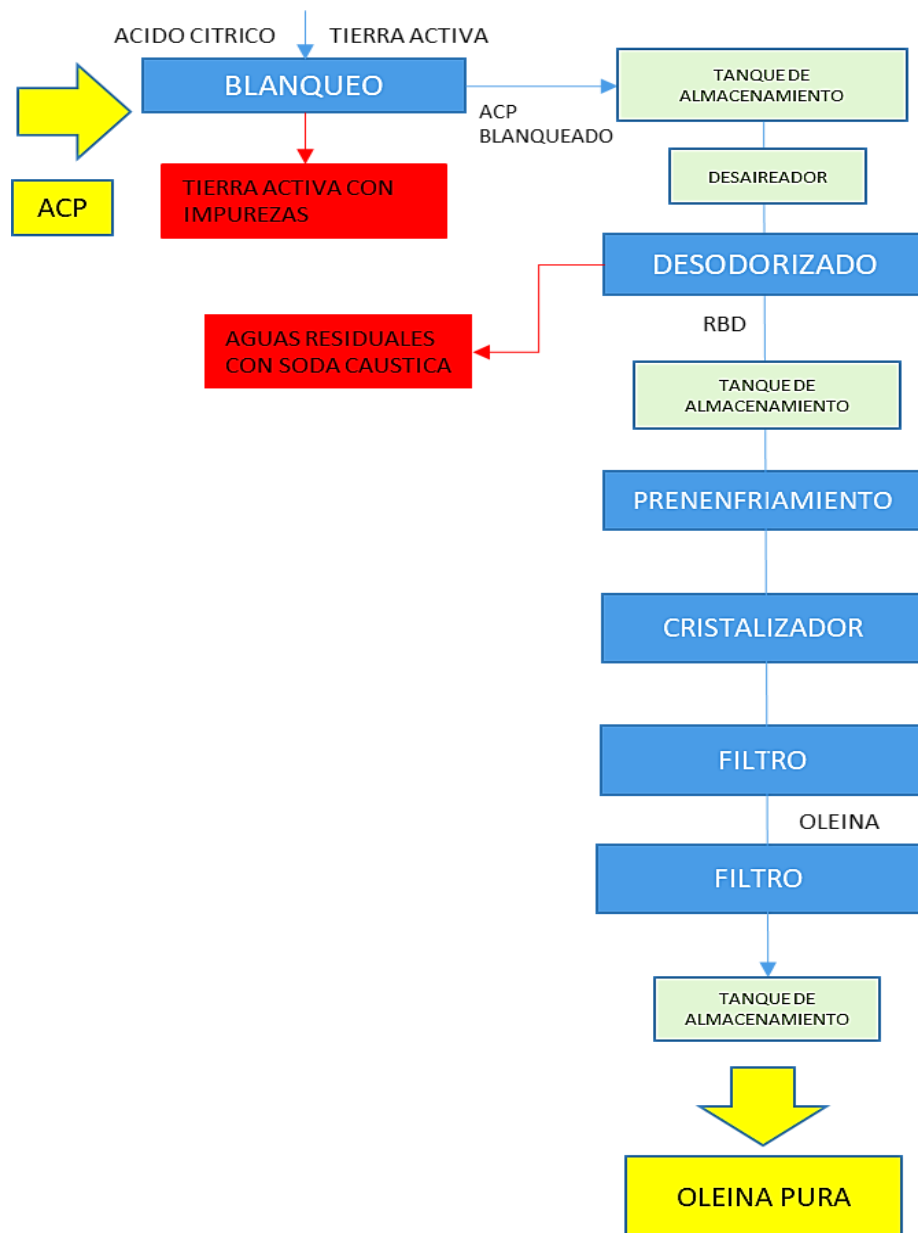
#### - **Filtrado N° 02 y dosificación**

El RBD va pasar la última filtrada, este filtro posee el filtro de manga, el cual tiene como finalidad que se remueva la totalidad de trazas de sólidos que haya en el producto.

Previo a que pase a su almacenamiento se dosifica con antioxidante, este antioxidante es agregado inmediatamente después del desodorizado, de manera que se asegure la adecuada conservación del aceite cuando se esté transportando y también al almacenarlas a este producto (Agropecuaria Rossel S.R.L., 2023).

#### - **Almacenamiento**

El RBD se envía al tanque de almacenamiento, aquí tiene que pasar los controles de calidad (análisis de laboratorio), y a este tanque se le mantiene a una temperatura de 60° Celsius, el tanque está elaborado de acero inoxidable resistente a la corrosión (Agropecuaria Rossel S.R.L., 2023).



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 5.** Proceso productivo de la Oleína de Palma Aceitera.

## 2.3. Emisiones industriales

### 2.3.1. Principales contaminantes atmosféricos

En la actualidad la actividad industrial ha ganado terreno, habiendo zonas industriales que se encuentran dentro de zonas urbanas y por consiguiente provocan la contaminación de la población aledaña; esta contaminación se da por diferentes gases y partículas que son emitidas por la combustión incompleta de las calderas, siendo que estas emisiones industriales modifican y/o alteran la composición natural del aire, y que perjudicialmente también estas emisiones

industriales ayudan en el incremento de la concentración de gases con efecto invernadero, estas emisiones están compuestas por los gases, también que contaminan la atmósfera dentro de los que se cita a los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), monóxidos de carbono (CO), plomo (Pb), compuestos orgánicos volátiles ( $\text{COV}_3$ ) y otros tipos de partículas (Santurtún; A.; 2014).

**a. Dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ )**

El  $\text{SO}_2$  se encuentra considerado entre uno de los mayores volumétricamente contaminantes en la atmósfera, provocando el agravio de problemas respiratorios y perjudicando a los vegetales, y de igual manera degrada la calidad de vida en los ambientes acuáticos y también malogra los materiales. El dióxido de azufre proviene en un 90% de las actividades antropogénicas (Santurtún; A 2014).

**b. Óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ )**

Este compuesto se genera por la combustión a altas temperaturas, y son generados de manera antrópica en su mayoría, donde normalmente el aire es el comburente; y el componente óxidos de nitrógeno NO, tienen efectos sobre la respiración de las personas, así como también tiene efecto sobre los vegetales en su composición ácida, y como oxidante de la contaminación foto – oxidante, que causa el deterioro de bosques (Santurtún; A 2014).

**c. Monóxidos de carbono (CO)**

El CO se produce mediante la incompleta combustión de los hidrocarburos, siendo natural que las personas estemos expuestos al CO en distintos niveles, pero llegar a inhalarlo en grandes cantidades podría ser mortal, sin que la persona afectada se dé cuenta; puesto que este compuesto es un gas no irritante, inodoro, insípido e incoloro. Este gas suele tener menos peso que el aire, razón por la cual suele acumularse dentro de las zonas altas de la atmósfera (Santurtún; A 2014).

**d. Partículas ( $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$ )**

El material particulado representa a las partículas sólidas o líquidas de cenizas, hollín, polvo, cemento y partículas metálicas; que se dispersan en la atmósfera, estas partículas varían en dimensiones de 2,5 a 10  $\mu\text{m}$ . Las fuentes que emiten estas partículas contaminantes pueden ser de tipo móviles o estacionarias; la exposición por largo tiempo periodo de tiempo al material particulado menor a

10  $\mu\text{m}$  provocan distintos efectos nocivos dentro del sistema respiratorio en las personas, pero, la exposición prolongada al material particulado menor a 2,5  $\mu\text{m}$ , provocan problemas respiratorios más severos, por lo mismo que estas partículas se introducen en el sistema respiratorio y atraviesan los alveolos pulmonares, por lo que se quedan retenidas entre las mucosas que se encuentran recubriendo las vías respiratorias superiores (Santurtún; A 2014).

#### **e. Compuestos orgánicos volátiles (COVs)**

Los compuestos orgánicos volátiles se componen por distintas sustancias químicas orgánicas; los efectos sobre la salud que estos COVs podrían causar son cancerígenos, irritantes, mutagénicos y tóxicos. Estos contaminantes tienen su procedencia en gran parte de las actividades industriales, aunque también son generadas por las actividades cotidianas como el uso de automóviles que funcionan con hidrocarburos, cocinas del hogar, puesto que, estas actividades generan emisiones y estas emisiones por su densidad se dirigen hacia la atmósfera.

Los COVs en combinación con los óxidos de nitrógeno pueden generar el smog, esta afectación al ambiente genera efectos negativos en la salud de la persona y el medio ambiente, en cuanto a la contaminación del agua superficial y el suelo, los COVs pueden terminar en las aguas subterráneas, por lo cual puede contaminar el agua potable (Santurtún; A 2014).

### **2.4. Fibra de escobajo**

La fibra de escobajo es uno de los subproductos que más se aprovechan en cada planta extractora de aceite, así como en la agricultura; en el sector industrial es aprovechada como combustible de las calderas y en sector agrícola brinda beneficios como abono orgánico a las diferentes plantaciones (Neyra, J; 2021).

### **2.5. Ceniza volante**

Las cenizas volantes son producidas por la combustión incompleta en las calderas de plantas industriales que utilizan como combustible a carbones, cascarillas y fibras de material orgánico; la ceniza volante es emitida por las chimeneas en conjunto con los gases de combustión que general las calderas para distintos procesos (Escobar, A; 2012).

## 2.6. Tipos de tratamientos atmosféricos industriales

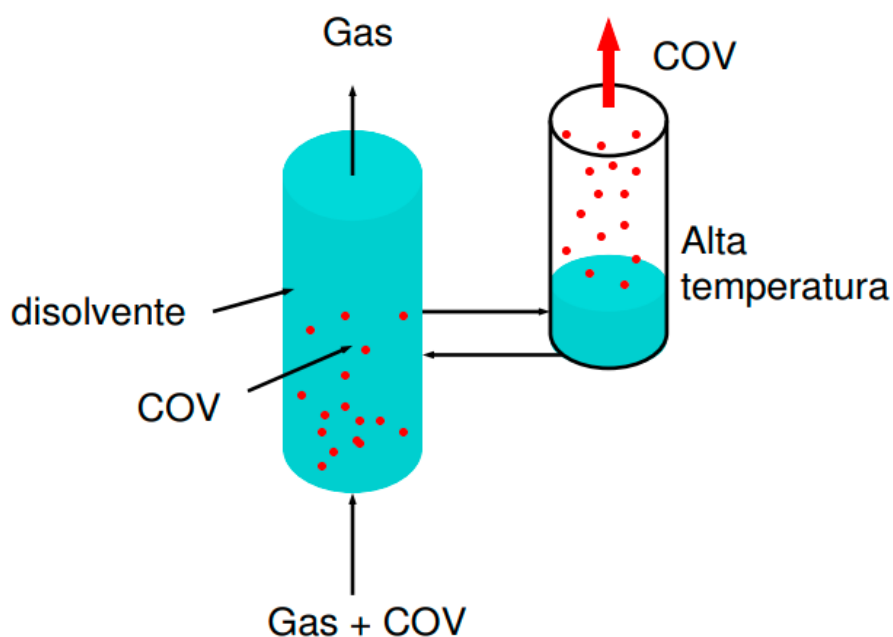
### 2.6.1. Sistemas de tratamiento correctores

#### A. Técnicas para eliminar gas contaminante

Cada sistema de tratamiento por eliminación de gas contaminante lleva consigo un procedimiento físico-químico, tales como la adsorción, absorción o también la combustión (Díaz, A; 2017).

##### - Procesos de absorción

Este proceso basa su funcionamiento en la absorción del gas contaminante por medio de un líquido donde los contaminantes se disuelven, este proceso no genera reacciones entre el contaminante y el líquido. Normalmente este sistema funciona en columnas de lavadores húmedos, donde se realiza la transferencia de materia (Díaz, A; 2017).



Fuente: Núñez (2014).

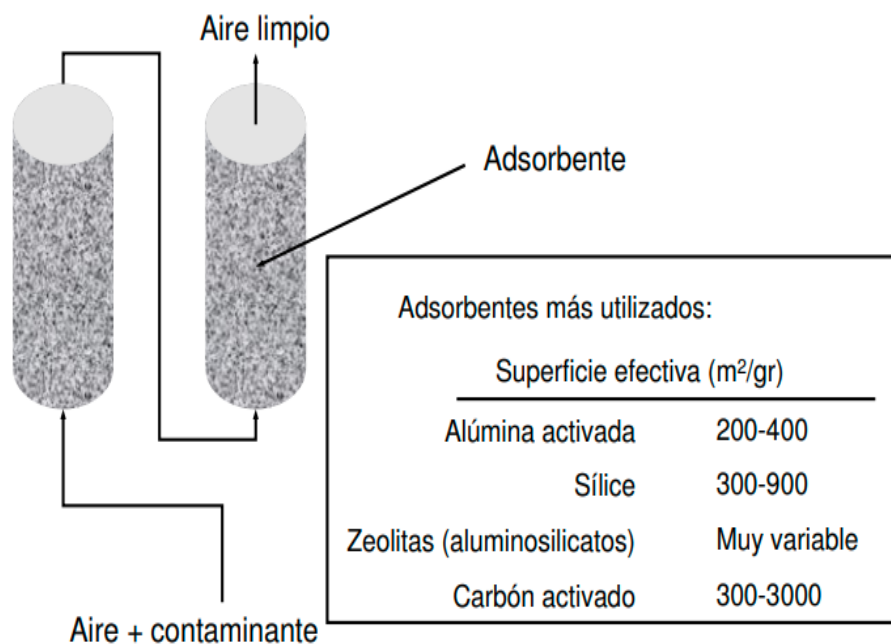
**Figura 6.** Proceso de absorción para eliminación de gases.

##### - Proceso de adsorción

Este proceso se da por la interacción directa de los gases contaminantes con un sólido, esta retención que se genera de los contaminantes (adsorbato) es por medio de reacciones químicas o fuerzas superficiales. Los sólidos que se utilizan más como superficies adsorbentes son las que presentan mayor relación

superficie/volumen, lo que facilita el contacto sólido – gas, entre los más recomendados y usados tenemos los tamices moleculares, bauxita, tierra de fuller, carbón activado, sílice, alúmina activada, zeolitas, entre otros.

El material adsorbente tiene que limpiarse, lavarse o activarse de manera periódica, con la finalidad de que no descienda su capacidad de adsorción (Díaz, A; 2017).



Fuente: Núñez (2014).

**Figura 7.** Proceso de adsorción para eliminación de partículas sólidas en emisiones.

#### - Proceso de combustión

Díaz, A. (2017). Este proceso constituye la eliminación de los gases contaminantes, así como también compuestos orgánicos, de manera que se puedan transformar en CO<sub>2</sub> y vapor de agua. La combustión se da de dos maneras:

**Esponánea:** Cuando se trata de eliminar gases tóxicos y que contengan olores fétidos, de manera que las combustiones se realizan a altas temperaturas y se controla el tiempo de retención, en este proceso el coste por los combustibles es altos.

**Proceso catalítico:** Con la finalidad de que no se gaste mucho en combustible, se realiza la combustión a temperaturas menores de lo que normalmente se maneja, de esta forma la combustión se realiza en presencia de un catalizador, generalmente por un metal de transición en un matriz de alúmina. Estas combustiones se

realizan para eliminar trazas de compuestos por contener azufre, fenol, formaldehídos, entre otros.

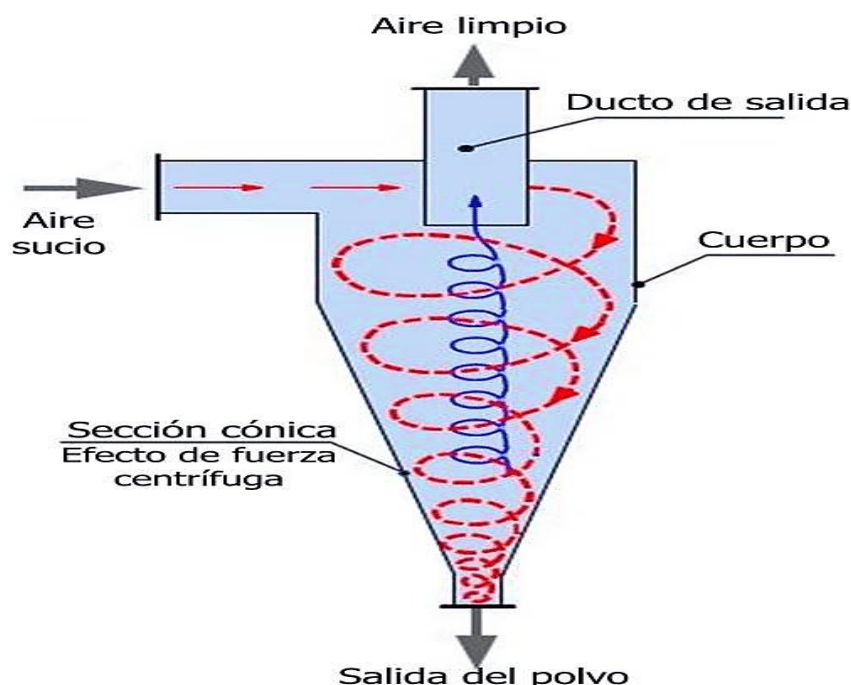
### B. Técnicas de captación de partículas

Díaz, A. (2017). El principio en el que se basan estos sistemas de tratamientos, se tienen los siguientes tratamientos:

#### - Ciclones o colectores de inercia

Los ciclones son equipos de separación inercial, y se utilizan generalmente para la captación de partículas; este equipo está formado por un recipiente cilíndrico vertical, donde por la parte superior se introduce el ducto de ingreso de los gases, este ducto se encuentra introducido en el ciclón de manera tangencial. Mediante la influencia de las fuerzas centrífugas, las partículas descienden de manera vertical, de manera que el gas al llegar al fondo del ciclón cambia su dirección y emerge por el conducto superior que se sitúa en el eje.

El ciclón tiene una eficiencia baja en comparación con otros sistemas de tratamiento, por lo que su costo es bajo; por lo general los ciclones son utilizados como complemento a un sistema de tratamiento de mayor eficiencia, siendo un pretratamiento (Díaz, A; 2017).



Fuente: Carpio y Reinoso (2014).

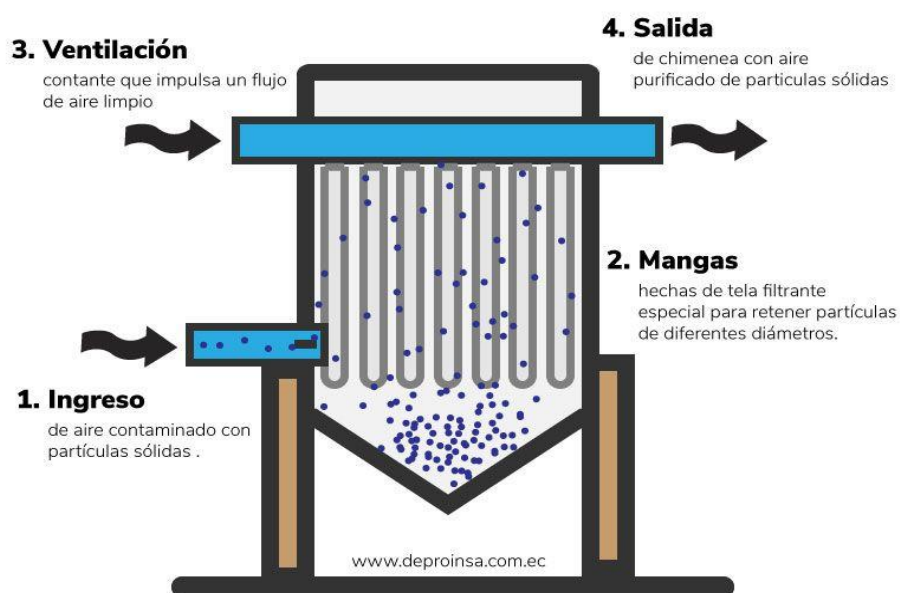
**Figura 8.** Proceso de recolección y atrapamiento de las partículas sólidas en un ciclón.

### - Filtro industrial

Este sistema de filtros tiene como principio dar el pase a los gases contaminantes y con alta concentración de partículas sólidas, a través de un medio poroso y el polvo pueda ser atrapado.

Los filtros con mayor aplicación son los filtros de mangas, que pueden llegar a tener una eficiencia de hasta el 99%, pudiendo retener partículas hasta de 0.01 micras.

Este sistema necesita de una limpieza periódica, ya que mientras mayor sea la retención de los flujos de gas, mayor será las partículas retenidas, por lo que el sistema tiene una pérdida de carga (Díaz, A; 2017).



