



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**DISEÑO DE SISTEMA DE EXTRACCIÓN DE PARTÍCULAS EN
SUSPENSIÓN EN EL ÁREA DE PROCESAMIENTO DE GRASAS**

Christian Andrés Morales Tobón

Asesorado por el Ing. Jorge Fernando Isaacs Álvarez

Guatemala, marzo de 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE SISTEMA DE EXTRACCIÓN DE PARTÍCULAS EN
SUSPENSIÓN EN EL ÁREA DE PROCESAMIENTO DE GRASAS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

CHRISTIAN ANDRÉS MORALES TOBÓN

ASESORADO POR EL ING. JORGE FERNANDO ISAACS ÁLVAREZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, MARZO DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

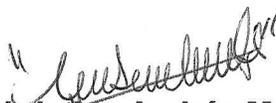
DECANO	Ing. Angel Roberto Sic García (a. i.)
EXAMINADOR	Ing. Carlos Salvador Wong Davi
EXAMINADOR	Ing. Víctor Herbert de León Morales
EXAMINADOR	Ing. Jaime Domingo Carranza González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO DE SISTEMA DE EXTRACCIÓN DE PARTÍCULAS EN SUSPENSIÓN EN EL ÁREA DE PROCESAMIENTO DE GRASAS

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 16 de enero de 2015.


Christian Andrés Morales Tobón

Nestlé Guatemala, S. A.

OFICINAS:

14 Ave. 16-70 ZONA 4 DE MIXCO CONDADO EL NARANJO
APARTADO POSTAL 01057,
GUATEMALA, GUATEMALA, C.A.

FABRICA:

KM. 46.5 CARRETERA A CIUDAD VIEJA
ANTIGUA GUATEMALA, C.F. 03001
APARTADO POSTAL 209
ANTIGUA GUATEMALA, GUATEMALA, C.A.

TELÉFONOS:

PBX: 24274100
FAX: 24274141

TELÉFONOS:

PBX: 78280200
FAX: 78280202



Guatemala, 15 de Octubre de 2015

Ingeniero

Víctor Monzón

Director de la Escuela de Ingeniería Química

Facultad de Ingeniería

Universidad de San Carlos de Guatemala

Por este medio me dirijo a usted deseándole éxitos en sus labores cotidianas, el motivo de la presente es para informarle que en mi calidad de asesor he aprobado el Informe Final del Trabajo de Graduación del estudiante Christian Andrés Morales Tobon, Carné 2008-15295, titulado: **"DISEÑO DE SISTEMA DE EXTRACCIÓN DE PARTÍCULAS EN SUSPENSIÓN EN EL ÁREA DE PROCESAMIENTO DE GRASAS"**, el cual se realizó en las instalaciones de Nestlé Guatemala, S.A., ubicadas en KM 46.5 carretera a Ciudad Vieja, Antigua Guatemala, Depto. de Sacatepéquez.

Sin otro particular, me suscribo de usted atentamente,

Jorge Fernando Isaacs
Ingeniero Químico
Colegiado No. 1354

Ing. Jorge Fernando Isaacs Álvarez

Colegiado No. 1584

Asesor de tesis



Guatemala, 22 de enero de 2016.
Ref. EIQ.TG-IF.006.2016.

Ingeniero
Carlos Salvador Wong Davi
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Wong:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo 111-2014 le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por el estudiante universitario: **Christian Andres Morales Tobon**.
Identificado con número de carné: **2008-15295**.
Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

**DISEÑO DE SISTEMA DE EXTRACCIÓN DE PARTICULAS EN SUSPENSIÓN
EN EL ÁREA DE PROCESAMIENTO DE GRASAS**

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Jorge Fernando Isaacs Álvarez**.

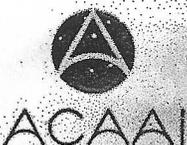
Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"


Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo





Ref.EIQ.TG.013.2016

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación de el estudiante, **CHRISTIAN ANDRÉS MORALES TOBÓN** titulado: **"DISEÑO DE SISTEMA DE EXTRACCIÓN DE PARTÍCULAS EN SUSPENSIÓN EN EL ÁREA DE PROCESAMIENTO DE GRASAS"**.
Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Carlos Salvador Wong Davi
Director
Escuela de Ingeniería Química



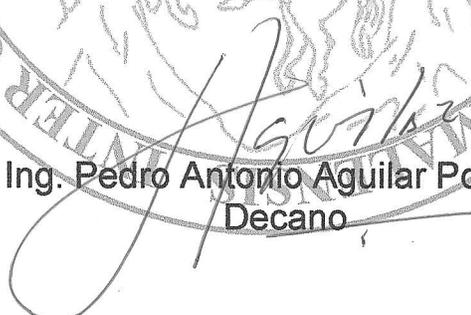
Guatemala, marzo 2016

Cc: Archivo
CSWD/ale



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE SISTEMA DE EXTRACCIÓN DE PARTÍCULAS EN SUSPENSIÓN EN EL ÁREA DE PROCESAMIENTO DE GRASAS**, presentado por el estudiante universitario **Christian Andrés Morales Tobón** y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano



Guatemala, marzo 2016

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por ser el guía para alcanzar mis metas con éxito.
Mis padres	Jorge Morales y Beatriz Tobón, por su apoyo incondicional brindada durante mi formación académica.
Mis hermanas	Alejandra, Anabella y Paola Morales Tobón, por ser un ejemplo de dedicación y constancia.
Mi tío	Otto Morales, por ser una importante influencia en mi vida.