Fuente: Díaz (2017).

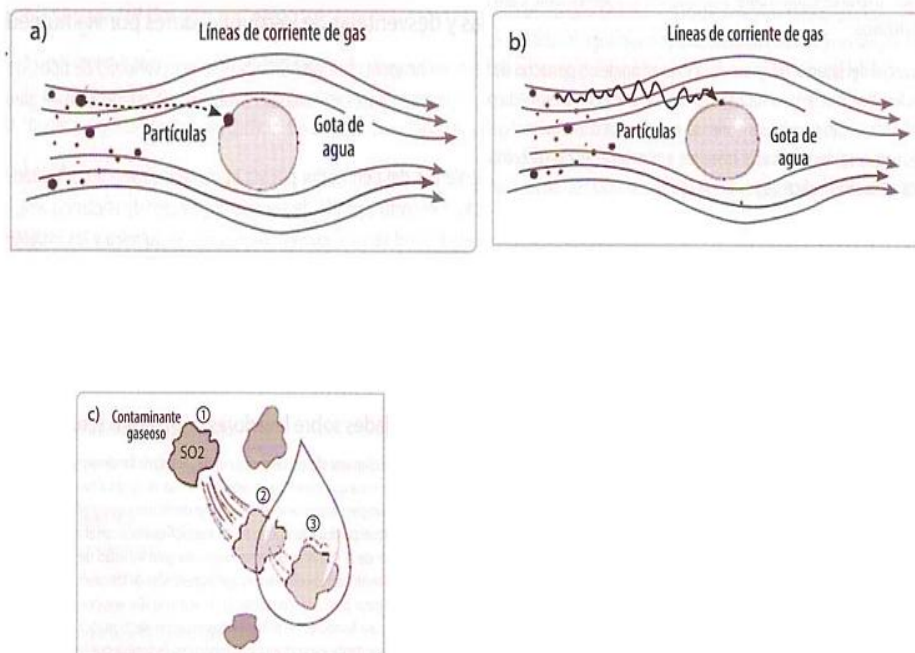
**Figura 9.** Partes y proceso de los filtros de mangas.

### 2.7. Tipos de lavadores de gases

Los Scrubber son sistemas que pueden eliminar gases solubles y/o partículas sólidas; la eliminación se realiza por dos maneras básicas, la absorción y la adsorción.

La absorción implica la mezcla de masa de manera fisicoquímica, en el caso de la absorción física, no se produce una reacción química, y una vez que el absorbente y el soluto se mezclen, pueden ser separados por alguna técnica de separación.

La absorción química es un método donde existe la reacción química dentro de la fase líquida; razón por la cual, la velocidad de absorción de un absorbente y un soluto se da de manera más rápida, también, la reacción química también implica que el proceso es irreversible (Díaz, A; 2017).

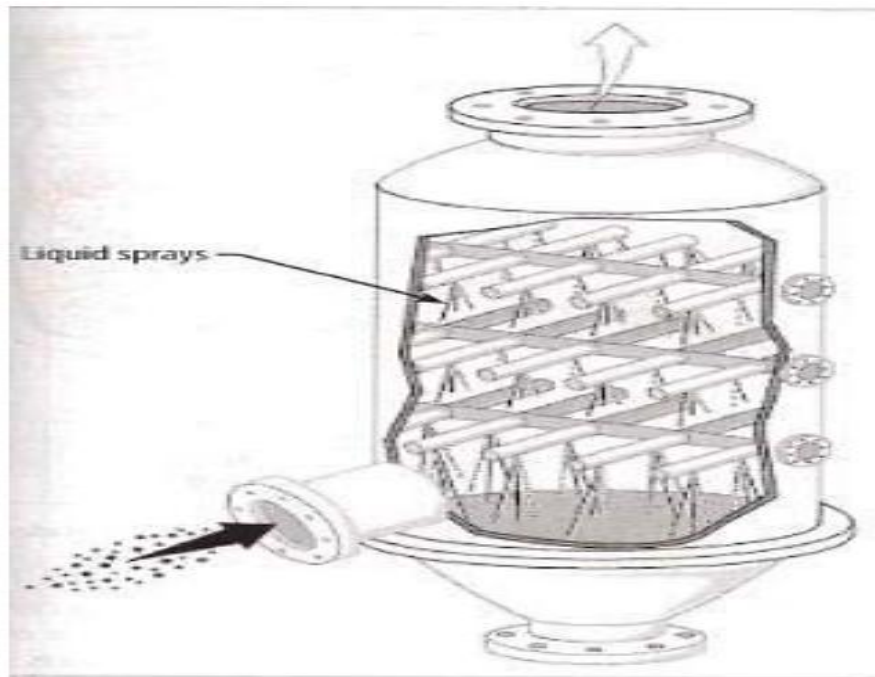


Fuente: Díaz (2017).

**Figura 10.** Maneras en las que las partículas y gases se absorben en el líquido absorbente o se adhieren en el líquido adsorbato.

### 2.7.1. Torres rociadoras

Las torres rociadoras es el tipo de Scrubber más simple, el método utilizado para eliminar los gases y/o partículas contaminantes es, por medio de boquillas se rocía el líquido absorbente, y en contra flujo chocan con los gases en ascenso, las gotas que salen de las boquillas deben tener tamaños entre 500 a 1000  $\mu\text{m}$  de diámetro. Este sistema funciona en óptimas condiciones y con una eficiencia de hasta el 90% si cumplen con los siguientes parámetros, debe tener una caída de presión de 1 pulgada de agua, y el tamaño de las partículas tienen que ser de entre 2 a 5  $\mu\text{m}$  (Díaz, A; 2017).



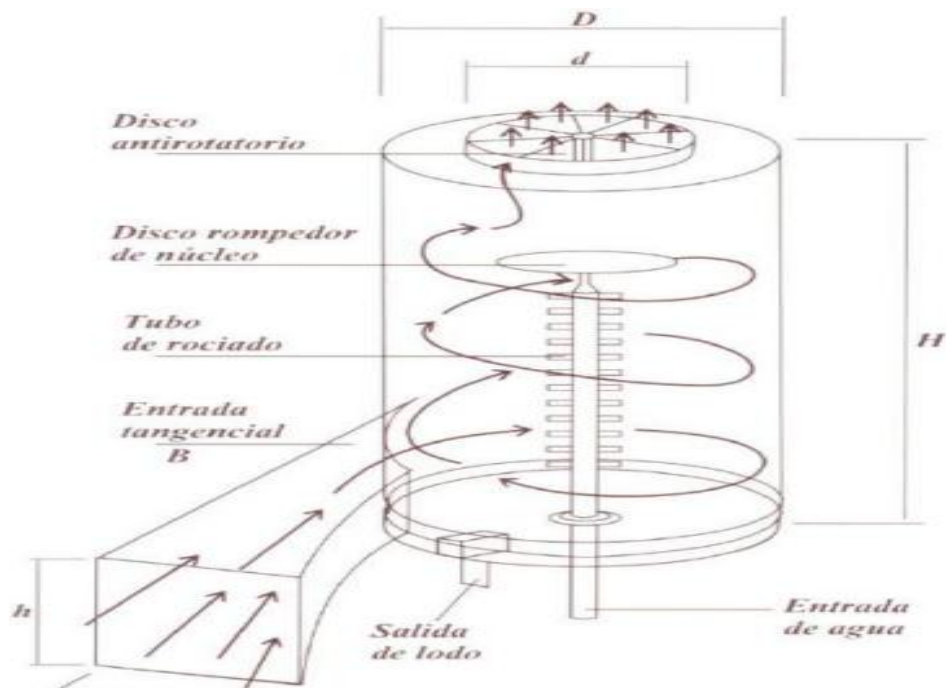
Fuente: Díaz (2017).

**Figura 11.** Funcionamiento y estructura de una torre rociadora.

### 2.7.2. Scrubber ciclónicos de rocío

El lavador ciclónico de rocío es frecuentemente utilizado en el sector industrial, este sistema se basa en la acción de absorción del agua con los gases que fluyen de manera ascendente; las gotas de agua son lanzadas mediante boquillas instaladas que apuntan en dirección vertical, por la acción del impacto las gotas se mezclan con las partículas, por acción de la fuerza centrífuga son acelerados hacia las paredes del Scrubber, realizándose la separación del gas contaminante.

Este sistema tiene una eficiencia alta, debido a que tiene 2 formas de aumentar el rendimiento de eliminación de contaminantes; las boquillas mojan directamente a las paredes, por lo que las paredes se encuentran húmedas, y las partículas al subir por la columna, serán atrapadas más fácilmente, y la otra, al aglomerarse las partículas y darle mayor peso y tamaño, hace más fácil la recolección (Díaz, A; 2017).

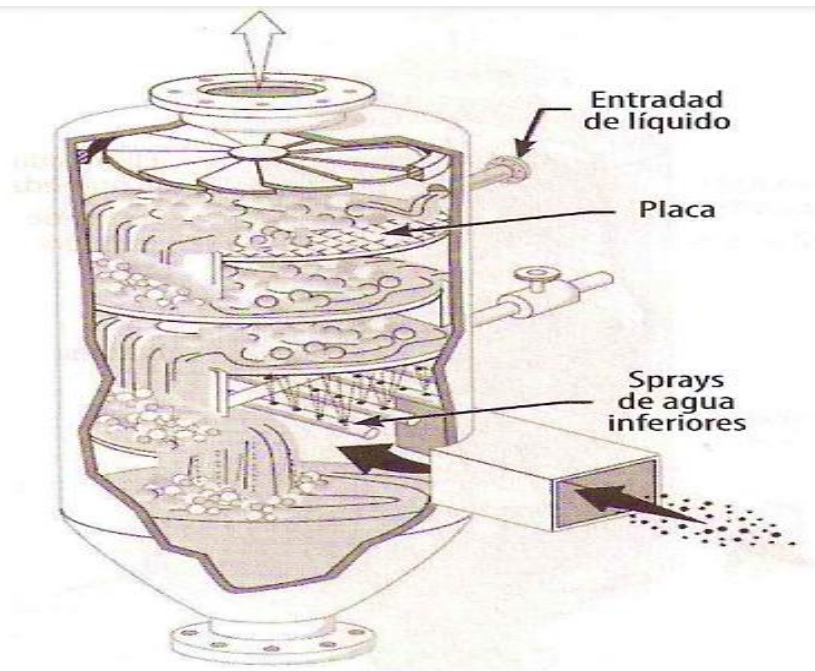


Fuente: Díaz (2017).

**Figura 12.** Partes y funcionamiento de un Scrubber ciclónico de rocío.

### 2.7.3. Scrubber por choque o de placas

El Scrubber de placas tiene un mecanismo que consiste en una plancha circular perforada que tiene entre 6.458 y 32.292 orificios/m<sup>2</sup>, y que a la vez estas placas sirven como deflectores; el gas suele ingresar a través de la parte inferior por la columna de lavado, y choca con los deflectores con orificios, estos orificios generan el paso de las gotas que absorben a las partículas contaminantes, y las partículas que no fueron atrapadas en la primera unidad de deflectores, chocarán con los platos y gravedad se desestabilizarán y caerán en el agua (Díaz, A; 2017).

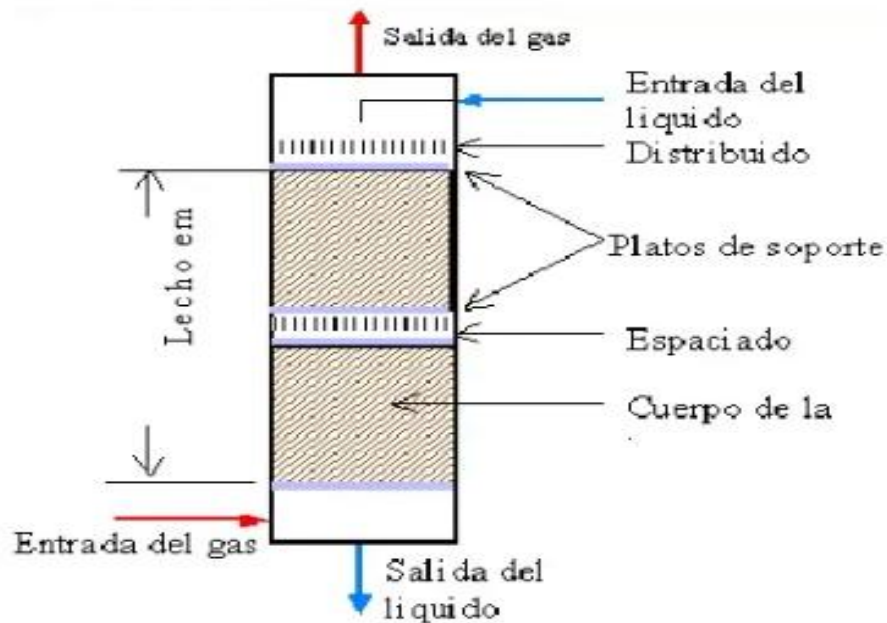


Fuente: Días (2017).

**Figura 13.** Partes y funcionamiento de un Scrubber de placas.

#### 2.7.4. Scrubber de lecho empacado

Los Scrubber de lecho empacado son torres de empacadas que se utilizan para el contacto de manera continua del líquido del gas; estas torres son columnas que se llenaron con empaques o dispositivos de superficie grande, que mediante boquillas grandes instaladas en la parte superior de la torre proporcionan agua al lado inferior del lecho, que opera en situación de rebosamiento, de manera que el líquido es distribuido sobre estas superficies y escurre hacia abajo; por medio del lecho empacado, este sistema es comúnmente utilizadas para que se destilen, absorber gas y extraer el líquido (Díaz, A; 2017).



Fuente: Díaz (2017).

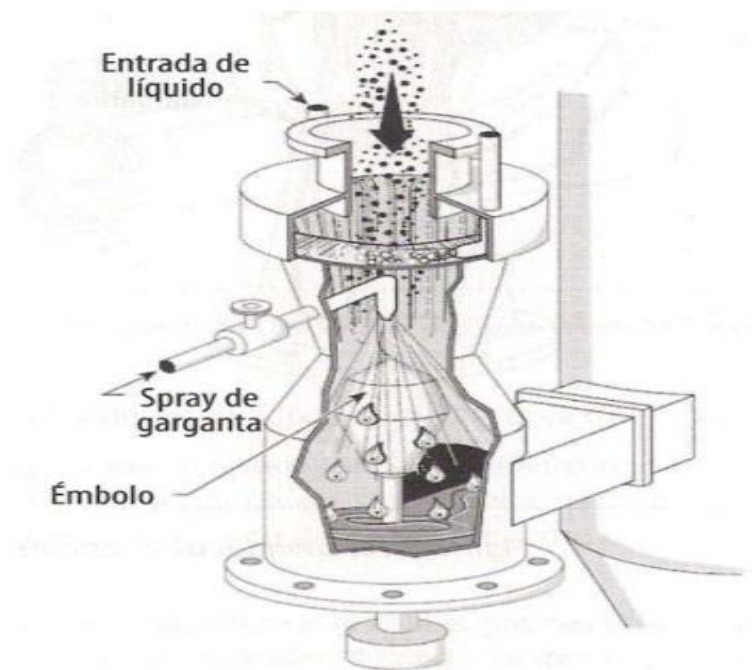
**Figura 14.** Partes y funcionamiento de un Scrubber de lecho empacado.

### 2.7.5. Scrubber Venturi

Los Scrubber Venturi están formados por tres secciones, una sección denominada convergente, una sección que actúa como una garganta y una sección divergente; el flujo de gas que ingresa al Scrubber entra a la sección convergente, y cuando el gas ascienda el área va disminuyendo, de manera que la velocidad del gas aumenta, el gas que ingresó es forzado a moverse a velocidades altas en la sección pequeña de la garganta y es aquí donde se producen una enorme cantidad de diminutas gotas.

Toda la eliminación de los gases o partículas contaminantes se genera en la sección de la garganta, posterior a esta sección los gases tienen un fuerte choque de velocidades, ya que pasando la sección de la garganta entra a la sección divergente, donde los gases se ven forzados a decelerar.

Los depuradores de Venturi tienen una eficiencia de hasta el 99%, por consiguiente son de los sistemas más utilizados en las industrias por su manejo de grandes volúmenes de entrada a altas temperaturas, es por ello por lo que son muy utilizados para reducir emisiones de partículas en todos los sectores industriales (Díaz, A; 2017).



Fuente: Díaz (2017).

**Figura 15.** Partes y funcionamiento de un Scrubber Venturi.

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Lugar de ejecución

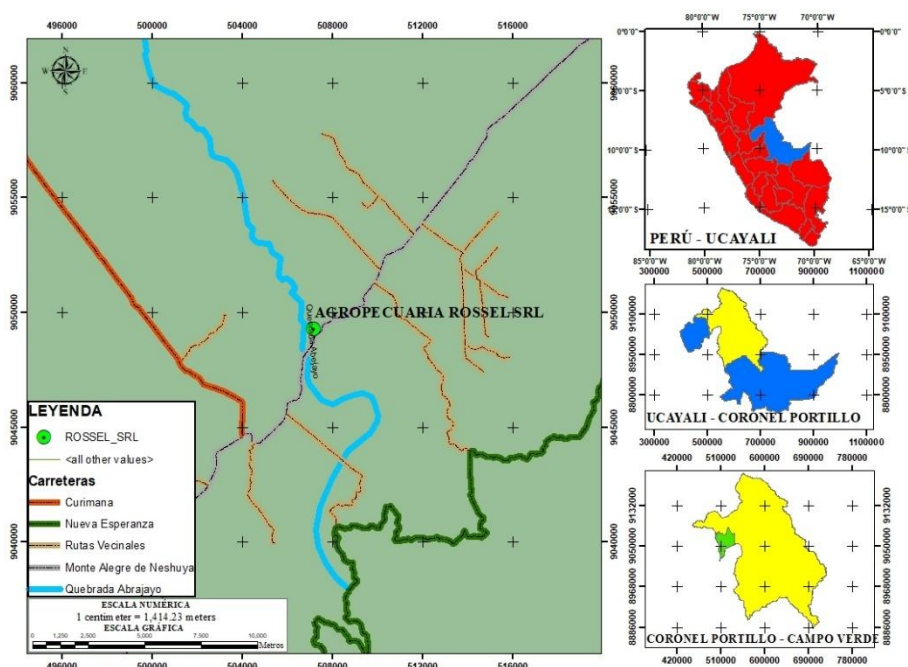
##### 3.1.1. Ubicación política

El presente trabajo de investigación fue ejecutado dentro de las instalaciones de la planta de refinería de la empresa agroindustrial Agropecuaria Rossel S.R.L., que se encuentra localizado en el kilómetro 54 de la carretera Federico Basadre, que pertenece políticamente:

- Distrito : Campo Verde
- Provincia : Coronel Portillo
- Región : Ucayali

##### 3.1.2. Ubicación geográfica

La empresa en donde se llevó a cabo el estudio se encuentra entre las coordenadas UTM 507176 Este, 9049295 Norte a 191 m.s.n.m.



**Figura 16.** Ubicación de la empresa agroindustrial Agropecuaria Rossel S.R.L.

### 3.1.3. Aspectos sociales y ambientales

#### - **Clima y meteorología**

De acuerdo con la estación del SENAMHI, nominada Las Palmeras, ubicada dentro del distrito de Campo Verde, viento presenta una velocidad máxima media igual a 1.5 m/s, predominando la dirección desde el Este. De acuerdo con la elaboración de SENAMHI basado en el método de Thornthwaite, se observa que la empresa está enmarcada dentro de la zona de clima cálido y lluvioso, distribuido la humedad durante todo el año; de igual manera, en base a la clasificación de Koppen, basada en las particularidades de temperatura, precipitación y humedad, la zona de estudio se encuentra en un clima de bosque húmedo tropical o selva tropical (SENAMHI, 2022).

#### - **Temperatura y humedad**

De acuerdo con la estación del SENAMHI, nominada Las Palmeras, ubicada en el distrito de Campo Verde, la máxima temperatura media es 31.49 °C, la mínima temperatura media es 21.6 °C; respecto a la humedad relativa mensual promedio es de 89.0 y la evaporación durante todo el año presenta una media de 929.4 mm/año (SENAMHI, 2022).