AGRADECIMIENTOS A:

- Dios** Por ser el guía para alcanzar mis metas con éxito.
- Mis padres** Jorge Morales y Beatriz Tobón, por su apoyo incondicional brindado durante mi formación académica.
- Mis hermanas** Alejandra, Anabella y Paola, por ser un ejemplo de dedicación y constancia.
- Mis abuelas** Ninfa Lucas y Aurora Corzo, por el gran cariño y afecto que me brindaron, su recuerdo sigue presente en nuestros corazones.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. ANTECEDENTES GENERALES	1
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Generalidades sobre los procesos de separación.....	5
2.2. Separación de sólidos	6
2.2.1. Introducción a los proceso de separación de sólidos	6
2.2.2. Propiedades de las dispersiones de partículas.....	8
2.3. Medición de partículas.....	12
2.3.1. Medición de la contaminación atmosférica	12
2.3.2. Muestreo de gases de proceso.....	13
2.4. Procesos de separación físicomecánica.....	13
2.4.1. Clasificación de los procesos de separación físicomecánica	15
2.4.1.1. Filtración	15
2.4.1.2. Precipitación y sedimentación	15
2.4.1.3. Precipitación y sedimentación por centrifugación	15

	2.4.1.4.	Reducción mecánica de tamaño y separación.....	16
2.5.		Separación por tamaño	16
	2.5.1.	Operación de tamizado	16
	2.5.2.	Tamices.....	17
	2.5.3.	Tamices normales.....	19
2.6.		Análisis granulométrico	19
2.7.		Separación gas-sólido.....	24
	2.7.1.	Mecanismos de recolección de polvos.....	24
	2.7.2.	Propósito de la recolección de polvos	25
2.8.		Diseño del recolector de polvo	26
	2.8.1.	Equipos de recolección de polvo, sepador ciclónico para gas-sólido	27
		2.8.1.1. Separdor de ciclón para gas-sólido	27
		2.8.1.2. Detalles operativos prácticos.....	31
2.9.		Factores de riesgo ocupacionales.....	32
	2.9.1.	Factores de riesgo químicos	32
	2.9.2.	Clasificación	33
	2.9.3.	Polvo	33
	2.9.4.	Gestión ambiental	34
	2.9.5.	Sistemas de gestión de seguridad y salud ocupacional OHSAS 18001	34
		2.9.5.1. Alcance y campo de aplicación	34
3.		METODOLOGÍA	37
	3.1.	Variables	37
		3.1.1. Variables independientes	37
		3.1.2. Variables dependientes.....	38
	3.2.	Delimitación del campo de estudio.....	38

3.3.	Recursos humanos disponibles.....	39
3.4.	Recursos materiales disponibles	39
3.5.	Técnica cualitativa y cuantitativa	40
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información	41
3.6.1.	Técnica de muestreo	41
3.6.2.	Ordenamiento de muestras	42
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	43
3.7.1.	Determinación de densidad aparente de almidón en polvo	43
3.7.2.	Determinación del tamaño de las partículas de almidón en polvo.....	45
3.7.3.	Concentración de partículas de almidón en polvo en cuarto de grasas	47
3.7.4.	Cálculo y dimensiones del ducto de transporte de la corriente de aire	48
3.7.5.	Caída de presión en el sistema de ductos	52
3.7.6.	Selección de ventilador.....	57
3.7.7.	Selección, cálculo y diseño del separador ciclónico.....	59
3.7.8.	Desempeño del ciclón propuesta.....	61
3.7.9.	Cálculo de caída de presión en separador ciclónico.....	65
3.7.10.	Colector de polvo.....	68
3.8.	Análisis estadístico	70
4.	RESULTADOS	73
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	77

CONCLUSIONES.....81
RECOMENDACIONES83
BIBLIOGRAFÍA.....85
APÉNDICES.....87
ANEXOS.....89

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Características de las partículas y dispersoides de partículas	9
2.	Frecuencia-distribucion de tamaños.....	22
3.	Acumulación de tamaños-distribución.....	23
4.	Diagrama logaritmo-probabilidad	23
5.	Tipos de separadores ciclónicos	28
6.	Eficiencias de separación de ciclones típicos	30
7.	Diámetro de campana de extracción suspendida.	50
8.	Sistema de ductos de carga y descarga al sistema de extracción propuesto	53
9.	Ventilador tuboaxial.....	58
10.	Dimensiones de ciclón de alta eficiencia en función del diámetro D_c ..	60
11.	Curva de desempeño de ciclón de alta eficiencia a condiciones estándar	65
12.	Factor de caída de presión del ciclón.....	66
13.	Colector de polvos Unimaster, Donaldson Torit	70
14.	Concentración de partículas de almidón en polvo en función del tiempo para un diámetro de partícula dado.....	74
15.	Separador ciclónico de alta eficiencia Stairmand.....	74
16.	Vistas frontal y lateral sistema de 6 ciclones en paralelo.	75
17.	Sistema de ducto de carga y descarga al separador ciclónico.....	76

TABLAS

I.	Clasificación de métodos de separación según las fases involucradas.....	7
II.	Variación de las aperturas de los tamices con el número de mallas y diámetro del hilo.....	18
III.	Análisis por tamaños de una muestra.....	21
IV.	Recursos materiales disponibles	40
V.	Densidad aparente del almidón en polvo	44
VI.	Peso del almidón en polvo retenido por pila de tamices	46
VII.	Porcentaje en peso retenido de almidón en polvo en función de número de tamiz	47
VIII.	Concentración promedio de partículas de almidón en polvo para diámetros de 1, 2,5, 4 y 10 μm	48
IX.	Intervalos típicos de operación de los ventiladores axiales	58
X.	Datos estándar y propuestos para diseño de separador ciclónico tipo Stairmand.....	63
XI.	Desempeño del separador ciclónico tipo Stairmand diseñado	64
XII.	Análisis de tamaño de almidón en polvo.....	73
XIII.	Concentración promedio de partículas en cuarto de grasas de la planta	73
XIV.	Desempeño de ciclón tipo Stairmand propuesto.....	76

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
z	Altura
H	Carga o pérdida de presión
Q	Caudal
CV	Coeficiente de variación
P_g	Densidad del aire
P_p	Densidad de la partícula
P_i	Densidad muestra i
σ	Desviación estándar
D_{c_n}	Diámetro a la entrada del ciclón
D_{c_n}	Diámetro estándar de ciclón
D_p	Diámetro de la partícula
Sf	Factor de escalamiento
Fc	Fuerza centrífuga
Fg	Fuerza de gravedad
°C	Grados Celsius
g/cm³	Gramos por centímetro cúbico
kg	Kilogramos
m	Masa
$\bar{\rho}$	Media
m	Metros
μm	Micrómetros
mL	Mililitros
Pot	Potencia

pulg	Pulgadas
pulg²	Pulgadas al cuadrado
PM	Punto de muestreo
r	Radio
$\sum_{i=1}^n \rho_i$	Sumatoria de densidades
N	Total de datos
σ^2	Varianza
v	Velocidad
μ_g	Viscosidad del aire
μ_p	Viscosidad de la partícula
u_{tan}	Velocidad tangencial

GLOSARIO

Campana	Entrada diseñada para la captura de aire contaminado y dirigirlo a un sistema de conductos de extracción.
Carga o pérdida de presión	Pérdida de presión en un fluido debido a la fricción de las partículas del fluido entre sí y contra las paredes de la tubería que las conduce.
Caudal de aspiración	Cantidad de aire a presión negativa, necesaria para aspirar la mayor cantidad de contaminante en una operación industrial.
Coagulación o floculación	Formación de partículas de tamaño discreto fácilmente separable por medio de la sedimentación y filtración.
Coloides	Sustancia cuyas partículas pueden encontrarse en suspensión en un líquido, merced al equilibrio coloidal, cuyas partículas tienen un tamaño de 10 y 10 000 Å.
Diámetro aerodinámico	Diámetro de una partícula esférica de densidad igual a uno, que tiene en el aire la misma velocidad de sedimentación que la partícula considerada.

Difusión	Proceso físico irreversible, en el que partículas materiales se introducen en un medio que inicialmente estaba ausente.
Ducto	Conducto que cumple la función de transportar agua u otros fluidos.
Fracción respirable	Fracción de la masa de las partículas inhaladas que penetran a los conductos aéreos no ciliados.
Fuerzas centrífugas	Fuerza ficticia que aparece cuando se describe el movimiento de un cuerpo en un sistema de referencia en rotación.
Granulometría	Técnica para la medida del tamaño de las partículas que forman un material granuloso.
Ley de Stokes	Se refiere a la fuerza de fricción experimentada por objetos esféricos moviéndose en el seno de un fluido viscoso en un régimen laminar de bajos números de Reynolds.
Mesh	Lo representa el número de luces de mallas dentro de una pulgada inglesa, equivalente a 25,4 mm.
Micrón	Una unidad de medida que representa la milésima porción del milímetro, o sea 0,001 mm o, referido al metro, su millonésima porción.

Milímetros de columna de agua (mmcda)	Unidad de presión igual a la presión ejercida por una columna de agua de un milímetro de altura a temperatura estándar.
OHSAS	Occupational Health and Safety Assessment Series.
Partícula	Parte muy pequeña de alguna cosa o cuerpo muy pequeño.
Presión dinámica	Presión cinética en la dirección del flujo que es necesaria para hacer que un fluido en reposo fluya a una determinada velocidad.
Presión estática	Presión potencial ejercida en todas direcciones por un fluido en reposo.
Riesgo	Combinación de la probabilidad que ocurra un suceso o exposición peligrosa y la severidad del daño o deterioro de la salud que puede causar el suceso o exposición.
S&SO	Seguridad y salud ocupacional.
SHe	<i>Safety, health and environment.</i>
Tamiz	Cedazo muy tupido generalmente utilizado para la determinación de curvas granulométricas en varios materiales.

U.S. Sieve	Serie de escalas que se utilizan para clasificar los tamaños de partículas.
Velocidad de captura	Velocidad del aire en cualquier punto delante de la boca de una campana, o en la propia boca de la misma, necesaria para superar las corrientes de aire opuestas a la captación y aspirar el contaminante situado en ese punto, arrastrándolo hacia la campana.
Viscosidad	Característica de los fluidos en movimiento, que muestra una tendencia de oposición hacia su flujo ante la aplicación de una fuerza.