#### - **Actividades socioeconómicas**

**Población:** En base al reporte elaborado por el Censo Nacional de Población y Viviendas correspondiente al año 2017 por parte del INEI, la población estimada para la actualidad es 16 059 hab., donde un 40.07% se encuentra en la zona urbana y un 59.07% pertenece a la zona rural; asimismo, el 52.13% de la población son hombres y el 47.87% son mujeres (INEI, 2017).

**Establecimiento de salud:** El distrito de Campo Verde tiene distribuido 25 establecimientos de salud, todos registrados en la Red de Federico Basadre – Yarinacocha; por lo que, se cuenta con un centro de salud a 4500 metros de la zona de estudio (SENAMHI, 2022).

**Centros educativos:** De acuerdo con el Ministerio de Educación (2020), en el distrito de Campo Verde se tiene 137 instituciones educativas (entre inicial, primaria y secundaria), asimismo, el centro educativo más cercano a la zona de estudio está a 1600 metros.

**Servicios básicos:** En el distrito de Campo Verde un 42.29% de las casas tienen agua por medio de red pública, un 24.32% de las viviendas tienen agua a través de red pública fuera de su vivienda, un 21.29 % es abastecido por pozos subterráneos y el 6.5 % no cuentan con agua de procedencia segura (INEI, 2017).

Con respecto al acceso a energía eléctrica, menciona que el 72.40% cuentan con dicho servicio y el 27.60% con cuenta con el servicio de energía eléctrica (INEI, 2017).

**Aspectos económicos:** En el distrito de Campo Verde, la población económicamente activa representa el 78.3% de hab., en el caso de la población ocupada viene a representar el 97.8%; sobre el grado de pobreza, menciona que 2.30% son clasificados con nivel de pobres extremos, obteniendo un índice de desarrollo humano del 0.4362. Asimismo, como parte de sus principales actividades económicas se cuenta que dentro de la zona de estudio un 41.14% de las personas se dedican a ejercer trabajo no calificado y el 39.51% de los pobladores se dedican a los trabajos vinculados a la agricultura y pesquería (SENAMHI, 2022).

## **3.2. Materiales y métodos**

### **3.2.1. Materiales**

Para ejecutar el estudio se utilizó cuaderno de campo, folder, lápices, lapiceros, plumones indelebles, wincha métrica, escuadra, vernier, tiza, jarras de plástico de 500 ml para muestreo de efluentes, probetas de 1 L, matraz de 500 ml, papel filtro tamiz.

### **3.2.2. Equipos**

Se utilizó una computadora portátil, cámara Redmi 10 Note, termómetro digital para agua, balanza electrónica, estufa (para SST) y analizador de combustión de gases Testo 340.

### **3.2.3. Software**

Se utilizó los programas Arcgis, Autocad, Sketchup, Microsoft Word 2010, Microsoft Excel 2010 y Microsoft Power Point.

### 3.2.4. Metodología

#### 3.2.4.1. Determinación de los parámetros de operación del lavador de partículas

##### A. Instrumentos y técnicas de recolección de datos y confiabilidad

###### - Técnicas

Para la ejecución de la tesis, se aplicó dos técnicas para el trabajo de recolectar los datos de campo:

###### **Observación**

- Toma de datos en la planta de extracción, del caldero que fue la unidad de análisis en el estudio, así como también los datos de la presión de agua de alimentación, temperatura, presión de vapor y temperatura de gases de salida.
- El estado situacional de la caldera, el rendimiento a la que opera la caldera y la observación de la operación completa de la caldera.

###### **Análisis documental**

- Operación de la caldera y los mantenimientos históricos realizados a la caldera.
- Datos técnicos de fabricación, mantenimiento, repotenciamiento y/o mejoramiento de la caldera.

###### - Instrumentos

La toma de datos es muy importante para la investigación en curso, y en mayor relevancia esta toma de datos se toma en distintos momentos para que se analice la caldera, de manera que se utilizaron los siguientes instrumentos con la cual se realizó la recolección de datos en campo y sea de manera eficaz y sencilla:

###### **Guía de toma de datos**

**Gases de combustión de la caldera:** La guía de toma de datos estuvo conformada por dos partes:

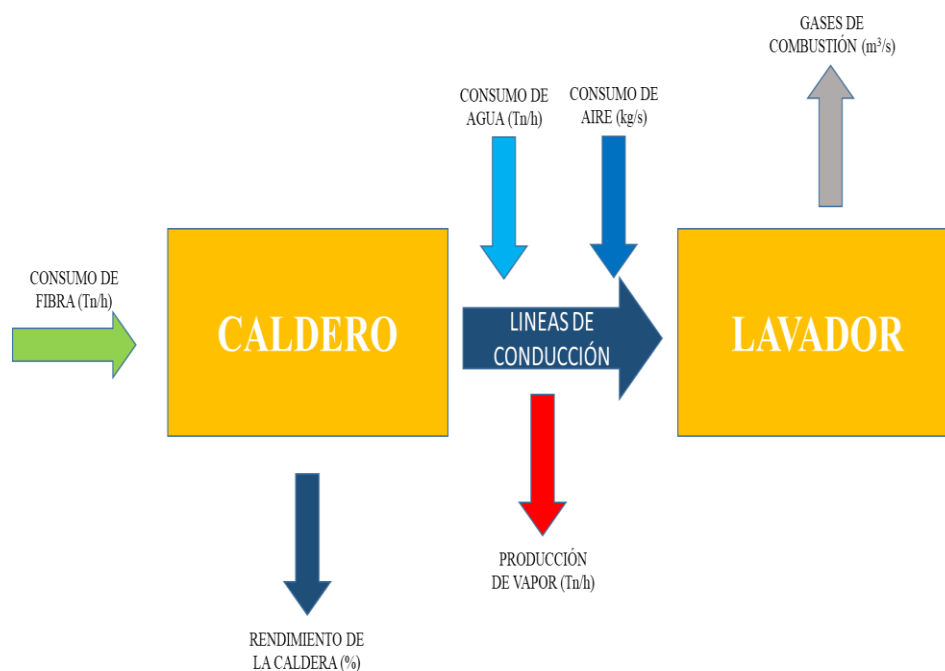
- Descripción de las características de la caldera y los datos generales.
- Reporte de la cantidad de material particulado contenido en los gases de combustión emitidos por la caldera.

**Estado operativo de la caldera:** La guía de toma de datos dió a conocer cada equipo que trabajan en conjunto con la caldera y en la situación actual en la que se encuentra la caldera.

### 3.2.4.2. Determinación de la estructura del lavador de partículas

#### A. Análisis energético de la caldera

Se realizó un esquema de las entradas y salidas que intervienen en el funcionamiento y operatividad del caldero.

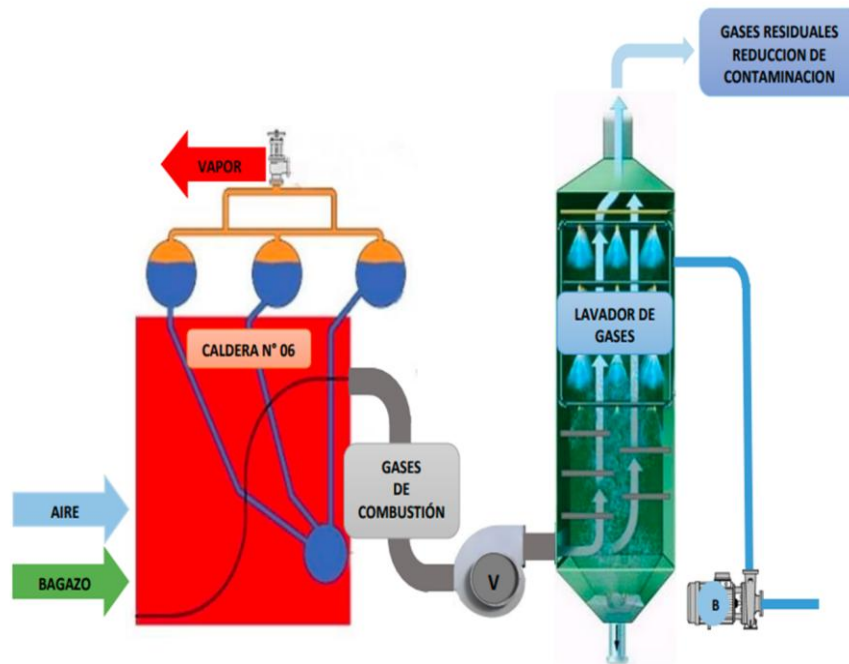


Fuente: Elaboración propia.

**Figura 17.** Esquema de entradas y salidas que intervienen en el sistema.

#### B. Diagrama del sistema de funcionamiento del lavador de partículas

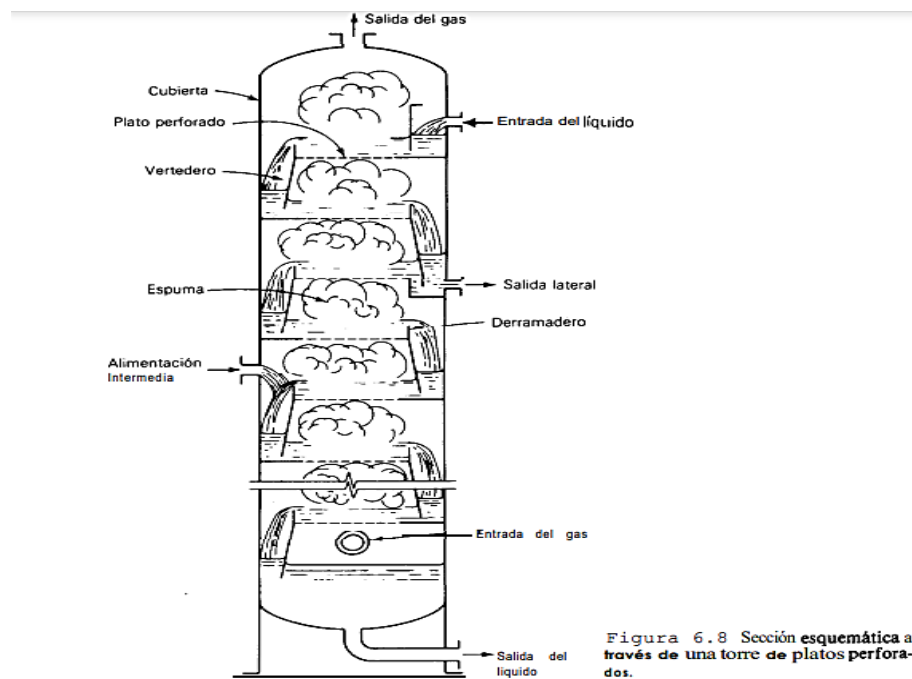
En este diagrama se representa el funcionamiento de las entradas, salidas, los flujos y los componentes del sistema desde caldero hasta el lavador de partículas, la finalidad de ello es identificar todos los componentes involucrados en el sistema, de manera que se pueda analizar las pérdidas, los esfuerzos y otros que se presentan en la operatividad del sistema.



Fuente: Pacherez (2019).

**Figura 18.** Diagrama del Sistema de funcionamiento del lavador de partículas.

### C. Diseño de la columna del lavador de partículas



**Figura 6.8** Sección esquemática a través de una torre de platos perforados.

Fuente: Treybal (2007).

**Figura 19.** Diseño de la columna del lavador de partículas.

## D. Cálculo de diámetro de la Torre

### - Diseño de los platos perforados de la torre:

Para el cálculo del diámetro de la torre, se utilizó las siguientes ecuaciones:

Primero se tuvo que hallar la constante de inundación  $C_F$ , para ello se determinan las constantes empíricas  $\alpha$  y  $\beta$ , que tienen que estar dentro del rango de 0.01 a 0.1.

Ecuación 1:

$$\frac{L'}{G'} * \left(\frac{\rho_G}{\rho_L}\right)^{0.5} = \frac{Q_L * \rho_L}{Q_G * \rho_G} * \left(\frac{\rho_G}{\rho_L}\right)^{0.5} = \frac{Q_L}{Q_G} * \left(\frac{\rho_L}{\rho_G}\right)^{0.5}$$

Donde:

$Q_L$  = Caudal del Líquido (solución absorbente), m<sup>3</sup>/s

$Q_G$  = Caudal del Flujo de Gas de Combustión, m<sup>3</sup>/s

$\rho_L$  = Densidad del Líquido (solución absorbente), Kg/m<sup>3</sup>

$\rho_G$  = Densidad del Flujo de Gas de Combustión, Kg/m<sup>3</sup>

Para la determinación de las constantes empíricas, se asume el espaciamiento entre los platos de acuerdo con el criterio de la tabla 6.1 (Treybal, R, 2007, p. 183), de manera que se aplica la ecuación 2.

Ecuación 2:

$$\alpha = 0.0744t + 0.01173$$

$$\beta = 0.0304t + 0.015$$

Donde:

$t$  = Espaciamiento entre los platos, m

$\alpha$  = Constante empírica

$\beta$  = Constante empírica

Luego de encontrar los valores de las constantes empíricas, se procedió a determinar el valor de la constante de inundación de la Ecuación 3, al determinar este valor podremos determinar la velocidad superficial del gas, y así calcular el diámetro de la torre del lavador.

Ecuación 3:

$$C_F = \left[ \alpha * \log \frac{1}{\frac{Q_L}{Q_G} * \left( \frac{\rho_L}{\rho_G} \right)^{0.5}} + \beta \right] * \left( \frac{\sigma}{0.020} \right)^{0.2}$$

Donde:

$C_F$  = Constante de inundación

$Q_L$  = Caudal del Líquido (solución absorbente), m<sup>3</sup>/s

$Q_G$  = Caudal del Flujo de Gas de Combustión, m<sup>3</sup>/s

$\rho_L$  = Densidad del líquido (solución absorbente), Kg/m<sup>3</sup>

$\rho_G$  = Densidad del Flujo de Gas de Combustión, Kg/m<sup>3</sup>

$\alpha$  = Constante empírica

$\beta$  = Constante empírica

$\sigma$  = Tensión superficial, N/m

Habiendo obtenido la constante de inundación  $C_F$ , se procedió a determinar la velocidad superficial del gas  $V_F$ , que en base a las densidades del líquido y el gas se calculó la velocidad.

Ecuación 4:

$$V_F = C_F * \left( \frac{\rho_L - \rho_G}{\rho_G} \right)^{1/2}$$

Donde:

$V_F$  = Velocidad superficial del gas, m/s

$C_F$  = Constante de inundación

$\rho_L$  = Densidad del Líquido (solución absorbente), Kg/m<sup>3</sup>

$\rho_G$  = Densidad del Flujo de Gas de Combustión, Kg/m<sup>3</sup>

Con el dato de la velocidad superficial del gas se determinó el área del vertedero, de manera que se calcule el diámetro (T) de la columna de lavado.

Ecuación 5:

$$A_n = \frac{Q_G}{V_F}$$

Donde:

$$A_n = \text{Área del vertedero, m}^2$$

$$Q_G = \text{Caudal del Flujo de Gas de Combustión, m}^3/\text{s}$$

$$V_F = \text{Velocidad superficial del gas, m/s}$$

De acuerdo con la tabla 6.1 (Treybal, R, 2007, p. 183), el área que utiliza el plato por un vertedero es un 8.8 %.

Ecuación 6:

$$A_e = \frac{A_n}{1 - 0.088}$$

Donde:

$$A_e = \text{Área efectiva del vertedero, m}^2$$

$$A_n = \text{Área del vertedero, m}^2$$

Con el área efectiva del vertedero, se procedió a determinar el diámetro de la torre de lavado del lavador de partículas.

Ecuación 7:

$$T = \sqrt{\frac{4 * A_e}{\pi}}$$

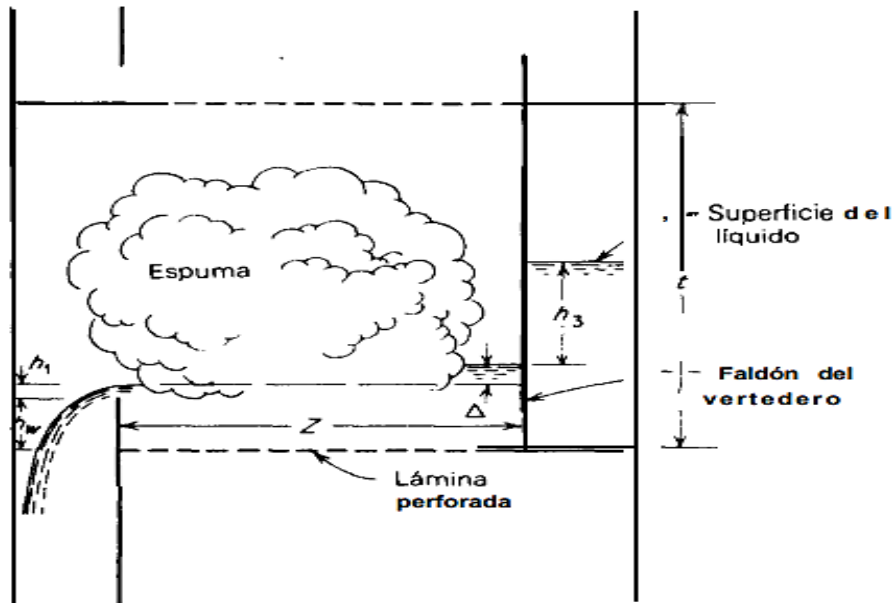
Donde:

$$T = \text{Diámetro de la torre, m}$$

$$A_e = \text{Área efectiva del vertedero, m}^2$$

#### - **Derramaderos de los platos:**

En el derramadero se forma la cresta del líquido, el cual se calculó mediante las siguientes ecuaciones:



Fuente: Treybal (2007).

**Figura 20.** Diagrama con esquema aplicado de un plato perforado de flujo transversal.

Tenemos la ecuación 8, la cual se transforma en la ecuación 9 de acuerdo con las variables que tenemos para el lavador de partículas, realizando así el cálculo de la altura del derramadero  $h_1$ .

Ecuación 8:

$$\frac{Q_L}{W_{eff}} = 1.839 * h_1^{3/2}$$

Donde:

$Q_L$  = Caudal del Líquido (solución absorbente),  $m^3/s$

$h_1$  = Cresta del líquido sobre el derramadero, m

$W_{eff}$  = Longitud efectiva del derramadero, m

Ordenando las variables, obtenemos la ecuación para la determinación de la altura del derramadero  $h_1$ , pero aún no tenemos el valor de  $\frac{W}{W_{eff}}$ , el cual hallaremos en la ecuación 10, y posterior podremos reemplazar en la ecuación 9 para poder determinar la altura del derramadero.

Ecuación 9:

$$h_1 = 0.666 * \left(\frac{Q_L}{W}\right)^{2/3} * \left(\frac{W}{W_{eff}}\right)^{2/3}$$

Donde:

$h_1$  = Cresta del líquido sobre el derramadero, m

$Q_L$  = Caudal del Líquido (solución absorbente), m<sup>3</sup>/s

$W_{eff}$  = Longitud efectiva del derramadero, m

$W$  = Longitud del derramadero, m

En la ecuación 10 podremos encontrar la longitud efectiva del derramadero, una vez encontrada, regresaremos a la ecuación 9, determinando así la altura del derramadero  $h_1$ .

Ecuación 10:

$$\left(\frac{W_{eff}}{W}\right)^2 = \left(\frac{T}{W}\right)^2 - \left\{ \left[ \left(\frac{T}{W}\right)^2 - 1 \right]^{0.5} + \frac{2 * h_1}{T} * \frac{T}{W} \right\}^2$$

Donde:

$W_{eff}$  = Longitud efectiva del derramadero, m

$W$  = Longitud del derramadero, m

$h_1$  = Cresta del líquido sobre el derramadero, m

$T$  = Diámetro de la torre, m

#### - **Caída de presión del gas:**

El total de las caídas de presión del gas se expresaron como cabezas de líquido, con la densidad del líquido sobre el plato.

Asimismo, la caída de presión para el gas  $h_G$  viene a ser la sumatoria de los efectos para el flujo constante del gas a través del plato seco y de los efectos que pueden causar por la presencia del líquido.

Ecuación 11:

$$h_G = h_D + h_L + h_R$$

Donde:

$h_G$  = Caída de presión total del gas, m

$h_D$  = Caída de presión en el plato seco, m

$h_L$  = Caída de presión resultante de la profundidad del líquido en el plato, m

$h_R$  = Caída de presión residual, m

Para la determinación de la caída de presión total del gas, es necesario realizar el cálculo de la caída de presión en el plato seco, para ello se utilizó la ecuación 12, donde ya se tienen la mayoría de los valores, a excepción del coeficiente de orificio, por lo cual este valor lo determinó en la ecuación 13.