RESUMEN

El presente trabajo de graduación tiene como objetivo diseñar un sistema de extracción de partículas suspendidas de almidón en polvo del aire circundante de un área específica, donde se opera maquinaria que al entrar en funcionamiento permite la observación cualitativa de la existencia de partículas de almidón en polvo que median en el aire.

Al caracterizar el material particulado del sistema sólido-gas del área de estudio, se determinará la concentración media de partículas de almidón respirables consideradas como riesgo para la salud del trabajador. A partir del perfil que presente el material particulado existente en dicha área de estudio se validaron decisiones que facilitaron el diseño de un conjunto de separadores ciclónicos que, según su desempeño, separan el almidón en polvo de la corriente de aire extraída.

Los criterios por los cuales una partícula se considera respirable o nociva para la salud humana se encuentran descritos en la normativa OSHA, la cual describe la seguridad y salud en el puesto de trabajo. Esto forma parte de los objetivos institucionales actuales de la empresa, además de políticas internas, como la no emisión de contaminantes en los alrededores de la fábrica.

El sistema diseñado que se ha puesto a discusión en la presente investigación se realizó con el fin de dar una mejora al cuarto de grasas, de las instalaciones de Nestlé, fábrica Antigua Guatemala, km 46,5 carretera a Ciudad Vieja.

OBJETIVOS

General

Diseñar un sistema de separación sólido-gas en función del análisis granulométrico de los sólidos suspendidos del área de procesamiento de grasas, Nestlé, fábrica Antigua Guatemala.

Específicos

1. Determinar el perfil granulométrico de los sólidos en suspensión el área de procesamiento de grasas.
2. Con base en la normativa OHSAS 18001, establecer si el material particulado presente en el ambiente del área de investigación es perjudicial para la salud de los trabajadores.
3. Establecer el equipo de separación sólido-gas que se adapte mejor al proceso de eliminación de partículas suspendidas en el área de procesamiento de grasas.
4. Diseñar un sistema de ductos de carga y descarga del sistema de extracción de polvos, para recolectar los sólidos suspendidos en el aire del área.

INTRODUCCIÓN

La presente investigación evaluó estándares referidos a la normativa OHSAS sobre los límites permisibles de partículas respirables en la ventilación industrial, con el fin colaborar en la mejora continua de la fábrica en cuestiones de salud y seguridad industrial.

La normativa que se ha aplicado en esta investigación es de carácter internacional y en la actualidad existen casos aislados de su aplicación en el país, aunque la legislación nacional no ha adoptado para el monitoreo industrial de contaminantes en la diversidad de empresas que operan. Con el fin de implementar esta normativa y dar a conocer sus alcances, el presente diseño de investigación cita algunos de los puntos que confieren la previsión, control y posible eliminación de las causas que afectan la salud ocupacional, específicamente el sistema respiratorio del personal.

Con las referencias expuestas por los colaboradores del Departamento de Salud y Seguridad de la planta y los resultados de estudios previos, se atenderán las sugerencias con el fin de determinar si los límites permisibles descritos en la normas OHSAS de la calidad del aire industrial están fuera de los límites promedio de concentración de partículas dispersas en el aire circundante disponible para el factor humano que opera en el área de estudio.

La implementación de la normativa OHSAS tiene como objetivo presentar una propuesta con fines de control y monitoreo industrial que pueda ser aplicada a nivel nacional lo cual impactará directamente los sistemas de calidad, ambiente y seguridad ocupacional de organizaciones o empresas que

ya cuentan con el aval de sistemas de gestión compatibles con la normativa OHSAS.

1. ANTECEDENTES GENERALES

Dentro de la salud ocupacional y seguridad de la empresa Nestlé, fábrica Antigua Guatemala, se ha realizado la evaluación cualitativa a través de un recorrido, en conjunto con la supervisora *Safety, health and environment* de Nestlé y los consultores de salud y seguridad ocupacional, a todas las áreas de la fábrica siguiendo el flujo del proceso. Por medio de la inspección visual y sensorial, se identificaron aquellas áreas con emisiones, posible exposición de los trabajadores a los agentes de riesgos identificados y que tienen el potencial de afectar a la salud del trabajador.

Con estos antecedentes se realizaron informes donde se ha indicado “es importante mencionar que las evaluaciones cuantitativas muestran la situación del área en el momento preciso de la medición y bajo las condiciones en ese momento; por lo que hay que analizar cada área basándose también en los datos cualitativos, en las molestias referidas por los colaboradores y en resultados de estudios previo”¹. Con el fin de atender esta iniciativa, se evaluaron los riesgos a través de:

- Agentes físicos: ruido, iluminación y temperatura
- Agentes químicos: material particulado

¹ Nestlé, fábrica Antigua Guatemala. *Mediciones de higiene ocupacional*. p. 82.

El estudio abarcó la realización de una evaluación cualitativa y cuantitativa, y el estudio previo de las áreas mediante el análisis de riesgo realizado también por salud y seguridad ocupacional en 2008.

El análisis de resultados se presentó en el informe 2 de las mediciones de higiene ocupacional, *Material particulado en cuarto de grasas y temperatura*, sección IV, y se comparan con los valores recomendados por las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) emitidas por la Secretaría del Trabajo y Previsión Social para los agentes de riesgo: ruido, iluminación, y temperaturas extremas (NOM11, NOM25 y NOM15, respectivamente) y los recomendados por la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional, de Estados Unidos, para material particulado. Se utilizan estos criterios de referencia, debido a la ausencia de criterios establecidos por la legislación nacional de Guatemala.