Ecuación 12:

$$\frac{2 * h_D * g * \rho_L}{V_0^2 * \rho_G} = C_0 * \left[ 0.40 * \left( 1.25 - \frac{A_0}{A_n} \right) + \frac{4 * l * f}{d_0} + \left( 1 - \frac{A_0}{A_n} \right)^2 \right]$$

Donde:

$h_D$  = Caída de presión en el plato seco, m

$\rho_L$  = Densidad del Líquido (solución absorbente), kg/m<sup>3</sup>

$\rho_G$  = Densidad del Flujo de Gas de Combustión, kg/m<sup>3</sup>

$d_0$  = Diámetro de los orificios, m

$g$  = Gravedad, m/s<sup>2</sup>

$C_0$  = Coeficiente de orificio

$V_0$  = Velocidad en los orificios, m/s

$A_0$  = Área del orificio, m<sup>2</sup>

$A_n$  = Área del vertedero, m<sup>2</sup>

$l$  = Coeficiente de orificio del plato perforado, m

$f$  = Factor de fricción Fanning

Seguidamente se calculó el coeficiente de orificio, para así determinar el valor de la caída de presión del gas en el plato seco.

Ecuación 13:

$$C_0 = 1.09 * \left( \frac{d_0}{l} \right)^{0.25}$$

Donde:

$C_0$  = Coeficiente de orificio

$d_0$  = Diámetro de los orificios, m

$l$  = Coeficiente de orificio del plato perforado, m

Con ello se procedió a calcular el frente hidráulico, para ello tenemos la ecuación 14, la cual se realizó la transformación a la ecuación 15, ya que se cuenta con los valores del diámetro y la longitud de la torre de lavado.

Ecuación 14:

$$h_L = 6.10 * 10^{-3} + 0.725 * h_W - 0.238 * h_W * V_a * \rho_G^{0.5} + 1.225$$

En donde  $Z$  es el ancho del flujo promedio, que puede tomarse como:

$$(T + W)/2$$

O también la ecuación se puede trabajar de esta manera:

Con la ecuación transformada, se calculó el valor del frente hidráulico.

Ecuación 15:

$$h_L = 0.24 + 0.725 * h_W - 0.29 * h_W * V_a * \rho_G^{0.5} + 4.48 * \frac{Q_L}{Z}$$

Donde:

$h_L$  = Frente hidráulico o cabeza hidráulica, m

$h_W$  = Altura del derramadero, m

$V_a$  = Velocidad del líquido en el área activa, m/s

$\rho_G$  = Densidad del Flujo de Gas de Combustión, Kg/m<sup>3</sup>

$Q_L$  = Caudal del Líquido (solución absorbente), m<sup>3</sup>/s

$z$  = Ancho del flujo promedio, m

#### - Caída de presión del gas residual ( $h_R$ ):

Es el resultado de romper la tensión superficial cuando el gas atraviesa una perforación. Un balance de la fuerza interna en una burbuja estática que se requiere para vencer la tensión superficial.

Ecuación 16:

$$\frac{\pi * d_p^2}{4} * \Delta P_B = \pi * d_p * \sigma$$

Donde:

$\Delta P_B$  = Exceso de presión en la burbuja debido a la tensión superficial

La ecuación anterior también se puede manejar de la siguiente manera:

Ecuación 17:

$$\Delta P_B = \frac{4 * \sigma}{d_p}$$

Donde:

$\Delta P_B$  = Exceso de presión en la burbuja debido a la tensión superficial

La ecuación anterior también se puede manejar de la siguiente manera:

Ecuación 18:

$$\Delta P_R = \frac{6 * \sigma}{d_0}$$

Donde:

$\Delta P_R$  = Exceso de presión en la burbuja debido a la tensión superficial

Reemplazando en la ecuación principal:

Con la ecuación 19 se obtuvo el valor de la caída de presión residual del gas, el cual nos permitió determinar la caída de presión total del gas  $h_G$  de la ecuación 11.

Ecuación 19:

$$h_R = \frac{\Delta P_R * g_c}{\rho_L * g} = \frac{6 * \sigma * g_c}{\rho_L * d_0 * g}$$

Donde:

$h_R$  = Caída de presión residual, m

$\rho_L$  = Densidad del Líquido (solución absorbente), kg/m<sup>3</sup>

$g_c$  = Gravedad específica en el lavador, m/s<sup>2</sup>

$\sigma$  = Tensión superficial, N/m

$d_0$  = Diámetro de los orificios, m

$g$  = Gravedad, m/s<sup>2</sup>

- **Pérdida de presión en la entrada del líquido ( $h_2$ ):**

Es el paso del flujo del líquido debajo del vertedero, que cuando ingresa en el plato provoca una caída de presión que puede calcularse equivalente a tres veces las cabezas de velocidad.

Ecuación 20:

$$h_2 = \frac{3}{2 * g} \left( \frac{Q_L}{A_{da}} \right)^2$$

Donde:

$h_2$  = Pérdida de presión en la entrada del líquido, m

$Q_L$  = Caudal del Líquido (solución absorbente), m<sup>3</sup>/s

$A_{da}$  = Área libre entre el vertedero y el plato perforado, m<sup>2</sup>

$g$  = Gravedad, m/s<sup>2</sup>

Con la ecuación 21 se calculó la diferencia en el nivel del líquido dentro y fuera del vertedero; para ello fue necesario contar con la pérdida de presión en la entrada del líquido ( $h_2$ ) y la caída de presión total del gas ( $h_G$ ), para determinar  $h_3$ .

Ecuación 21:

$$h_3 = h_G + h_2$$

Donde:

$h_3$  = Diferencia en el nivel del líquido dentro e inmediatamente afuera del vertedero, m

$h_G$  = Caída de presión total del gas, m

$h_2$  = Pérdida de presión en la entrada del líquido, m

Para la verificación de los valores obtenido, se tiene que cumplir la siguiente relación:

$$h_W + h_1 + h_3 < \frac{t}{2}$$

Donde:

$h_w$  = Altura del derramadero, m

$h_1$  = Cresta del líquido sobre el derramadero, m

$h_3$  = Diferencia en el nivel del líquido dentro e inmediatamente afuera del vertedero, m

#### - Lloriqueo de los platos perforados

El lloriqueo es el goteo del líquido a través del plato perforado, si la velocidad del gas es muy pequeña, el lloriqueo será excesivo y no habrá un contacto directo entre el líquido y el gas, por lo cual malograría el tratamiento, por ello se determinó con la ecuación 22 la velocidad mínima del gas, de tal manera que el sistema no presente lloriqueo.

Ecuación 22:

$$\frac{V_{ow} * \mu_G}{\sigma * g_c} = 0.0229 * \left( \frac{\mu_G^2}{\sigma * g_c * \rho_G * d_0} * \frac{\rho_L}{\rho_G} \right)^{0.379} * \left( \frac{l}{d_0} \right)^{0.293} * \left( \frac{2 * A_a * d_0}{\sqrt{3} * P'^3} \right)^{2.8} / \left( \frac{z}{d_0} \right)$$

Donde:

$V_{ow}$  = Velocidad mínima del gas a través de los orificios, m/s

$g_c$  = Gravedad específica en el lavador, m/s<sup>2</sup>

$\sigma$  = Tensión superficial, N/m

$\rho_L$  = Densidad del Líquido (solución absorbente), Kg/m<sup>3</sup>

$\rho_G$  = Densidad del Flujo de Gas Combustión, Kg/m<sup>3</sup>

$d_0$  = Diámetro de los orificios, m

$l$  = Coeficiente de orificio del plato perforado, m

$A_a$  = Área para lámina perforada, m<sup>2</sup>

$P'$  = Distancia entre los orificios, m

$z$  = Ancho del flujo promedio, m

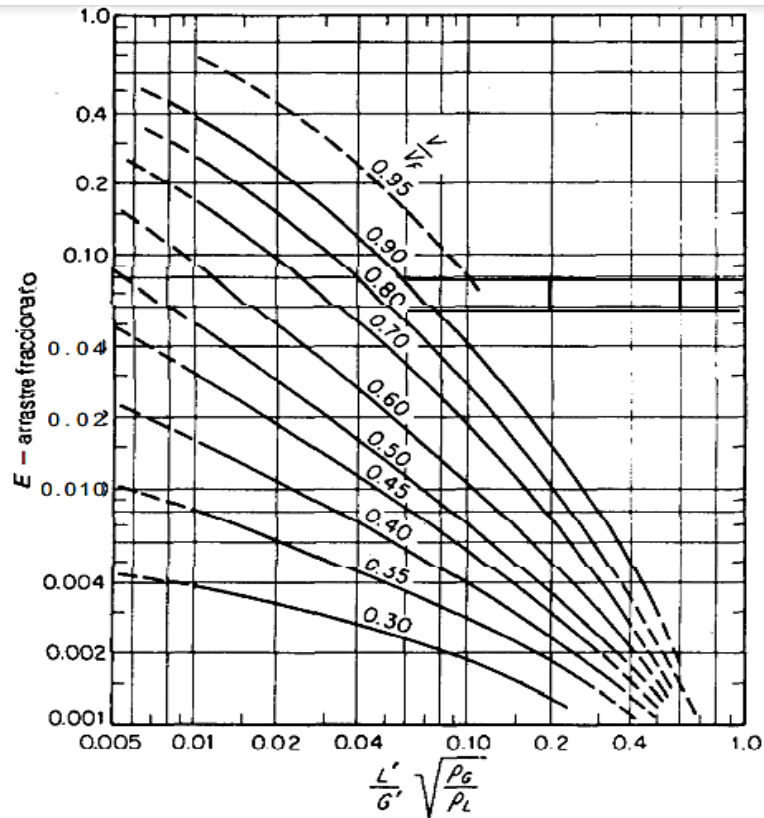
#### - Arrastre del líquido

El arrastre fraccional se determina para poder saber si la retroalimentación del líquido en el sistema modifica o no apreciablemente la hidráulica de los platos, para ello se cuenta con la ecuación 23.

Ecuación 23:

*Arrastre fraccional = E*

$$= \frac{\text{moles de líquido atrapado}}{\text{tiempo (área)}} + \frac{\text{moles del líquido arrastrado}}{\text{tiempo (brea)}}$$



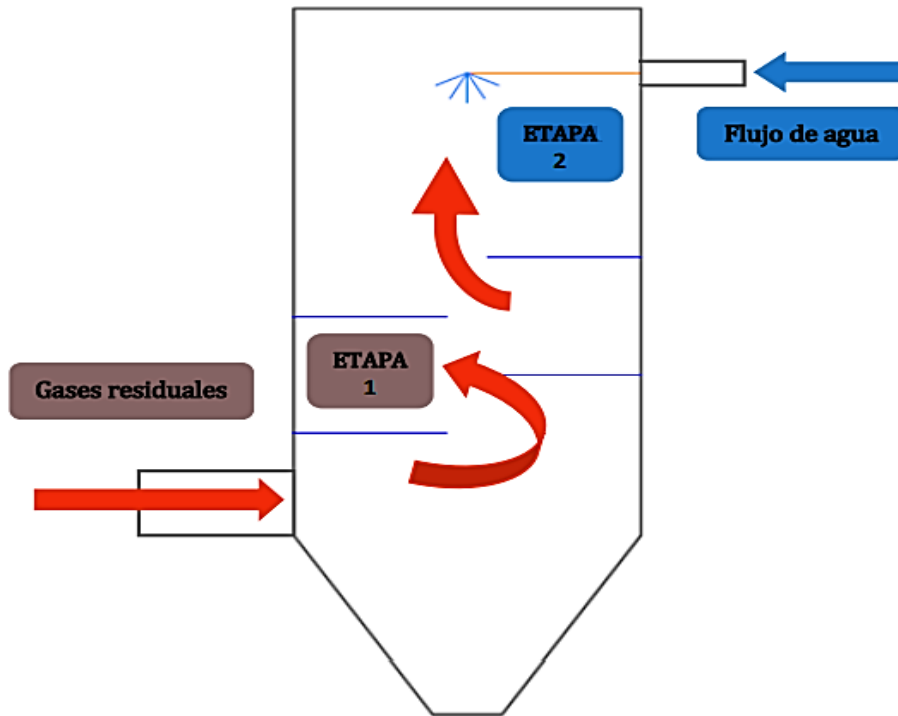
Fuente: Treybal (2007).

**Figura 21.** Arrastre, platos perforados.

## E. Cálculo de la altura de la torre

### - Etapas de proceso de condensación del lavador

Sabiendo que la eficiencia de recolección del lavador es: 80% de eficiencia, de manera que por cada etapa se condensará un 40% del flujo de los gases de combustión.



Fuente: Pacherez (2019).

**Figura 22.** Diagrama esquemático de condensación del lavador.

### Altura de la primera y segunda etapa del lavador

Seguidamente se calculó las velocidades de los gases en la etapa 1 y 2, con la finalidad de determinar las alturas de las 2 etapas en el lavador de partículas.

Ecuación 24:

$$V_{gas\ 1\ y\ 2} = \frac{Q_{mG} * 4}{\pi * T^2 * \rho_G}$$

Donde:

$V_{gas\ 1\ y\ 2}$  = Velocidad del gas en cada etapa, m/s

$Q_{mG}$  = Flujo másico de gases, Kg/s

$T$  = Diámetro de la torre, m

$\rho_G$  = Densidad del Flujo de Gas de Combustión, Kg/m<sup>3</sup>

Con la ecuación 25 se calculó las alturas de las etapas que se encuentran dentro del lavador de partículas, de manera que se obtuvo la altura total de la columna de lavado del sistema.

Ecuación 25:

$$H_{1 y 2} = V_{gas} * t$$

Donde:

$H_{1 y 2}$  = Altura de la primera y segunda etapa, m

$V_{gas}$  = Velocidad del gas en cada etapa, m

$t$  = Espaciamiento entre los platos, m

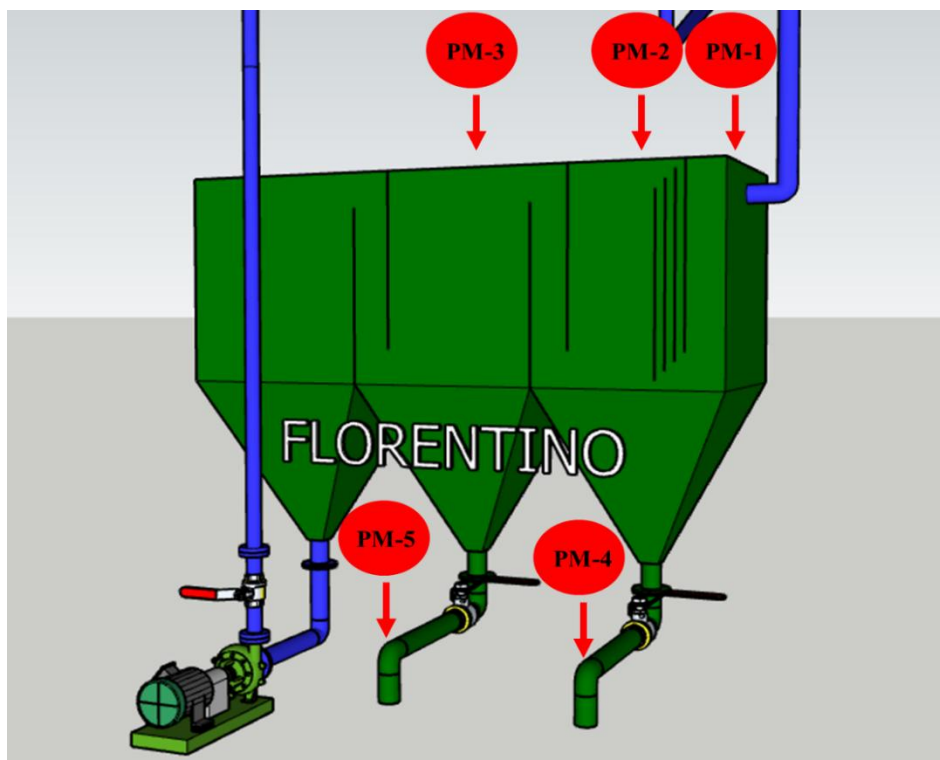
### **3.2.4.3. Caracterización de los materiales particulados del lavador de partículas PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>**

La caracterización de los efluentes del lavador de partículas se realizó en el laboratorio de calidad de refinería, para lo cual realizamos los siguientes pasos:

#### **a. Planificación de la toma de muestras**

En este punto se tomó en cuenta lo siguiente; la elección del punto de muestreo, la frecuencia y los periodos de muestreo y el material para la toma de muestras.

- Punto de muestreo: Para la elección de los puntos de muestreo se tomó de referencia el “Protocolo de monitoreo de calidad de los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales”, aprobado mediante Resolución Directoral N° 273-2013-VIVIENDA, en la que nos especifica la cantidad de muestras que se requiere, tomando los criterios del protocolo obtenemos que se contará con 5 puntos de muestreo.



**Figura 23.** Muestreo de efluentes del lavador de partículas.

El primer punto (PM-1), se ubicó a 0.25 metros del ingreso del ducto de efluentes del lavador de partículas hacia el florentino, el segundo punto (PM-2) se ubicó en la misma recta vertical de la salida de efluentes (purga) del punto PM-4, y el tercer punto se ubicó en la misma recta vertical de la salida de efluentes (purga) que el punto PM-5, de manera referencial se realizaron estos puntos de muestreo como nos indica el protocolo.

Estos puntos de muestreo fueron tomados del sistema de la siguiente manera; el sistema de lavador de partículas cuenta con una salida de efluentes que va hacia el florentino (sistema de recuperación del agua para la recirculación), siendo este el primer punto de muestreo, este punto es donde se combinan las aguas que son la solución captadora del sistema con las cenizas y material particulado emitido por el caldero, una vez el agua capture el material particulado y las cenizas, pasa a ser un efluente, que es dirigido al florentino, siendo estos los siguientes 2 puntos de muestreo, los florentinos son los encargados de sedimentar el material particulado y recircular el agua al sistema, finalmente los florentinos se purgan de manera intercalada cada 3 horas para evitar obstrucciones, con ello tenemos los últimos 2 puntos de muestreo, a la salida de cada florentino.

- Frecuencia y Periodo: Cada muestreo fue tomado 3 veces por día cada 3 horas de intervalo entre cada muestra, por un periodo de 1 semana, con ello poder obtener con más exactitud las cantidades promedio de los efluentes en cada punto de muestreo.

Material para la toma de muestra: El material propuesto son jarras de plástico para muestreo de 15 onzas cada jarra, para ello cada jarra se limpió y desinfectó para la toma de cada muestra, para así evitar la contaminación de cada muestra.

#### **b. Toma de muestras**

En este punto se tomó en cuenta; el tipo de muestra (simple, compuesta o integrado), y el volumen de la toma de muestra.

La toma de muestra fue de tipo compuesta siendo la que dio con mayor exactitud el estado de los efluentes de cada punto de muestreo, para ello se realizó muestras en cada punto ya identificado, pero en diferentes periodos de tiempo.

Se realizó muestreos en jarras de 500 mL, estas jarras fueron llevadas al laboratorio de calidad donde se procedió a filtrar las muestras en Filtros de Papeles Cualitativos Grado 642 de 125 mm que tiene retención de hasta 2.0  $\mu\text{m}$ .

Se tomó en total 4 muestras antes de las pruebas operativas con el lavador de partículas; posterior a la instalación completa del lavador, se tomaron 20 muestras en diferentes días, estas muestras fueron tomadas en las pruebas operativas y en el proceso de producción.

#### **c. Parámetros por determinar**

En este punto se tomó en cuenta lo siguiente; los parámetros físicos.

Para la determinación de los parámetros a ser medidos en cada punto de monitoreo se tuvo en consideración el “Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM que aprueba los Límites máximos permisibles para los efluentes de plantas de tratamiento de agua residuales domesticas o municipales”.

Para la presente investigación se determinaron los siguientes parámetros:

- Temperatura
- Sólidos totales en suspensión

Cabe recalcar que solo se tomaron en consideración los siguientes parámetros en concordancia con la investigación de la presente tesis.

#### d. Métodos de análisis

En este punto se tomó en cuenta lo siguiente, la medición de la temperatura de la muestra, y los análisis de los sólidos suspendidos totales por el método de evaporación en filtros tamiz.