Sin embargo, a pesar de haber incluido varios puntos de muestreo no fue hasta en el informe de realizado en el mes de febrero de 2013, donde el *staff* de salud seguridad y medio ambiente de fábrica Nestlé solicitó realizar dos mediciones adicionales: temperatura en hornos y material particulado en el área de grasas sólidas (cuarto de grasas), debido a que los equipos no se encontraron en funcionamiento en la primera evaluación realizada. En virtud de lo anterior, dichas mediciones se realizaron el martes 12 de febrero de 2013.

En dicho informe se analizaron dos puntos nuevos de muestreo, dentro del cuarto de grasas, siendo estos:

- PM-17: cuarto de grasas, Laska
- PM-18: cuarto de grasas, churros

Al final de las evaluación cualitativa practicadas, se detectaron áreas en las cuales se pudo observar altas concentraciones de material particulado, es el caso de cuarto de grasas; cuando se vacían sacos de almidón en polvo en la mezcladora Laska.

En el cuarto de grasas, aunque hay extractores, en todas las visitas realizadas al área, estos se encontraron apagados. Según refieren los operadores, nunca encienden el extractor pues hace demasiado ruido y no les permite oír el cambio de ruido que hace la mezcladora Laska cuando la mezcla de producto “está a punto”.

En el trabajo de graduación publicado en 2002 por Axel Felipe Girón Gonzáles, titulado *Diseño de sistemas de extracción de aire localizado*, se exponen procedimientos de cálculo esenciales para determinar diámetros de los conductos y pérdidas de carga en un sistema de extracción. En dicho trabajo de graduación el autor define la importancia de los sistemas de extracción de aire localizado, debido a que permiten eliminar los contaminantes generados por alguna operación, con la finalidad de mantener un ambiente de trabajo saludable y eliminar riesgos en la fabricación de los productos.

En 2009, Marlene Eunice Monterroso Castillo realizó en Industria La Popular el estudio titulado *Sistema de control de higiene enzimático, en una planta de detergente en polvo*, y explica que: “el polvo también plantea asuntos ambientales (...) en Guatemala no existe ley de emisiones, por lo que se toman las establecidas por OHSAS, OMS.”

Con lo indicado en ambos informes, se ha puesto de manifiesto la necesidad de buscar una solución a los problemas planteados. No obstante, en la actualidad nacional no se encuentran investigaciones relevantes que

ejemplifiquen la importancia de crear procesos de control de contaminantes particulados, con el objeto de eliminar dicho contaminante de las corrientes de aire dentro de una planta de producción de alimentos.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Generalidades sobre los procesos de separación

Eventualmente, el campo de acción de un ingeniero químico se ve ligado a los procesos de separación. En dicha rama de la ingeniería química se aplican procesos en los que es necesario separar los componentes de una mezcla en fracciones individuales. Las fracciones de los componentes pueden diferenciarse para ser desligadas unas de otras por medio de la diferencia de tamaño, forma, densidad, estado o por su composición química, así como su actividad eléctrica y magnética.

Entre los procesos de separación estudiados comúnmente se encuentran los de gas-líquido y vapor-líquido. Estos se basan en la difusión o vaporización de moléculas de una fase a otra. Existen también los procesos de separación líquido-líquido, en los cuales las dos fases líquidas son muy diferentes desde el punto de vista químico, lo que conduce a una separación a escala molecular dependiente de las propiedades fisicoquímicas. Además, entre estos procesos se consideran los de separación o lixiviación líquido-sólido. Una vez más, las diferencias en las propiedades fisicoquímicas de las moléculas conducen a una separación a escala molecular.

En las últimas décadas ha surgido un grupo de procesos de separación que no se lleva a cabo a escala molecular, ni se debe a diferencias entre las diversas moléculas presentes, los cuales se han llamado procesos de separación por membrana selectiva. En este tipo de procesos se logra la separación usando fuerzas físico-mecánicas y no fuerzas moleculares o

químicas ni difusión. Estas fuerzas físicomecánicas actúan sobre partículas, líquidos o mezclas de partículas y líquidos, y no necesariamente sobre moléculas individuales.

2.2. Separación de sólidos

De todas las formas y tamaños como se pueden encontrar los sólidos, la pequeña partícula es la más importante desde el punto de vista de ingeniería.

2.2.1. Introducción a los proceso de separación de sólidos

Es necesario un conocimiento de las características de masas de sólidos en forma de partículas para el diseño de procesos y del equipo que operan con corrientes que contienen tales partículas.

Cuando se separa un sólido puede hacerse a partir de:

- Otro sólido
- Gas
- Líquido

Equipos para separar sólidos en diversas corrientes se utilizan en muchas industrias de procesos. En estas unidades no se llevan a cabo procesos equivalentes a las reacciones químicas, solo se separan los componentes de una mezcla, de tal manera que si se mezclan las fracciones aisladas, se vuelve a tener prácticamente la mezcla original de la cual se partió. Los métodos de separación pueden clasificarse de acuerdo al número de fases presentes en la mezcla. En la tabla I se indican las fases involucradas en procesos de separación, junto con algunos ejemplos de los métodos que comúnmente se

utilizan para hacer la separación. Por ejemplo, si se quiere separar una mezcla sólida-sólida, se puede utilizar una fase adicional como aire. En otras palabras, se puede utilizar una segunda o tercera fase para lograr la separación del sistema bifásico inicial.