La medición de la temperatura se hizo en campo, para ello se utilizó la “Tabla 1” como registro de toma de muestra, cabe recalcar que la presente tabla fue tomada de referencia del Anexo N° IV del Protocolo de Monitoreo de la Calidad de los efluentes de las plantas de tratamientos de las aguas residuales domesticas o municipales.

**Tabla 1.** Registro de datos de campo.

<b>Nombre del Sistema:</b>			
<b>Denominación del punto de muestreo:</b>			
Punto de muestreo	Este:	Norte:	Lugar:
Fecha	Hora		Temperatura
Eventuales observaciones del punto de muestreo:			
Características del efluente:			

Fuente: Elaboración propia.

#### 3.2.4.4. Calcular la eficiencia del lavador de partículas de emisiones atmosféricas

Para la determinación de la eficiencia del lavador de partículas se analizó los monitoreos realizados antes de la implementación del sistema con el monitoreo realizado posterior a la implementación del sistema.

Ecuación 27:

$$E\% = \frac{\text{Concentración de entrada}_{PM} - \text{Concentración de salida}_{PM}}{\text{Concentración de entrada}_{PM}} * 100$$

### **3.3. Tipo y diseño de investigación**

#### **3.3.1. Diseño de investigación**

La investigación es aplicada, considerando que el propósito de la investigación es la reducción de la concentración de material particulado emitidos por la caldera acuotubular EMI-01-ROSSEL, se utilizará conocimientos previos adquiridos en la formación académica para determinar la estructura del lavador de partículas. Así como también se considera la investigación descriptiva ya que se medirá la eficiencia del lavador de partículas.

#### **3.3.2. Variables del estudio**

##### **Variable independiente**

- Lavador de partículas Scrubber

##### **Variable dependiente**

- Reducción de emisiones de Material Particulado  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ .

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Determinación de los parámetros de operación del lavador de partículas

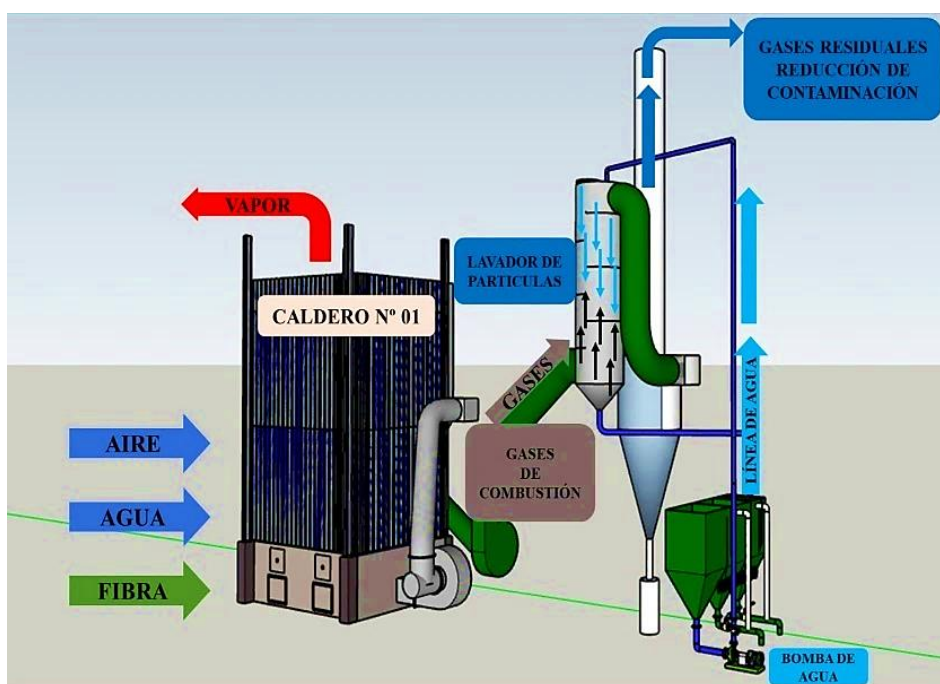
#### 4.1.1. Parámetros para el diseño del lavador

Para el diseño del lavador de partículas se tuvo en cuenta los siguientes parámetros y criterios analizados para la investigación.

**Tabla 2.** Parámetros para el diseño del lavador.

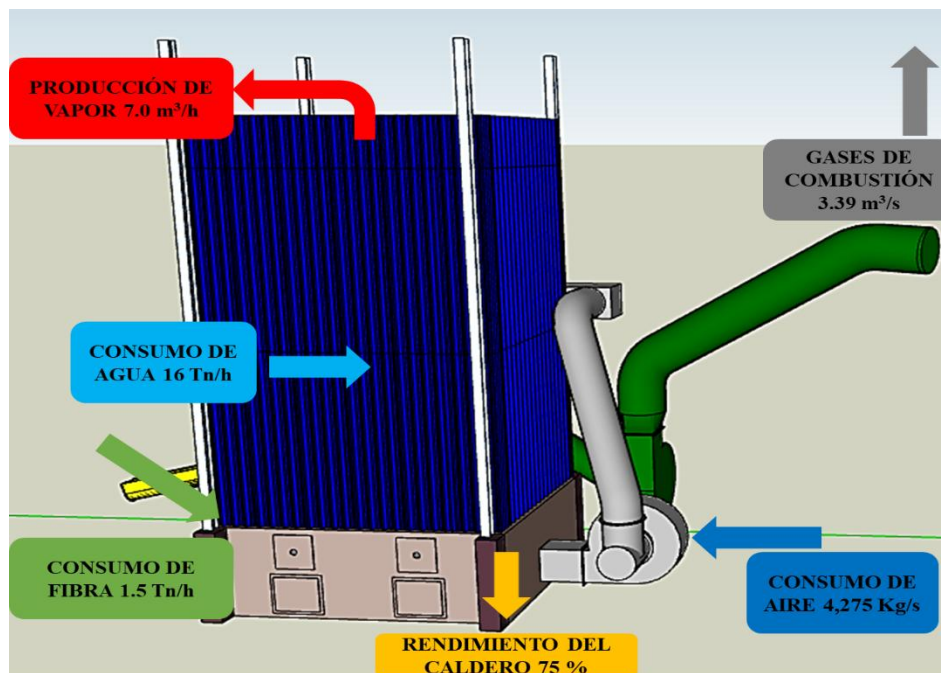
Parámetros de Operación	Datos
Modelo (Caldera)	Acuotubular
Año de fabricación (Lavador)	2024
Capacidad	7 m <sup>3</sup> /hora Vapor
Combustible (kg fibra/hora)	1500
Humedad de combustible	5 - 10 % Humedad
Presión	12 Bar – 14 Bar máximo
T° de agua en el caldero	105 °C
T° de sobrecalentamiento	370 °C

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 24.** Fuentes de generación de material particulado.

- **Análisis energético del caldero**



**Figura 25.** Análisis energético del caldero.

## 4.2. Determinación de la estructura del lavador de partículas

### 4.2.1. Cálculo y diseño del Lavador de partículas

Para el cálculo de la estructura de la torre de lavado se elaboró un sistema de cálculos en el programa Microsoft Excel, en estos cálculos se aplicaron las fórmulas descritas en la metodología, este programa tiene como finalidad de que los cálculos sean automatizados y se puedan diseñar lavadores de partículas de diferentes dimensiones de acuerdo con la realidad del proceso.

**Tabla 3.** Estructura del lavador de partículas.

CÁLCULO Y DISEÑO DEL LAVADOR DE PARTÍCULAS			
DATOS GENERALES			
PARÁMETRO	UNIDAD	EXPRESIÓN	VALOR
Caudal de Gas de Combustión	m <sup>3</sup> /s	Q <sub>G</sub>	3.39
Densidad del Gas de Combustión	kg/m <sup>3</sup>	ρ <sub>G</sub>	2.10
Caudal de la Solución Captadora	m <sup>3</sup> /s	Q <sub>L</sub>	0.0083
Densidad de la Solución Captadora	kg/m <sup>3</sup>	ρ <sub>L</sub>	997.00

Potencia de la bomba de recirculación de la solución captadora	HP		2.00
--	----	--	------

---

**PLATOS PERFORADOS DE LA TORRE DE LAVADO**

---

Distancia entre los centros de los orificios	m	P'	0.012
Espesor de la hoja metálica de los platos	m		0.002
Diámetro de los orificios de los platos	m	d <sub>0</sub>	0.0045

---

**DIÁMETRO DE LA TORRE DE LAVADO**

---

Espaciamiento entre los platos	m	t	0.60
Constante de Inundación del Lavador entre los platos		C <sub>F</sub>	0.1029
Velocidad de Inundación entre los platos	m/s	V <sub>F</sub>	1.7924
Área del vertedero de los platos perforados	m <sup>2</sup>	A <sub>i</sub>	2.0738
Diámetro de la Torre de Lavado	m	T	1.60
Longitud del Derramadero de los platos perforados	m	W	1.1375
Altura del derramadero	m	h <sub>w</sub>	0.05

---

**CAÍDA DE PRESIÓN EN LA TORRE DE LAVADO**

---

Número de Reynolds	Flujo Turbulento		13519.145
Área del orificio de los platos perforados	m <sup>2</sup>	A <sub>0</sub>	0.1896
Velocidad en el orificio de los platos perforados	m/s	V <sub>0</sub>	17.8825
Presión en seco de la Torre de Lavado	m	h <sub>D</sub>	0.036
Frente Hidráulico de la Torre de Lavado	m	h <sub>L</sub>	0.0778
Caída de Presión Residual de la Torre de Lavado	m	h <sub>R</sub>	0.0055
Caída de Presión Total del Gas en la Torre de Lavado	m	h <sub>G</sub>	0.1192

---

**ALTURA DE LA TORRE DE LAVADO**

---

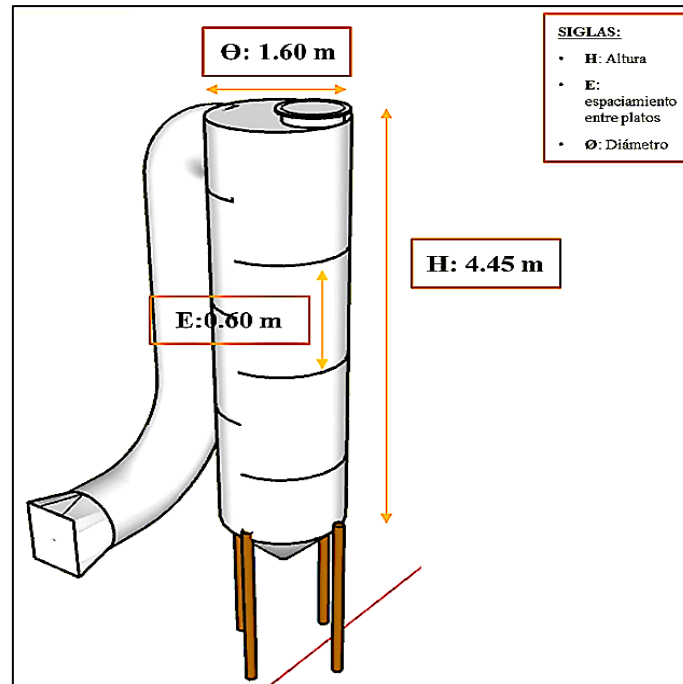
Velocidad del Gas en la Primera Etapa	m/s	V <sub>Gas1</sub>	0.6539
Tiempo del Gas en la Primera Etapa	s	t <sub>1</sub>	5.90
Velocidad del Gas en la Segunda Etapa	m/s	V <sub>Gas2</sub>	0.3269
Tiempo del Gas en la Segunda Etapa	s	t <sub>2</sub>	1.80
Altura de la Primera Etapa	m	H <sub>1</sub>	3.86
Altura de la Segunda Etapa	m	H <sub>2</sub>	0.59
Altura Total de la Torre de Lavado	m	H	4.45

---

Fuente: Elaboración propia.

Se menciona que el material metálico con el que se realizó la construcción del lavador de partículas fue de planchas lisas de acero al carbono de  $\frac{1}{4}$  de pulgada, por ser un material resistente a las altas temperaturas.

En el anexo, se muestran los pasos de los cálculos para el diseño del lavador de partícula PM10 y PM2.5.



**Figura 26.** Estructura del lavador de partículas.

#### 4.3. Caracterización del material particulado del lavador de partículas PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>

Después de filtrar las muestras se obtuvieron resultados, donde se puede apreciar que existe presencia de material particulado tanto 2,5 y de 10  $\mu\text{m}$  (Figura 27).



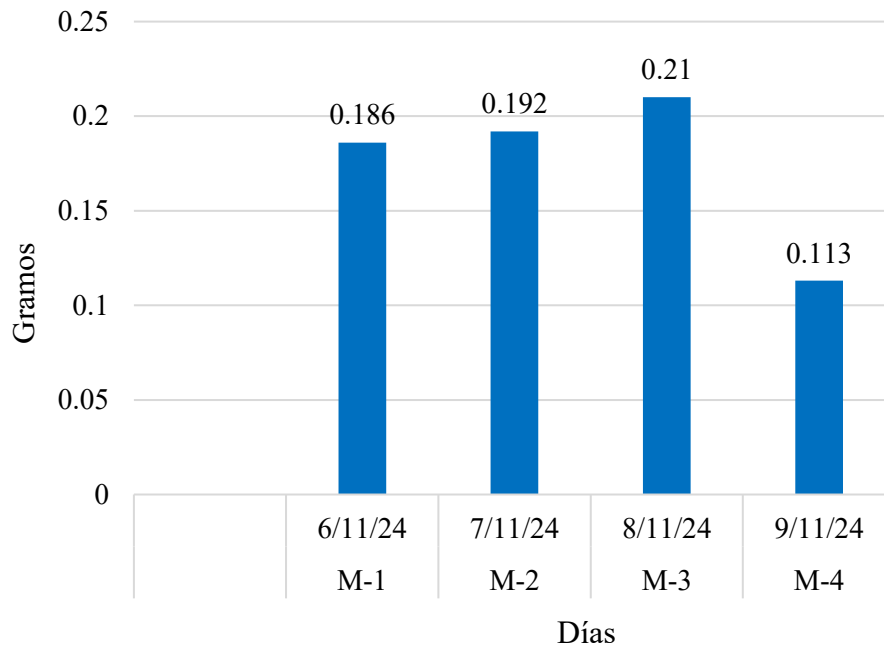
**Figura 27.** Material particulado hasta  $2.0 \mu\text{m}$  (incluye las partículas de  $2,5$  y  $10 \mu\text{m}$ ).

Como se muestra en la Tabla 4, los pesos de material particulado retenidos que se obtuvieron sin la instalación del lavador de partículas fueron casi nulos, haciendo notar que no había sistema de tratamiento antes de la implementación del lavador de partículas. Además, estas muestras nos ayudan a conocer cuánto en peso puede retener el sistema de tratamiento atmosférico implementado.

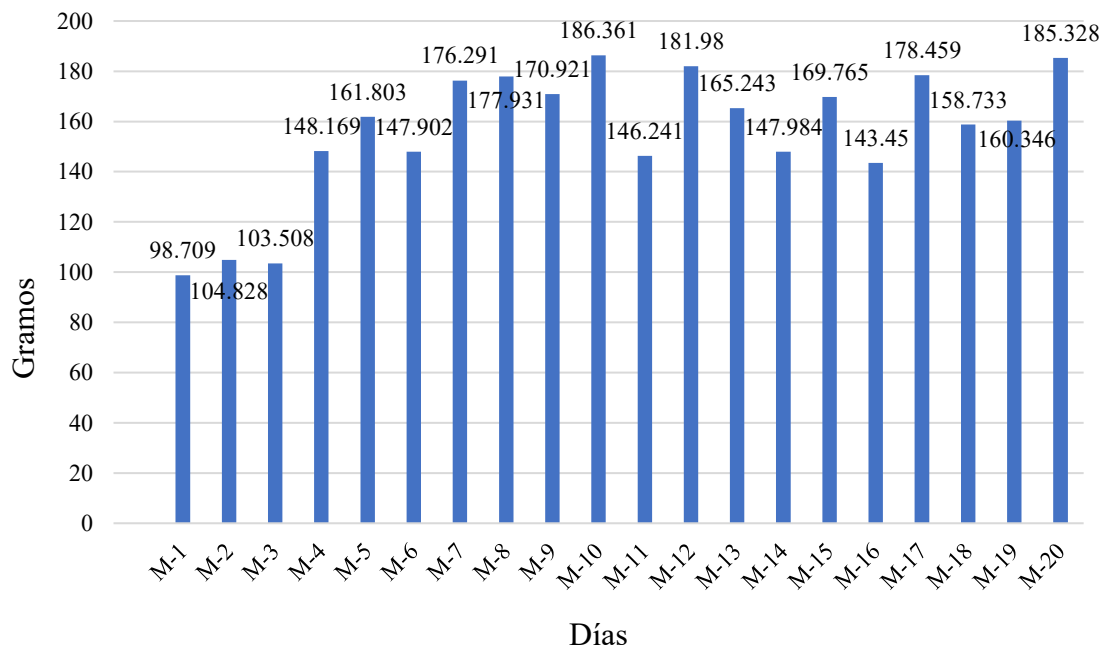
**Tabla 4.** Determinación de pesos retenidos sin el lavador de partículas en funcionamiento.

MUESTRA	FECHA	PUNTOS DE MUESTREO					PESO TOTAL PM <sub>10</sub> Y PM <sub>2.5</sub> (gr)
		PM-1 (gr)	PM-2 (gr)	PM-3 (gr)	PM-4 (gr)	PM-5 (gr)	
M-1	06/11/2024	0.052	0.015	0.016	0.085	0.018	0.186
M-2	07/11/2024	0.054	0.061	0.017	0.042	0.018	0.192
M-3	08/11/2024	0.041	0.051	0.042	0.064	0.012	0.210
M-4	09/11/2024	0.039	0.018	0.017	0.023	0.016	0.113

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 28.** Peso retenido total sin el lavador de partículas en funcionamiento



**Figura 29.** Determinación de pesos de material particulado retenido por el lavador de partículas

Como se muestra en la figura 29, con el sistema de tratamiento atmosférico ya implementado, los primeros 3 días (14/11/2024, 15/11/2024 y 16/11/2024) no se obtuvieron pesos altos de material particulado retenido, esto fue porque el sistema se encontraba en pruebas operativas hasta que se encuentre el punto de equilibrio de todos sus parámetros. Posterior a las pruebas operativas, se nota la diferencia de que el lavador de partículas retenía una mayor cantidad de material particulado, lo que hace notar que el sistema ya se encontraba operando con una mayor eficiencia. Estas muestras sacadas y analizadas fueron uno de los indicadores del funcionamiento correcto del lavador de partículas, y que operativamente se tiene que realizar de manera semanal por los operadores para saber si la eficiencia se sigue manteniendo. Los operadores tienen como guía al valor mínimo de 143.450 gramos del día 28/12/2024 (M-16), este peso es el mínimo que el lavador de partículas debe de retener para que la operación esté correcta.

#### **4.4. Cálculo de la eficiencia de lavador de partículas de emisiones atmosféricas**

La eficiencia del lavador de partículas se pudo determinar en base al monitoreo de emisiones gaseosas que se ejecutaron para las chimeneas de la planta.

Los gases que se monitorearon y que son aplicables para la empresa son los siguientes:

- Material particulado ( $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ )
- Óxido de Nitrógeno ( $NO_x$ )
- Dióxido de Azufre ( $SO_2$ )
- Monóxido de Carbono (CO)

Como línea base se tiene al monitoreo ambiental que se realizó en agosto del 2020, donde las chimeneas no tenían sistemas de tratamiento atmosférico, y las emisiones sobrepasaban los LMP aplicados para la empresa, como se muestra a continuación para EMI-01-ROSSEL (Tabla N° 5):

**Tabla 5.** Resultados de monitoreo de emisiones gaseosas de agosto del 2020.

ESTACIONES DE MONITOREO	EMI-03-ROSSEL	EMI-02-ROSSEL	EMI-01-ROSSEL	Norma de Referencia	Límite Permissible	Conclusiones	
Parámetro	Unidad	Resultados					
Material Particulado	mg/m <sup>3</sup>	452.48	722.19	816.81	R.M. N° 315-EM/VMM	150 (*)	No Conforme
Dióxido de Azufre	mg/m <sup>3</sup>	<2.86	<2.86	4105.6	IFC/BM <sup>(1)</sup>	2000	* EMI-03-ROSSEL, EMI-02-ROSSEL: Conforme * EMI-01-ROSSEL: No Conforme
Óxidos de Nitrógeno	mg/m <sup>3</sup>	27.62	29.72	5.07	IFC/BM <sup>(1)</sup>	460	Conforme
Monóxido de Carbono	mg/m <sup>3</sup>	1675.28	780.08	>12 500	Decreto N° 638/1995 (Venezuela) <sup>(2)</sup>	1150 ppm (1317 mg/m <sup>3</sup> )	* EMI-02-ROSSEL: Conforme * EMI-01-ROSSEL, EMI-03-ROSSEL: No conforme

(1) IFC/BM Corporación de Finanzas Internacionales del Banco Mundial. General Environmental Guidelines (30-04-2007)

(2) Normas sobre calidad del Aire y Control de la Contaminación Atmosféricas D. N° 638 (26 de enero de 1995)

(\*) RM N°102-2010-PRODUCE. Guía de Buenas Prácticas para Ladrilleras Artesanales

En diciembre del 2024 se ejecutó el monitoreo ambiental, donde se realizó el monitoreo de emisiones gaseosas de las chimeneas de la empresa, donde los valores no sobrepasan para la chimenea donde se implementó el lavador de partículas EMI-01 (Tabla N° 6).