Tabla I. **Clasificación de métodos de separación según las fases involucradas**

Fases	Técnicas de separación
Sólido-sólido	Filtración Tamizado Flotación Clasificación por aire
Sólido-gas	Separación en ciclones Filtración
Sólido-líquido	Sedimentación Centrifugación Filtración Separación por membranas

Fuente: RHODES, M. *Introduction to particle technology*. p. 55.

En la industria alimentaria existen importantes aplicaciones de las técnicas de separación, por ejemplo, la separación de polvo (resultante de procesos de molienda) de corrientes de aire, la recuperación de productos deshidratados (como la recuperación de leche en polvo del aire utilizado para lograr la evaporación de agua). De las técnicas mencionadas en la tabla I solo se discutirán algunas de ellas.

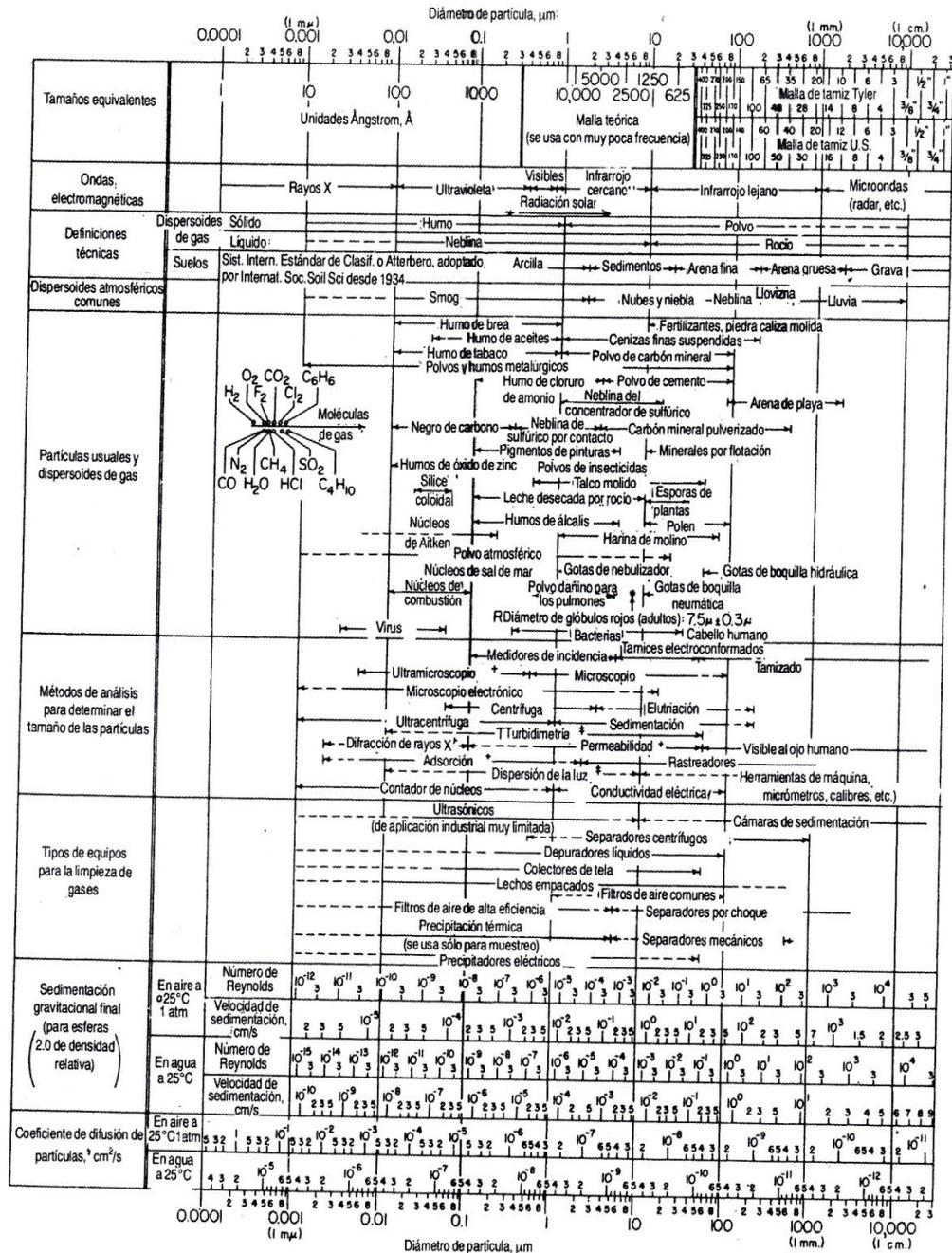
2.2.2. Propiedades de las dispersiones de partículas

Es importante el conocimiento de las propiedades y características fundamentales de las dispersiones o coloides para el diseño del equipo industrial para el control de polvo. En la figura 1 se muestran las características, junto con los tipos de equipos para la limpieza de gas que se utilizan para su control.