**Tabla 6.** Resultados de la medición de emisiones gaseosas de la estación EMI-01 del año 2024.

PARÁMETROS	UNIDAD	FECHA	Nº MEDICIÓN	HORA	CONCENTRACIÓN	PROMEDIO	LMP
Material particulado	mg/Nm <sub>3</sub>	22/11/24	1º medición	16:30	51.29	<b>129.03</b>	150 <sup>(1)</sup>
			2º medición	17:50	196.7		
			3º medición	19:10	139.2		
Óxido de nitrógeno (NOX)	mg/Nm <sub>3</sub>	22/11/24	1º medición	17:30	421.7	<b>427.2</b>	650 <sup>(1)</sup>
			2º medición	17:46	432.2		
			3º medición	18:02	427.7		
Dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> )	mg/Nm <sub>3</sub>	22/11/24	1º medición	17:30	<9.0	<b>&lt;9.0</b>	2000 <sup>(1)</sup>
			2º medición	17:46	<9.0		
			3º medición	18:02	<9.0		
Monóxido de carbono (CO)	mg/Nm <sub>3</sub>	22/11/24	1º medición	17:30	1149	<b>1148.33</b>	1150 <sup>(2)</sup>
			2º medición	17:46	1148		
			3º medición	18:02	1148		

<sup>(1)</sup> IFC/BM Corporación de Finanzas Internacional del Banco Mundial. General Environmental Guidelines del 2007.

<sup>(2)</sup> Normas Sobre Calidad del Aire y Control de la Contaminación Atmosférica D. N° 638 (26 de abril de 1995).

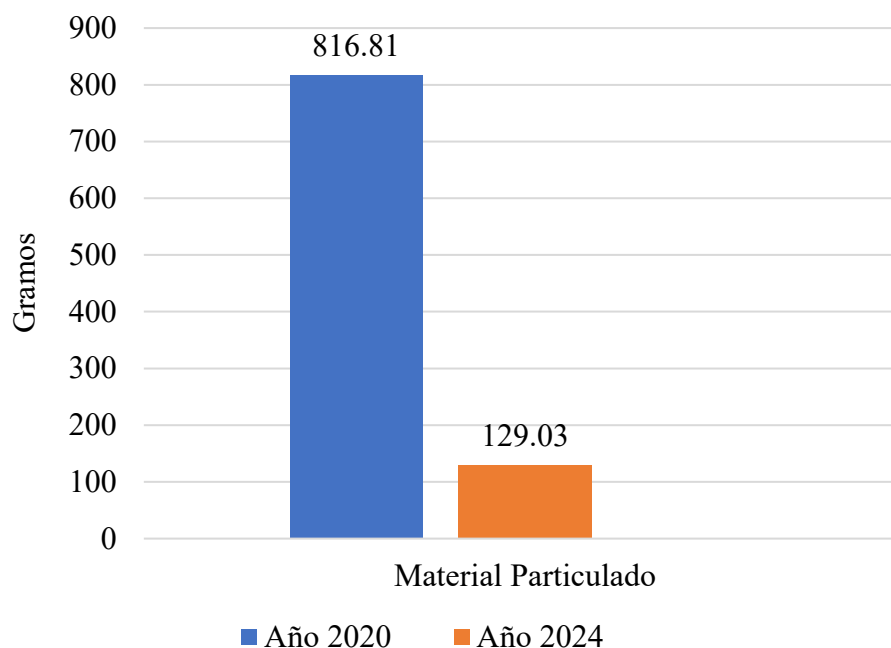
Teniendo los resultados de la estación EMI-01, que corresponde a la chimenea donde se realizó la implementación del lavador de partículas, se calcula la eficiencia del sistema.

$$E\% = \frac{816.81 - 129.03}{816.81} * 100$$

$$E = 84.2\%$$

El lavador de partículas implementado en la estación EMI-01 tiene una eficiencia del 84.2 %, siendo esto una eficiencia alta para la mitigación y retención de material particulado.

Como se observa en la figura 30, las emisiones de material particulado en el año 2020 fueron mayor al año 2024, esto se debe a que no se contaba con la implementación de un lavador de partículas.



**Figura 30.** Emisiones de material particulado año 2020 y 2024.

#### 4.5. Parámetros de operación del lavador de partículas

Como parámetros de operación hemos obtenido los datos técnicos de la caldera, como son, la capacidad, el combustible, la presión a la que trabaja la caldera, la temperatura del agua en la caldera, su temperatura de sobrecalentamiento y el consumo de combustible que necesita la caldera, de acuerdo a estos datos podemos evaluar el funcionamiento correcto de la caldera con la implementación del lavador de partículas, puesto que el sistema de tratamiento trabaja con agua, esto genera una presión distinta al aire, por la densidad que tiene, por lo tanto el sistema de la caldera tiene que adecuarse a las nuevas condiciones pero con los parámetros de operación dentro de sus rangos de operación; de igual manera Pacherez, O (2019), utilizó como parámetros de operación y funcionamiento a la capacidad de la caldera, la presión, el combustible, el consumo de combustible, las temperaturas de calentamiento y sobrecalentamiento, de esta manera pudo evaluar cómo el sistema de tratamiento que implementó modificaba los parámetros de operación, teniendo que realizar pruebas hasta llegar a los rangos de los parámetros de operación.

#### 4.6. Determinar de la estructura del lavador de partículas

Flores y Apaza (2022), comprobaron en su investigación que los valores de caudal, velocidad y temperatura de los gases de emisión de las chimeneas, que fueron halladas mediante el equipo TESTO-350S, fueron determinantes para el diseño y

dimensionamiento del lavador de gases que construyeron para la mitigación y control de los gases contaminantes en la fundición de plomo. De igual manera se guarda relación con Díaz, A. (2017), que determinó que la mejor manera de seleccionar un sistema de tratamiento de emisiones contaminantes, así como realizar el diseño y determinar su dimensionamiento, es conocer cuáles son los valores de velocidad, caudal y temperatura de las emisiones gaseosas a controlar y mitigar; estas determinaciones fueron corroborados en esta investigación, puesto que los factores y valores fueron determinantes para el dimensionamiento (el diámetro de la torre, al altura de la torre, el esparcimiento entre los patos deflectores) y el diseño del lavador de partículas fueron los datos de caudal de gases en la chimenea, la velocidad del gas; las densidades del gas y del líquido que iba a servir como material absorbente de los gases contaminantes.

#### **4.7. Caracterización del material particulado del lavador de partículas PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>**

Los resultados obtenidos también guardan relación con el estudio realizado por Salvador et al. (2020), quienes caracterizaron las emisiones de material particulado en calderas industriales de biomasa y evidenciaron que las fracciones finas (PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>) predominan en este tipo de procesos de combustión. De manera similar, en la presente investigación, la caracterización de los materiales particulados retenidos confirmó la presencia de estas fracciones, reforzando que la quema de fibra de palma aceitera genera perfiles de emisión comparables a los observados en calderas de biomasa, lo que valida la pertinencia del sistema de control implementado para mitigar dichas emisiones.

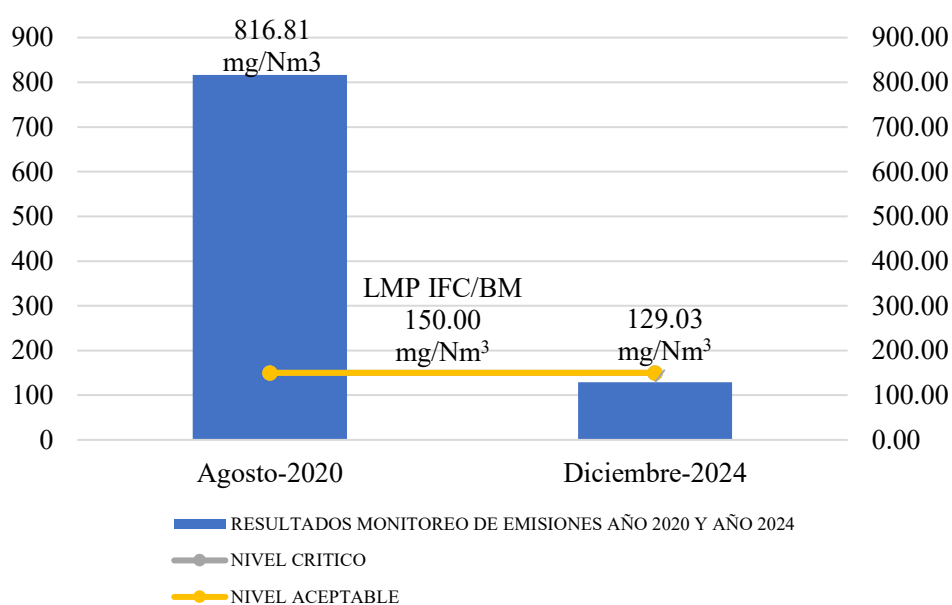
La caracterización del material particulado permitió identificar la presencia de fracciones PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>, lo cual resulta relevante al considerar que la Organización Mundial de la Salud (2021) establece que estas partículas representan un riesgo significativo para la salud humana debido a su capacidad de penetrar en el sistema respiratorio y provocar efectos adversos en poblaciones expuestas. Esta concordancia evidencia la importancia de los resultados obtenidos, ya que la retención de PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> en el sistema de tratamiento implementado contribuye no solo a la reducción de emisiones, sino también a la mitigación de riesgos ambientales y sanitarios en la zona de influencia de la industria.

## 4.8. Eficiencia del lavador de partículas de emisiones atmosféricas

### 4.8.1. Contrastación de la hipótesis de la investigación

Para esta investigación se planteó la siguiente hipótesis “*El lavador de partículas diseñado e implementado en la empresa agroindustrial reducirá más del 80 % de la concentración de material particulado  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$* ”. Posterior a la implementación del lavador de partículas, la empresa realizó el monitoreo de calidad ambiental, donde se pudo determinar las concentraciones de las emisiones gaseosas de la chimenea en estudio, donde nos muestra el nivel de las emisiones de los gases y material particulado; con los siguientes resultados se da como aceptada la hipótesis planteada.

- Para la emisión de material particulado  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  se tiene el gráfico comparativo donde se demuestra la disminución del contaminante, obteniendo un promedio del 84 % de reducción.



**Figura 31.** Gráfico comparativo de la concentración de material particulado  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  (antes y después de la instalación del lavador de partículas)

### 4.8.2. Contrastación de resultados con investigaciones similares

Flores & Apaza (2022), realizaron el diseño e implementación de un lavador de gases tipo torre en una empresa de fundición de plomo, determinaron las reducciones de las concentraciones de los gases emitidos por la chimenea, mediante el monitoreo de calidad ambiental que realizó la empresa posterior a la implementación de

su lavador de gases; por consiguiente pudieron disminuir las concentraciones de  $\text{SO}_2$  en un 80 %, así como redujeron también los gases de  $\text{NO}_2$  en un 40 % y los gases de  $\text{CO}$  en un 70 %. Estos resultados demostraron que su hipótesis general fue aceptada.

La hipótesis que Flores & Apaza (2022), plantearon y que fue demostrada en su investigación, también se respalda en esta investigación, ya que el lavador de partículas también tuvo promedios altos de reducción de los gases contaminantes, así como del material particulado ( $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$ ).

## V. CONCLUSIONES

1. Se determinaron los parámetros de operación del lavador de partículas  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ , donde se pudo conocer el modelo del caldero (Acuotubular), la capacidad del caldero (7 m<sup>3</sup>/hora de vapor), el combustible (fibra de palma aceitera), la humedad del combustible para un funcionamiento correcto del lavador (5 – 10 % humedad), la presión del caldero (12 – 14 Bar Máximo), el consumo de combustible (1,500 kg fibra/hora), la temperatura del agua (105° C) y la temperatura de sobrecalentamiento (370° C).
2. Se determinaron las estructuras del lavador de partículas (diseño y dimensionamiento), de acuerdo a la metodología descrita se obtuvo el dimensionamiento de la torre de lavado, teniendo el sistema una altura de 4.45 metros, un diámetro de 1.625 metros y los platos deflectores tienen un espaciamiento de 0.60 metros. Se menciona también que, la construcción de la torre de lavado fue con material Plancha Lisa de Acero al Carbono de ¼ de pulgada, material resistente a las altas temperaturas.
3. Se realizó la caracterización de los materiales particulados atrapados en el lavador de partículas, en el Laboratorio de Calidad de la empresa, en el cual se identificó material particulado >2.5 micras ( $PM_{2.5}$ ) y material particulado >10 micras ( $PM_{10}$ ).
4. Se determinó la eficiencia del lavador de partículas, esto mediante el diseño y la implementación del sistema de tratamiento de gases atmosféricos, donde se obtuvo un 84% de eficiencia en la remoción de material particulado ( $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ ), aceptando la hipótesis que se planteó para esta investigación.

## **VI. PROPUESTAS A FUTURO**

1. El dimensionamiento de la torre de lavado debe tener características para su mantenimiento y limpieza post operación, esto ayudará a que el sistema no baje su eficiencia de remoción y mantenga su eficiencia, por lo cual, el espaciamiento entre los platos o deflectores tienen que tener como mínimo 0.60 metros de separación y un diámetro mínimo de 0.80 metros para que un operador pueda ingresar y realizar el lavado y limpieza del sistema.
2. Para la construcción de la torre se tiene que utilizar un material que no se oxide fácilmente, puesto que al estar en contacto con material particulado este material tiene la propiedad de corroer las tuberías y las estructuras por una acidez elevada, por lo cual se tiene que utilizar por recomendación acero inoxidable, que será más resistente frente a la corrosión, pero por los costos que este material conlleva es difícil la construcción con este material.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Apaza, D. y Flores, J. 2022. Diseñaron un sistema de lavador de gases tipo torre para reducir la emisión de gases contaminantes en la fundición de plomo. Covif&me sac - Callao”. [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional del Callao]. <https://hdl.handle.net/20.500.12952/7050>
- Agropecuaria Rossel S.R.L. 2023. Programa de adecuación y Manejo Ambiental (PAMA) de Agropecuaria Rossel S.R.L. Agropecuaria Rossel S.R.L. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/4618710/rd%20242-2023-produce-dgaami.pdf?v=1685369993>
- Carpio & Reinoso. 2014. Disminución de contaminante aéreos en una planta de balanceados mediante la propuesta de un sistema de extracción de polvo. 10 pág., 5-14.
- Cruz, A. 2023. Realizó la investigación denominada “Diseño, simulación y validación de un lavador de aire solar tubular [Tesis de Pregrado, Universidad Autónoma del Estado de Morelos]. En Línea: <https://riaa.uaem.mx/xmlui/bitstream/handle/20.500.12055/3680/CUGARG09.pdf?sequence=1&isAllowed>
- Delgado, M. 2016. Diseño de un sistema de extracción y tratamiento de gases en un ambiente de forja y soldadura. [Tesis de Pregrado, Pontificia Universidad Católica del Perú]. <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/7162>
- Díaz, A. 2017. Propuesta de una metodología para seleccionar un lavador de gases. [Tesis de Pregrado, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso]. [https://opac.pucv.cl/pucv\\_txt/txt-4500/UCC4995\\_01.pdf](https://opac.pucv.cl/pucv_txt/txt-4500/UCC4995_01.pdf)
- Escobar, A. 2012. Efecto del uso de ceniza volante en el proceso de agrietamientos del concreto por corrosión del acero de refuerzo. [Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León]. En línea: <https://eprints.uanl.mx/2739/1/1080224755.pdf>

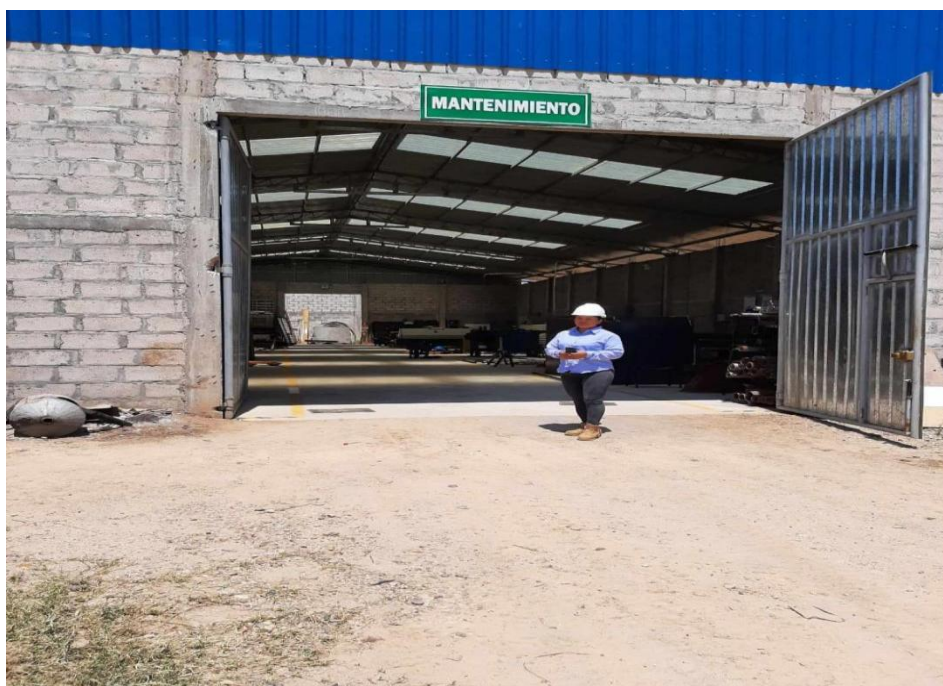
- Flores & Apaza. 2022. Diseño de un sistema de lavador de gases tipo torre para reducir la emisión de gases contaminantes en la fundición de plomo. COVIF&ME SAC – Callao. [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional del Callao]. En línea: <https://repositorio.unac.edu.pe/handle/20.500.12952/7050>
- Gavidia, L. y Pilay, D. 2020. Estudio y diseño de un ciclón para el control de partículas para una empresa productora de libros en la ciudad de Guayaquil. [Tesis de Pregrado, Universidad Politécnica Salesiana]. En línea: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/199120/4/UPS-GT002983>
- Gil M. & Molina A. 2020. Diseño y construcción de un prototipo de columna de lavado destinado al control de material particulado para una vivienda. En línea: [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_ambiental\\_sanitaria/1843](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/1843)
- Hernández, L. 2018. Diseño de un sistema de tratamiento de gases residuales para una fabrica de fertilizantes ubicada en Sarrión (Teruel). [Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Valencia]. En línea: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/110621/Hernandez%20P%203%a9rez%20-%20DISE%20%91O%20DE%20UN%20SISTEMA%20DE%20TRATAMIENTO%20DE%20GASES%20RESIDUALES%20PARA%20UNA%20F%20%81BRICA%20DE%20FERTILIZANTES%20UBICADA%20EN%20SARRI%20%93N%20%28TERUEL%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- INDUAGRO. 2014. *Proceso* productivo de ACP. [En línea]: INDUAGRO, (<https://www.induagro.com.mx/HOMEAP/ProcProductAP/ProcProductAP.html> , 10 Ene 2024).
- Neyra, J. 2021. Caracterización química del escobajo y fibra de palma aceitera (*Elaeis guinnensis jacq.*) para producción de envases biodegradables, distrito de Neshuya, Ucayali – 2021. [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de Ucayali]. En línea: [https://repositorio.unu.edu.pe/bitstream/handle/UNU/5025/B70\\_UNU\\_INGENIERIAAMBIENTAL\\_2021\\_t\\_JESSIVA-NEYRA.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unu.edu.pe/bitstream/handle/UNU/5025/B70_UNU_INGENIERIAAMBIENTAL_2021_t_JESSIVA-NEYRA.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Núñez, M. 2014. Introducción a Adsorción, Curso de Operaciones Unitarias II. [En línea]: (<https://es.slideshare.net/marconuneze/introduccion-a-la-adsorcion-para-slideshare> , 22 de Dic 2023).