Existen dos tipos de dispersiones sólidas:

- El polvo que está compuesto de partículas mayores de 1 μm
- Humos, que por lo general constan de partículas menores a 1 μm

Figura 1. Características de las partículas y dispersoides de partículas



* Diámetros moleculares calculados basándose en datos de viscosidad a 0°C
 † Indica el diámetro promedio de partícula, pero no la distribución de tamaño.
 ‡ La distribución de tamaño se puede obtener por calibración especial.
 § Se incluye el factor de Stokes-Cunningham en los valores estipulados para el aire pero no para el agua.

Fuente: PERRY, R. H.. *Manual de ingeniero químico*. p. 80.

Los polvos son, generalmente, resultado de la desintegración mecánica de la materia y se pueden dispersar a partir de la fracción sedimentada o másica mediante un chorro de aire. Los humos son coloides en sublimación y condensación. Una vez recolectados, los humos no pueden volverse a dispersar a partir de la fracción sedimentada a su estado original por medio de chorros de aire o algún equipo mecánico de dispersión.

La característica principal para distinguir dispersiones es el diámetro de partícula. La unidad aceptada para el diámetro de partícula es el micrómetro ($1 \mu\text{m}$)². Por lo general el diámetro de partícula de dispersoide se toma como el diámetro de una esfera que tiene la misma masa y densidad que la partícula en cuestión. Otro método consiste en designar el tamiz que tiene una malla con una abertura que corresponde al diámetro de la partícula; también debe especificarse la escala del tamiz, para evitar confusiones.

Desde el punto de vista del diseño y funcionamiento de la unidad de recolección, la propiedad más importante relacionada con el diámetro de una partícula de polvo es su comportamiento dinámico. Una partícula mayor de $100 \mu\text{m}$ presenta mayores dificultades en la retención por la resistencia al movimiento en un gas. Para este tipo de partículas la especificación más útil es el diámetro de sedimentación de Stokes, el diámetro de una partícula esférica con la misma densidad y con la misma velocidad terminal en flujo viscoso que el de la partícula en cuestión. Sin embargo, en muchas circunstancias conviene más utilizar el diámetro aerodinámico, que es el diámetro de una partícula con densidad unitaria (1g/cm^3) y que tiene la misma velocidad terminal de sedimentación. El empleo del diámetro aerodinámico permite la comparación

²Antes de la adopción del sistema SI, la misma unidad se conocía como micra y se designaba por la letra μ .

directa del comportamiento de las partículas, que en realidad tienen densidad, forma y tamaño diferentes.

Cuando el diámetro de una partícula se aproxima al número de orden de magnitud de la trayectoria media libre de las moléculas de gas, la velocidad de sedimentación es mayor que la calculada por medio de la ley de Stokes debido al deslizamiento molecular. La corrección de flujo por deslizamiento es significativa en partículas menores de $1 \mu\text{m}$ y se tiene en cuenta mediante las correcciones de Cunningham a la ley de Stokes. La corrección de Cunningham se aplica en el cálculo del diámetro aerodinámico para las partículas que se encuentran en el intervalo adecuado.

A pesar de que las partículas de humo pueden variar en tamaño hasta $0,001 \mu\text{m}$, las partículas finas menores a aproximadamente $0,1 \mu\text{m}$ no tienen mucha repercusión en las fuentes potenciales industriales de polvo y humo, ya que su masa agregada y acumulada es solo una fracción muy pequeña de lo que representa la emisión total. En las concentraciones a las que se presentan en dichas fuentes, la velocidad de coagulación o floculación de las partículas, ultrafinas es extremadamente elevada y las partículas crecen con rapidez hasta diámetros de $0,1 \mu\text{m}$ o mayores. En consecuencia, las partículas más difíciles de retener son las que se encuentran en el intervalo de $0,1$ a $2 \mu\text{m}$, en el que las fuerzas de precipitación por inercia son pequeñas. Para la recolección de partículas de diámetro inferiores a $0,1 \mu\text{m}$, la sedimentación por difusión adquiere gran importancia a medida que disminuye el diámetro de la partícula.

En una corriente de gas que contiene polvo o humo, existe cierto grado de floculación de las partículas y, en consecuencia, estarán presentes tanto partículas discretas como aglomerados de partículas adheridas. Las partículas discretas podrán aglomerarse unas con otras, ya que sobre ellas actúan fuerzas

tipo Van der Waals. La floculación aumenta cuando lo hace la concentración de las partículas y puede influir en el rendimiento del precipitador.

2.3. Medición de partículas

La medida de la concentración y las características del polvo disperso en el aire y otros gases puede ser necesaria:

- Para determinar la necesidad del establecimiento de medidas de control
- Para cumplir con los requerimientos legales
- Para recabar información con objeto de diseñar el recolector
- Para determinar su rendimiento

2.3.1. Medición de la contaminación atmosférica

La medición de la precipitación de partículas es uno de los métodos más empleados para obtener una evaluación relativa, durante un período prolongado, de la contaminación del aire por partículas. Las densidades de los humos de chimenea se clasifican a menudo por un método visual que utiliza la gráfica de Ringlemann. La opacidad en forma continua y registrada por medio de un dispositivo fotoeléctrico que mide la cantidad de luz transmitida a través del penacho de humo. El equipo para efectuar mediciones locales de la concentración de polvo atmosférico se clasifica en cinco tipos generales:

- Medidor de incidencia o choque
- Precipitador térmico o de hilo caliente
- Precipitador electrostático
- Filtro
- Impactadores y ciclones

Los muestreadores de este tipo se emplean comúnmente para determinar las emisiones de masa y la distribución de tamaño de las partículas. Los impactadores y ciclones pequeños se utilizan como muestreadores para la discriminación de tamaños y, por lo general, están seguidos por filtros para la determinación de la fracción más fina del polvo.