- Oleaginosas Amazónicas S.A. 2017. Programa de adecuación y Manejo Ambiental (PAMA) de la Planta de Extracción de Aceite Crudo de Palma, Palmiste y Harina de Palmiste de la empresa Oleaginosas Amazónicas S.A. OLAMSA. [En línea]: [https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/136585/80873\\_1.pdf](https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/136585/80873_1.pdf)
- Oleaginosas Padre Abad S.A. 2018. Programa de adecuación y Manejo Ambiental (PAMA) de la Planta de Extracción de Aceite Crudo de Palma de la empresa Oleaginosas Padre Abad S.A. (OLPASA). [En línea]: [https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file218055/98848\\_1.pdf](https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file218055/98848_1.pdf)
- Pacherrez, O. 2019. Diseño de un lavador de gases para determinar la disminución del material particulado de la caldera acuotubular N°06 en Agroindustrial Pomalca. [Tesis de Pregrado, Universidad César Vallejo]. En línea: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/36536>
- Saturtún, A. 2014. Contaminación atmosférica, tipos de tiempo y procesos respiratorios en Santander y Zaragoza. [Tesis de Doctorado, Universidad de Cantabria]. En línea: <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/4587/Tesis%20ASZ.pdf>
- Sifuentes, N. 2018. Reducción de la concentración de monóxido de carbono optimizando el proceso de lavado de gases de la empresa MYFRANVER, San Juan de Lurigancho – 2018. [Tesis de Pregrado, Universidad César Vallejo]. En línea: [https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/34232/Sifuentes\\_VNG.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/34232/Sifuentes_VNG.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Treybal, R. 2007. Operaciones de Transferencia de Masa. Segunda Edición, México. [en Línea]: <https://fenomenosdetransporte.wordpress.com/wp-content/uploads/2008/05/operaciones-de-transferencia-de-masa-robert-e-tres>
- Organización Mundial de la Salud. (2021). Guía global de la calidad del aire: Partículas en suspensión (PM<sub>2.5</sub>yPM<sub>10</sub>). OMS. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>
- Salvador, C. M., Gómez, R., & Muñoz, J. (2020). Characterization of particulate matter emissions from biomass combustion in industrial boilers. *Journal of Cleaner Production*, 259, 120870. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120870>

**ANEXO**

**ANEXO A. Panel fotográfico.**

**Figura 32.** Punto de inicio de humo o gases en área de caldero.



**Figura 33.** Área de mantenimiento donde se realizará la construcción del lavador de partículas.



**Figura 34.** Platos perforados de acuerdo con los cálculos, para instalación en la torre de lavado.



**Figura 35.** Cuerpo de la torre de lavador siendo armado.



**Figura 36.** Parte de la estructura del decantador tipo florentino



**Figura 37.** Cuerpo de la torre de lavado con instalación de los platos perforados.



**Figura 38.** Instalación del 3er cuerpo de la torre de lavado realizada por el área de mantenimiento.



**Figura 39.** Instalación de los ductos de la torre de lavado y el florentino de recuperación de las aguas residuales.



**Figura 40.** Instalación completa de la torre de lavado y pintado de la torre de lavado de color negro de alta Resistencia de temperatura.



**Figura 41.** Monitoreo del funcionamiento del lavador de partículas.



**Figura 42.** Punto de muestreo para la caracterización de efluentes del lavador de partículas.



**Figura 43.** Punto de muestreo para la caracterización de efluentes del lavador de partículas.



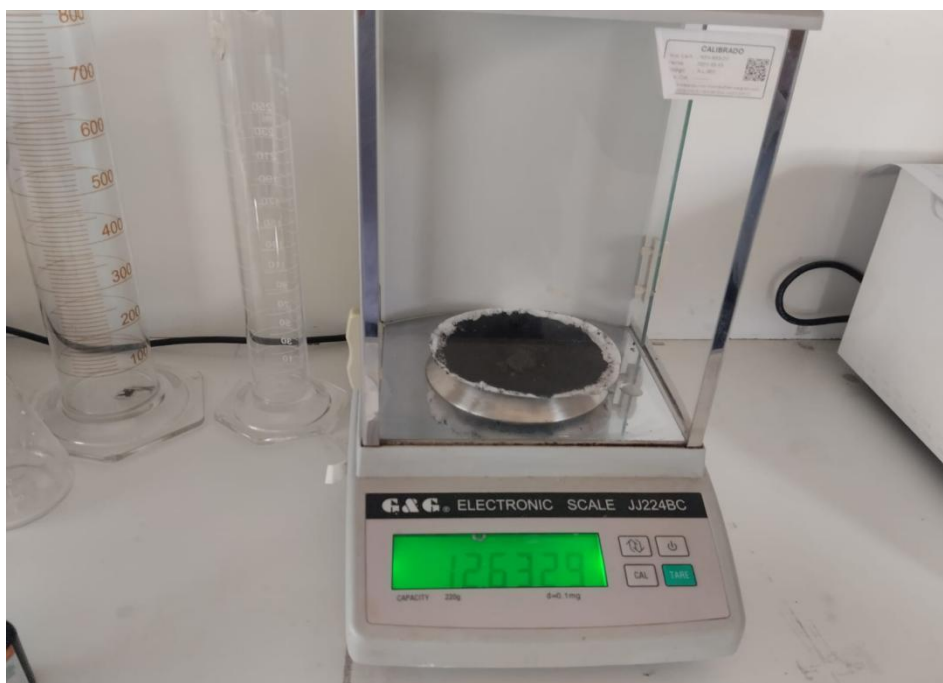
**Figura 44.** Punto de muestreo para la caracterización de efluentes del lavador de partículas.



**Figura 45.** Caracterización del material particulado mediante filtración por una bomba de vacío.



**Figura 46.** Muestras en jarras de 500 mL sacadas del Florentino de recuperación de aguas residuales del Sistema de tratamiento atmosférico.



**Figura 47.** Filtros con material particulado pesado en una balanza electrónica para obtener el peso de material particulado retenido en el Sistema de tratamiento atmosférico.



**Figura 48.** Muestras del monitoreo de gases de emisión de la chimenea con el lavador de partículas implementado.

## ANEXO B. Diagrama del Sistema de funcionamiento del Lavador de partículas

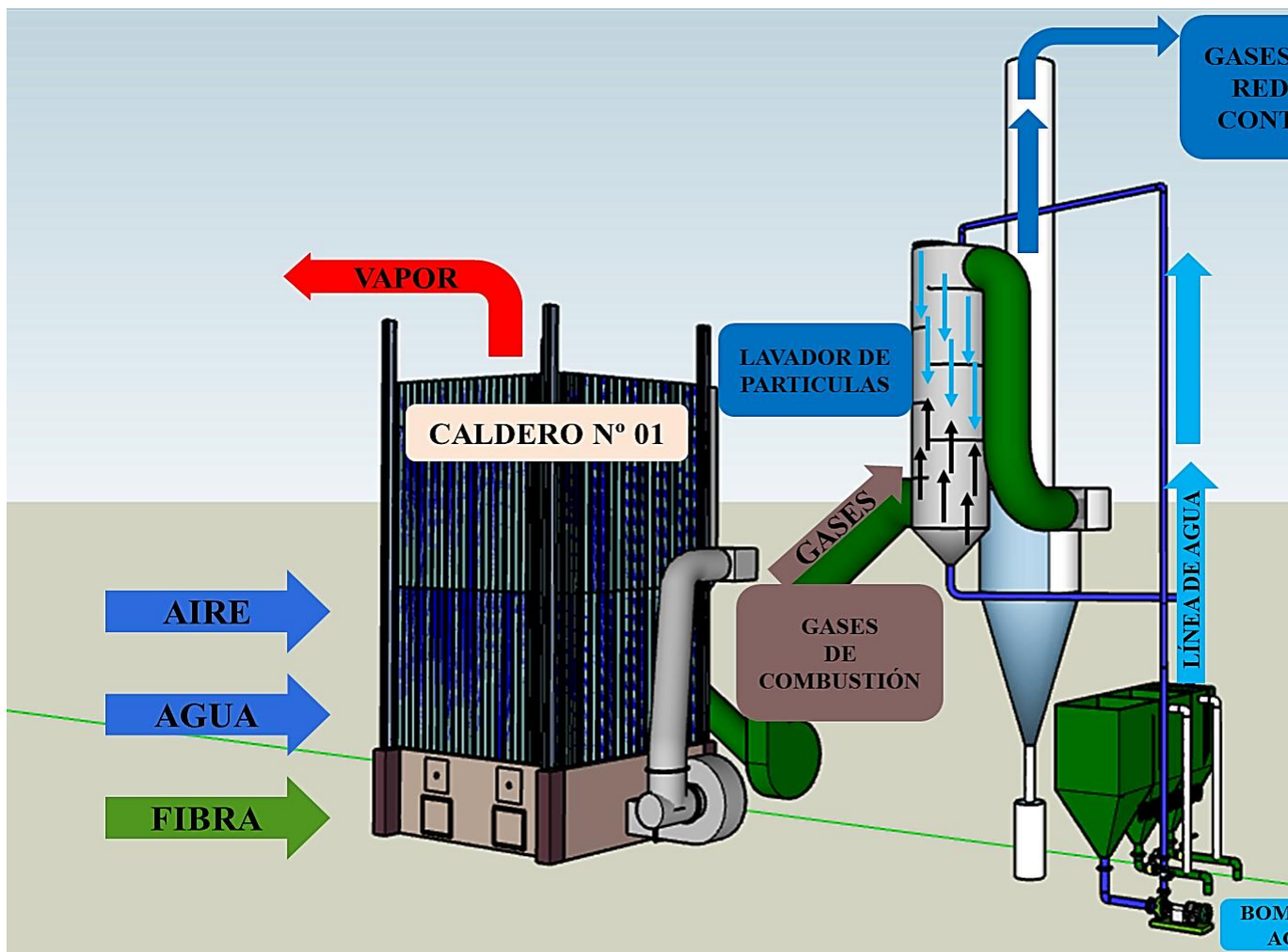


Figura 49. Diagrama de funcionamiento del sistema de lavador de partículas.

## FICHA TÉCNICA DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS

### CONTROL DE EMISIONES

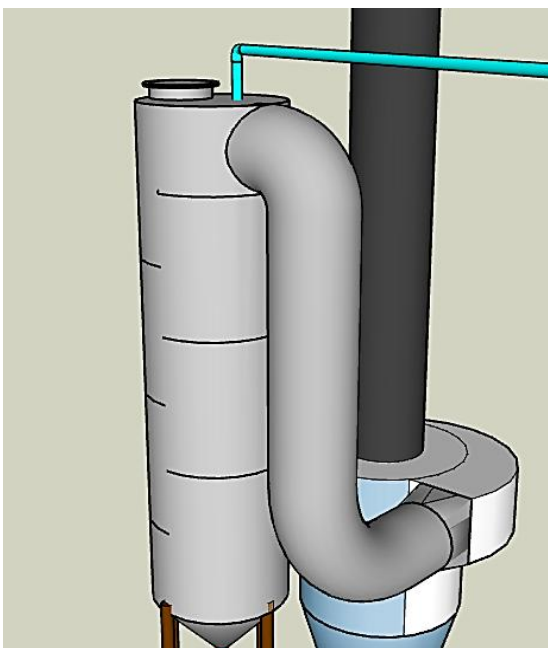
#### LAVADOR DE PARTÍCULAS SCRUBBER - TORRE DE PLATOS

##### FICHA TÉCNICA

##### TECNOLOGÍA PARA EL CONTROL DE PARTÍCULAS

#### DESCRIPCIÓN

El lavador de partículas Scrubber – Torre de platos en un equipo de alta eficiencia en la remoción de material particulado  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$  por medio del choque entre el agua (solución absorbente) y las emisiones gaseosas (material particulado). El choque entre la solución absorbente y las emisiones se dan en la torre de lavado, que está compuesta por platos deflectores con orificios, de tal manera que el contacto entre las emisiones gaseosas y el absorbente sea total, además el sistema se complementa con un tratamiento de aguas residuales y recirculación del agua.

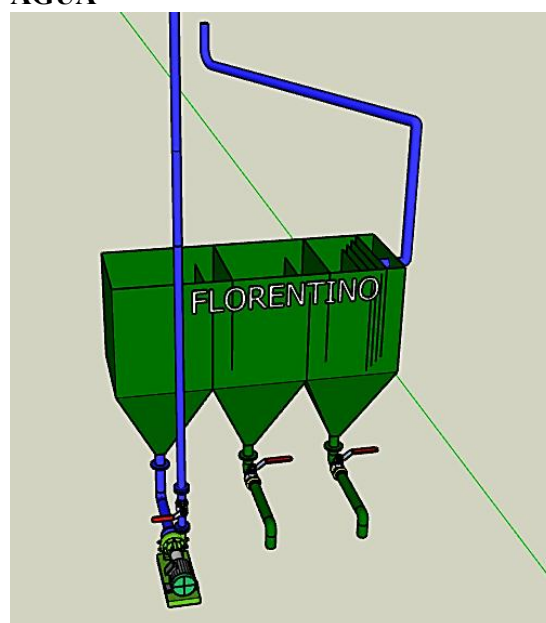


#### APLICACIONES

El lavador de partículas tipo Torre de platos, son particularmente adecuados para retener material particulado húmedo o pegajoso, este equipo puede emplearse en industrias donde el material combustible es orgánico, por la alta concentración de material particulado que emite. Se puede emplear en

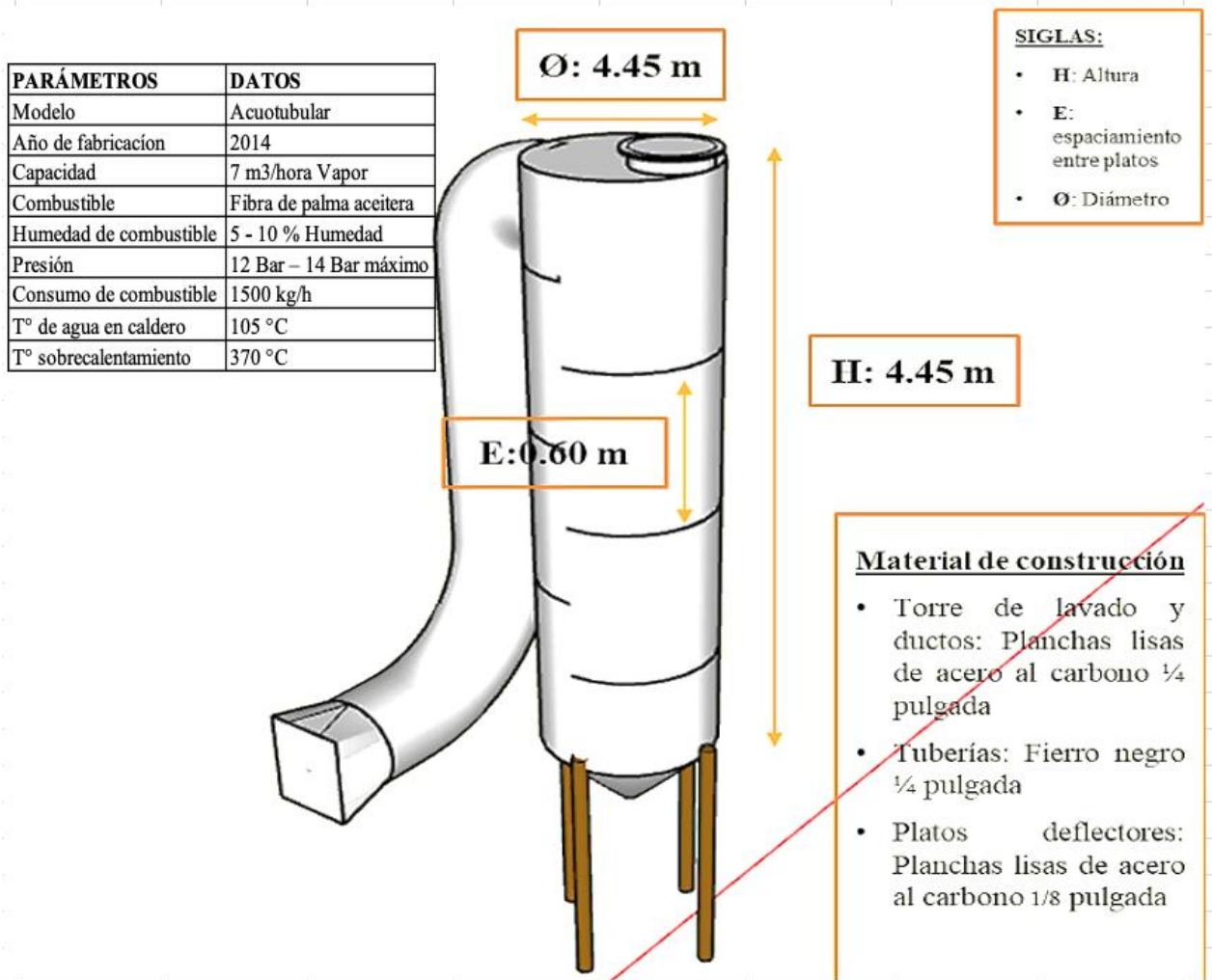
procesos productivos de refinación de aceite de palma, extracción de aceite de palma, ladrilleras, entre otros.

#### TANQUE DE RECIRCULACIÓN DE AGUA



Permite el tratamiento del agua empleada para absorber las emisiones gaseosas, de manera que el agua puede recircular hasta por 50 veces hasta que se sature completamente. Este tanque florentino consta de 3 compartimentos, los cuales terminan en cono para la sedimentación de las partículas retenidas, además al ingreso del tanque se encuentran con 5 lamelas, que se encuentran dispuestas a 8 cm de separación, lo que acelera la desestabilización de las partículas más rápido.

## DIAGRAMA DE DIMENSIONAMIENTO



## DESEMPEÑO

Este equipo tiene eficiencias superiores al 84% para la remoción de partículas, y su costo a comparación de otros sistemas de tratamientos son bajos y adaptables al sistema productivo que se maneje.

**Tabla 7.** Determinación de pesos retenidos de material particulado por el Sistema de tratamiento atmosférico.

MUESTRA	FECHA	PUNTOS DE MUESTREO					PESO TOTAL
		PM-1 (gr)	PM-2 (gr)	PM-3 (gr)	PM-4 (gr)	PM-5 (gr)	PM <sub>10</sub> Y PM <sub>2.5</sub> (gr)
M-1	14/11/2024	0.952	1.552	2.845	4.410	88.950	98.709
M-2	15/11/2024	0.940	1.443	3.778	4.280	94.387	104.828
M-3	16/11/2024	0.882	2.857	6.854	3.945	88.970	103.508
M-4	20/11/2024	1.950	2.854	5.855	8.560	128.950	148.169
M-5	21/11/2024	1.155	2.692	6.955	11.451	139.550	161.803
M-6	22/11/2024	2.155	1.958	7.255	9.584	126.950	147.902
M-7	23/11/2024	0.966	2.655	8.623	11.697	152.350	176.291
M-8	12/12/2024	2.450	1.127	2.994	6.850	164.510	177.931
M-9	13/12/2024	0.995	2.354	5.917	6.855	154.800	170.921
M-10	14/12/2024	1.810	2.553	4.675	9.813	167.510	186.361
M-11	18/12/2024	1.383	1.476	5.267	12.635	125.480	146.241
M-12	19/12/2024	0.850	2.260	3.110	4.400	171.360	181.980
M-13	20/12/2024	1.255	1.488	7.850	8.990	145.660	165.243
M-14	21/12/2024	0.940	1.884	6.230	9.250	129.680	147.984
M-15	27/12/2024	1.155	2.640	5.850	12.060	148.060	169.765
M-16	28/12/2024	0.570	1.090	3.880	8.460	129.450	143.450
M-17	08/01/2025	1.860	1.955	2.942	6.852	164.850	178.459
M-18	09/01/2025	2.151	2.658	6.599	7.455	139.870	158.733
M-19	10/01/2025	3.142	6.425	8.941	13.288	128.550	160.346
M-20	11/01/2025	1.850	3.571	7.455	9.811	162.641	185.328

FUENTE: Elaboración propia.

- **Datos generales**

1. DATOS GENERALES				
GAS DE COMBUSTIÓN		FLUJO DE LA SOLUCIÓN CAPTADORA		MOTOBOMBA INDUSTRIAL
$Q_G =$	3.39 $m^3/s$	$Q_L =$	0.0083 $m^3/s$	Bomba con potencia de 2 HP y caudal de 30,000 L/h
$\rho_G =$	2.1 $kg/m^3$	$\rho_L =$	997 $kg/m^3$	

- **Perforación de los platos**

Se realiza los cálculos para la perforación de los platos, para ello se determinan el diámetro de los orificios y la separación entre los orificios, así como también se determina el coeficiente del área del orificio por el área afectiva en contacto en el sistema.

2. PERFORACIÓN DE LOS PLATOS	
$P' =$	0.012 m
$d_0 =$	0.0045 m
Tomamos 4.5 mm sobre una distribución en forma de triángulo equilátero, con distancias de 12 mm entre los centros de los orificios, hechos sobre una hoja metálica de 2 mm de espesor	
Ecuación:	$\frac{A_0}{A_a} = \frac{\text{Área del orificio}}{\text{Área activa}} = 0.907 * \left(\frac{d_0}{P'}\right)^2$
$\frac{A_0}{A_a} =$	0.1275

- **Cálculo de diámetros de la torre**

Se realizó el cálculo para la determinación del diámetro de la torre (lavador de partículas), donde el diámetro fue de 1.6250 metros.

3. CÁLCULO DEL DIÁMETRO DE LA TORRE													
En forma tentativa tomaremos un espaciado de 60 cm entre los platos $\epsilon =$ 0.6 m													
$\frac{L'}{G'} * \left(\frac{\rho_G}{\rho_L}\right)^{0.5} = \frac{Q_L * \rho_L}{Q_G * \rho_G} * \left(\frac{\rho_G}{\rho_L}\right)^{0.5} = \frac{Q_L}{Q_G} * \left(\frac{\rho_L}{\rho_G}\right)^{0.5}$													
$\frac{Q_L}{Q_G} * \left(\frac{\rho_L}{\rho_G}\right)^{0.5} =$ 0.0533													
<b>CONDICIÓN</b>	CONDICIONAL PARA CF 0.1000												
<table border="1"> <caption>Tabla 6.2 Dimensiones recomendadas para torres de platos perforados</caption> <thead> <tr> <th>Rango de <math>\frac{L'}{G'} * \left(\frac{\rho_G}{\rho_L}\right)^{0.5}</math></th> <th colspan="2">Unidades <math>\alpha, \beta</math> de <math>V_F</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.01-0.1, utilizar valores en 0.1</td> <td>N/m</td> <td>m/s</td> </tr> <tr> <td>0.1-1.0</td> <td>m</td> <td>m/s</td> </tr> <tr> <td></td> <td>en dinas/cm <math>\times 10^{-3}</math></td> <td>ft/s</td> </tr> </tbody> </table>		Rango de $\frac{L'}{G'} * \left(\frac{\rho_G}{\rho_L}\right)^{0.5}$	Unidades $\alpha, \beta$ de $V_F$		0.01-0.1, utilizar valores en 0.1	N/m	m/s	0.1-1.0	m	m/s		en dinas/cm $\times 10^{-3}$	ft/s
Rango de $\frac{L'}{G'} * \left(\frac{\rho_G}{\rho_L}\right)^{0.5}$	Unidades $\alpha, \beta$ de $V_F$												
0.01-0.1, utilizar valores en 0.1	N/m	m/s											
0.1-1.0	m	m/s											
	en dinas/cm $\times 10^{-3}$	ft/s											
$\alpha = 0.0744t + 0.01173$													
$\beta = 0.0304t + 0.015$													
$\alpha =$	0.05637												
$\beta =$	0.03324												
* Hallando la constante de inundación (Ecuación 3)													
$C_F = \left[ \alpha * \log \frac{1}{\frac{Q_L}{Q_G} * \left(\frac{\rho_L}{\rho_G}\right)^{0.5}} + \beta \right] * \left(\frac{\sigma}{0.020}\right)^{0.2}$													
Asumiendo $\sigma =$ 0.04 N/m													
$C_F =$	0.10293486												
* Hallando la velocidad de inundación													
$V_F = C_F * \left(\frac{\rho_L - \rho_G}{\rho_G}\right)^{1/2}$													
$V_F =$	2.2405 m/s Durante la inundación												
Se empleará el 80 % de la velocidad de Inundación													
$V =$	1.7924 m/s Velocidad de inundación con base en A												

*\* Cálculo del área para un vertedero*

$$A_n = \frac{Q_G}{V_F}$$

$$A_n = 1.89132937 \text{ m}^2$$

*\* De acuerdo con la tabla 6.1 se escoge la longitud del derramadero de  $W=0.7*T$*

De acuerdo con la tabla 6.1 el área que utiliza el plato por un vertedero es un 8.8 %

$$A_i = \frac{A_n}{1 - 0.088}$$

$$A_i = 2.07382606 \text{ m}^2$$

*\* Cálculo del diámetro de la torre (T)*

$$T = \sqrt{\frac{4 * A_i}{\pi}}$$

$$T = 1.6 \text{ m}$$

*\* Área corregida (A<sub>i</sub>)*

$$A_i = \frac{\pi * T^2}{4}$$

$$A_i = 2.0738 \text{ m}^2$$

### - Longitud del derramadero

Se determinó la longitud del derramadero en los platos, el cual viene a ser el 70 % del diámetro de la torre de lavado, por lo cual la longitud es de 1.1375 metros.

4. LONGITUD DEL DERRAMADERO (W)	
$W = 0.7 * T$	
$W = 1.1375$	m

### - Hallando el derramadero

Se determinó la altura del derramadero, el cual tiene un valor de 0.05 metros.

5. HALLANDO EL DERRAMADERO ( $h_1$ )					
<i>* Hallando el área de la Sección Transversal del Veredero</i>					
$A_d = 0.088 * (A_i)$					
$A_d = 0.1825$	m <sup>2</sup>				
<i>* Hallando el Área de Lámina Perforada</i>					
$A_a = A_i - 2 * A_d - \text{Área ocupada}$					
Área ocupada = 0.222	m <sup>2</sup> ASUMIDO				
$A_a = 1.4868$	m <sup>2</sup> Para Lámina perforada				
<i>* CÁLCULO DE DERRAMADERO (<math>h_1</math>)</i>					
$h_1 = 0.666 * \left(\frac{Q_L}{W}\right)^{2/3} * \left(\frac{W}{W_{eff}}\right)^{2/3}$					
DATO:	Para calcular $h_1$ , utilizamos y desarrollamos la Ecuación 9				
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Área ocupada:</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2">Se asumen un soporte de anillo y viguetas de 40 mm de espesor entre los vertederos y zonas de desprendimiento y distribución de 50 mm de espesor</td> </tr> </tbody> </table>		Área ocupada:		Se asumen un soporte de anillo y viguetas de 40 mm de espesor entre los vertederos y zonas de desprendimiento y distribución de 50 mm de espesor	
Área ocupada:					
Se asumen un soporte de anillo y viguetas de 40 mm de espesor entre los vertederos y zonas de desprendimiento y distribución de 50 mm de espesor					

\* Ecuación 10:

$$\left(\frac{W_{eff}}{W}\right)^2 = \left(\frac{T}{W}\right)^2 - \left[\left(\frac{T}{W}\right)^2 - 1\right]^{0.5} + \frac{2 * h_1 * T}{W}$$

Probamos con  $h_1 = 25 \text{ mm} = 0.025 \text{ m}$       $h_1 = 0.025 \text{ m}$

$$\frac{W_{eff}}{W} = 0.9531$$

\* Hallando  $h_1$  con el valor encontrado de  $W_{eff}/W$ :

Probamos con  $h_1 = 0.0259 \text{ m}$       $h_1 = 0.0259 \text{ m}$

$$\frac{W_{eff}}{W} = 0.9513$$

\* Hallando  $h_1$  con el valor encontrado de  $W_{eff}/W$ :

$h_1 = 0.0259 \text{ m}$      **VALOR DE  $h_1$  CORRECTO**

\* Hallando  $H_w$ :

Las profundidades del líquido no deben ser menores a 5 cm para asegurar una buena formación de espuma, pero 10 cm es un máximo más común.

\*  $0.05 \text{ m} < h_w < 0.1 \text{ m}$

\* La profundidad del líquido es igual a:

$$h_w + h_1$$

Entonces se asume:

$h_w = 0.05 \text{ m}$      **ALTURA DEL DERRAMADERO**

- **Cálculo de la caída de presión**

El cálculo de la caída de la presión en seco, tiene un valor de 0.0360 m.

**6. CÁLCULO DE LA CAÍDA DE PRESIÓN EN  $h_D$**

\* Calculamos con la Ecuación 13

$$C_0 = 1.09 * \left(\frac{d_0}{l}\right)^{0.25}$$

$C_0 = 1.33083241$

DATO:	$C_0$ es un coeficiente de orificio que desprende del espesor del plato/diámetro del orificio
DATO:	Sobre el rango de: $l/d_0$ : 0.2 a 2.0
	* Se toma a l: $l = 0.0020 \text{ m}$

\* Hallando el número de Reynolds para el orificio:

$$N_R = \frac{d_0 * V_0 * \rho_G}{\mu_G}$$

\* Para hallar el  $N_R$ , primero hallamos la  $V_0$  para el orificio:

$$V_0 = \frac{Q_G}{A_0}$$

\* Pero, primero hallamos el  $A_0$ :

$N_R = 13519.1446$      Flujo Turbulento

NR	<	2300	FLUJO LAMINAR
NR	>	4000	FLUJO TURBULENTO

$A_0 = 0.1275 * A_a$

$A_0 = 0.1896 \text{ m}^2$

\* Ahora si hallamos  $V_0$ :

$V_0 = 17.8825 \text{ m/s}$

DATO:	
$\mu_G =$	0.0125
$\rho_G =$	0.0000125     kg/m.s

Gravedad	
$g =$	9.807     m/s <sup>2</sup>
Factor de fricción	
$f =$	0.0047     Para tubos lisos

\* Calculamos la presión en seco  $h_D$  Ecuación 12:

$$\frac{2 * h_D * g * \rho_L}{V_0^2 * \rho_G} = C_0 * \left[ 0.40 * \left( 1.25 - \frac{A_0}{A_n} \right) + \frac{4 * l * f}{d_0} + \left( 1 - \frac{A_0}{A_n} \right)^2 \right]$$

$h_D = 0.0360 \text{ m}$

### - Cálculo del frente hidráulico

Hallamos el frente hidráulico, el cual tiene un valor de 0.0778 m.

7. CÁLCULO DEL FRENTE HIDRÁULICO $h_L$	
* Calculamos primero $V_a$ :	
$V_a = \frac{Q_G}{A_a}$	
$V_a =$	2.2800 m/s
* Calculamos $Z$ :	
$Z = \frac{T + W}{2}$	
$Z =$	1.3812 m
* Calculamos $h_L$ :	
$h_L = 0.24 + 0.725 * h_{wv} - 0.29 * h_{wv} * V_a * \rho_G^{0.5} + 4.48 * \frac{Q_L}{Z}$	
$h_L =$	0.0778 m

### - Cálculo de la caída de presión residual

Hallamos la caída de presión residual, el cual tiene un valor de 0.0055 m.

8. CÁLCULO DE LA CAÍDA DE PRESIÓN RESIDUAL $h_R$					
$h_R = \frac{6 * \sigma * g_c}{\rho_L * d_0 * g}$					
$h_R =$	0.0055 m				
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">DATO:</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><math>\sigma =</math></td> <td>1 m/s<sup>2</sup></td> </tr> </tbody> </table>		DATO:		$\sigma =$	1 m/s <sup>2</sup>
DATO:					
$\sigma =$	1 m/s <sup>2</sup>				

### - Cálculo de la caída de presión total del gas

La caída de presión total del gas será determinada por medio de la suma de la caída de presión en el plato seco ( $h_D$ ), la caída de presión resultante de la profundidad del líquido en el plato ( $h_L$ ) y la caída de presión residual ( $h_R$ ).

9. CÁLCULO DE LA CAÍDA DE PRESIÓN TOTAL DEL GAS $h_G$							
$h_G = h_D + h_L + h_R$							
$h_G =$	0.1192 m						
* Pérdida de presión a la entrada del líquido $h_2$ :							
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">DATO:</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2">El faldón del vertedero se coloca en <math>h_w - 0.025</math></td> </tr> <tr> <td>Faldón del vertedero =</td> <td>0.025 m</td> </tr> </tbody> </table>		DATO:		El faldón del vertedero se coloca en $h_w - 0.025$		Faldón del vertedero =	0.025 m
DATO:							
El faldón del vertedero se coloca en $h_w - 0.025$							
Faldón del vertedero =	0.025 m						
* Área para el flujo del líquido del faldón:							
$A_{da} = \text{Faldón de Vertedero} * (W)$							
$A_{da} =$	0.0284 m <sup>2</sup>						
* Hallando $h_2$ : Ecuación 21							
$h_2 = \frac{3}{2 * g} \left( \frac{Q_L}{A_{da}} \right)^2$							
$h_2 =$	0.0130 m						
* Calculamos $h_3$ :							
$h_3 = h_G + h_2$							
$h_3 =$	0.1323 m						

### - Verificación sobre la inundación

Se determina que no existe lloriqueo excesivo dentro del sistema de lavado, por lo cual el sistema de tratamiento se encuentra en buen funcionamiento, debido a que la velocidad

mínima del gas a través de los orificios ( $V_{ow}=2.49866$ ) es menor que la velocidad en los orificios ( $V_o=17.8825$ ).

**10. VERIFICACIÓN SOBRE LA INUNDACIÓN**

$$h_w + h_1 + h_3 < \frac{t}{2}$$

**0.2082**      **¡ ESCOGIDA SATISFATORIA**

Velocidad de llorqueo para  $W/T=0.7$   
\* El derramadero se coloca según la Tabla 6.1

Para:       $W= 0.70 \cdot T$       ----->       $0.3296 \cdot T$       Distancia desde el centro de la torre, longitud del derramadero

$$W = 0.3596 \cdot T$$

$$W = \mathbf{0.5843} \text{ m}$$

Por lo tanto:

$$Z = 2 \cdot W$$

$$Z = \mathbf{1.1687} \text{ m}$$

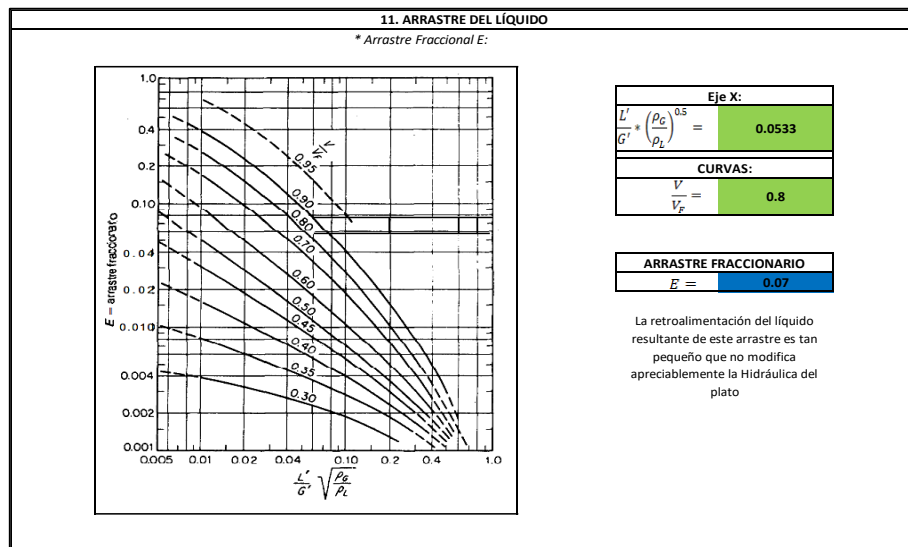
Llorqueo de los platos perforados  $V_{ow}$ :

$$\frac{V_{ow} \cdot \mu_G}{\sigma \cdot g_c} = 0.0229 \cdot \left( \frac{\mu_G^2}{\sigma \cdot g_c \cdot \rho_G \cdot d_o} \cdot \frac{\rho_L}{\rho_G} \right)^{0.379} \cdot \left( \frac{l}{d_o} \right)^{0.293} \cdot \left( \frac{2 \cdot A_a \cdot d_o}{\sqrt{3} \cdot P^{1.5}} \right)^{2.8} / \left( \frac{t}{d_o} \right)$$

$$V_{ow} = \mathbf{2.49866} \quad \text{NO PRESENTA LLORQUEO EXCESIVO}$$

### - Arrastre del líquido

Se determinó el arrastre fraccionario del líquido en el sistema, por lo cual el arrastre es de 0.07, lo cual nos indica que el arrastre fraccionario es pequeño y no modifica la hidráulica de los platos en el sistema de tratamiento.



### - Etapas del proceso de condensación en el lavador

Se determinó el flujo másico de gases, el cual tiene un valor de 7.1190 kg Gas/s, así como se determinaron los flujos másicos en las 2 etapas, donde el flujo másico en la etapa 1 es de 2.8476 kg Gas/s y el flujo másico de la segunda etapa es de 1.4238 kg Gas/mes.

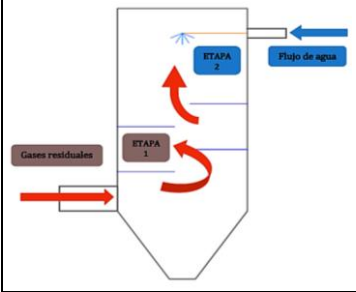
**12. ETAPAS DEL PROCESO DE CONDENSACIÓN EN EL LAVADOR**

\* Hallando el Flujo Másico de Gases  $Q_{mG}$ :

$$Q_{mG} = Q_G * \rho_G$$

$$Q_{mG} = 7.1190 \text{ Kg Gas/s}$$

Etapas del proceso en el Lavador de partículas:



El lavador tendrá una eficiencia de remoción del 80%, de las cuales el 60 % de remoción se dará en la Etapa 1 y el 20 % de remoción se dará en la Etapa 2.

\* Primera etapa de Condensación:

$$Q_{mG1} = Q_{mG} - Q_{mG} * 0.6$$

$$Q_{mG1} = 2.4476 \text{ Kg Gas/s}$$

\* Segunda etapa de Condensación:

$$Q_{mG2} = Q_{mG1} - Q_{mG1} * 0.2$$

$$Q_{mG2} = 1.4238 \text{ Kg Gas/s}$$

- **Hallando la altura del lavador de partículas**

Se determinó la altura de la torre de lavado, el cual tendrá una altura de 4.45 metros, por lo cual se encuentra diseñado el sistema de tratamiento de emisiones atmosféricas.

**13. HALLANDO LA ALTURA DEL LAVADOR DE PARTÍCULAS**

**Primera Etapa:**

\* Calculando la Velocidad del Gas  $V_{Gas1}$ :

$$V_{Gas1} = \frac{Q_{mG1} * 4}{\pi * D^2 * \rho_G}$$

$$V_{Gas1} = 0.6539 \text{ m/s}$$

Asumiendo en tiempo de 2.35 segundos de que el Gas pasará esta etapa

$t =$	5.9	s
-------	-----	---

\* Calculando la Altura de la primera etapa  $H_1$ :

$$H_1 = V_{Gas1} * t$$

$$H_1 = 3.86 \text{ m}$$

**Segunda Etapa:**

\* Calculando la Velocidad del Gas  $V_{Gas2}$ :

$$V_{Gas2} = \frac{Q_{mG2} * 4}{\pi * D^2 * \rho_G}$$

$$V_{Gas2} = 0.3269 \text{ m/s}$$

Asumiendo en tiempo de 0.5 segundos de que el Gas pasará esta etapa

$t =$	1.80	s
-------	------	---

\* Calculando la Altura de la segunda etapa  $H_2$ :

$$H_2 = V_{Gas2} * t$$

$$H_2 = 0.59 \text{ m}$$

\* Altura Total  $H$ :

$$H = H_1 + H_2$$

$$H = 4.45 \text{ m}$$