2.3.2. Muestreo de gases de proceso

En el muestreo de gases de proceso, para determinar la concentración de polvos o para obtener una muestra de polvo representativa, es necesario tomar precauciones especiales para evitar la segregación de las partículas por inercia. Para evitar este tipo de clasificación, quizá se requiera un ducto transversal y, en cada punto, la boquilla de muestreo puede dar la cara directamente a la corriente de gas, además, la velocidad en la entrada de la boquilla deberá ser igual que la velocidad normal del gas en dicho punto. Este proceso es lo que conoce como muestreo isocinético. Si la velocidad de muestreo es demasiado alta, la muestra de polvo contendrá una concentración menor de polvo que la que existe en la corriente principal y el mayor porcentaje corresponderá a partículas finas. Si la velocidad de muestreo es demasiado baja, la muestra de polvo contendrá una mayor concentración de polvo y el mayor porcentaje corresponderá a partículas gruesas.

2.4. Procesos de separación físicomecánica

Con frecuencia es necesario separar los componentes de una mezcla en fracciones individuales. Las fracciones pueden diferir entre sí en el tamaño de partícula, fases o composición química. Así, un producto crudo puede purificarse separando del mismo las impurezas; dos o más productos de una mezcla se pueden separar en los productos individuales puros; la corriente

procedente de una etapa del proceso puede consistir en una mezcla del producto y de las materias primas no convertidas que debe separarse y recircular las materias primas a la zona de reacción para su posterior tratamiento; o bien una sustancia valiosa, tal como un mineral metálico, disperso en una masa de material inerte, ha de liberarse con el fin de recuperarlo y retirar el material inerte.

Se han desarrollado numerosos métodos para llevar a cabo estas separaciones y existen distintas operaciones unitarias con esta finalidad. En la práctica, se presentan muchos problemas de separación, teniendo el ingeniero que elegir el método que mejor se adapte a la resolución.

Los procedimientos para separar los componentes de una mezcla se clasifican en dos grupos, el que constituyen las denominadas operaciones difusionales, que implican cambios de fases o transporte de materia de una fase a otra, y el que comprende a aquellos métodos llamados separaciones mecánicas, útiles para separar partículas sólidas o gotas líquidas.

Las separaciones mecánicas son aplicables a mezclas heterogéneas y no a disoluciones homogéneas. Los coloides, que son una clase intermedia de mezclas, generalmente no se tratan este método, que está dedicado fundamentalmente a partículas superiores a $0,1 \mu\text{m}$.

Las técnicas están basadas en las diferencias físicas entre las partículas, tales como tamaño, forma o densidad. Son aplicables a la separación de sólidos, gases, gotas líquidas de gases, sólidos de sólidos y sólidos de líquidos. Dos métodos generales son la utilización de un tamiz, tabique o membrana, tales como una criba o un filtro, que retienen uno de los componentes y dejan pasar el otro. También, la utilización de la diferencia en las velocidades de

sedimentación de partículas o gotas cuando se desplazan en el seno de un líquido o un gas. Para problemas especiales se utilizan otros métodos que se basan en la humectabilidad o en las propiedades eléctricas o magnéticas de las sustancias.

2.4.1. Clasificación de los procesos de separación físicomecánica

El problema general de la separación de partículas sólidas de líquidos se puede resolver usando gran diversidad de métodos, dependiendo del tipo de sólido, de la proporción de sólido a líquido en la mezcla, de la viscosidad de la solución y de otros factores.

2.4.1.1. Filtración

En la filtración se establece una diferencia de presión que hace que el fluido circule a través de poros pequeños que impiden el paso de las partículas sólidas, las que, a su vez, se acumulan sobre la tela como torta porosa.

2.4.1.2. Precipitación y sedimentación

Las partículas se separan del fluido debido a las fuerzas gravitacionales que actúan sobre las partículas de tamaños y densidades diferentes.

2.4.1.3. Precipitación y sedimentación por centrifugación

En las separaciones por centrifugación, las partículas se separan del fluido a causa de las fuerzas centrífugas que actúan sobre las partículas de

tamaños y densidades diferentes. Se usan dos tipos generales de procesos de separación. En el primer tipo de proceso se lleva a cabo una precipitación o sedimentación por centrifugación.

El segundo tipo de proceso de separación por centrifugación es la filtración centrífuga, la cual se asemeja a la filtración ordinaria en la que un lecho o torta de sólidos se acumula en una pantalla, pero se utiliza la fuerza centrífuga para provocar el flujo en lugar de una diferencia de presión.

2.4.1.4. Reducción mecánica de tamaño y separación

Las partículas sólidas se fragmentan por medios mecánicos en tamaños más pequeños y se separan de acuerdo con sus dimensiones.

2.5. Separación por tamaño

El tamizado es un método de separación de partículas basado exclusivamente en el tamaño de las mismas.

2.5.1. Operación de tamizado

En el tamizado industrial, los sólidos se sitúan sobre la superficie del tamiz. Los de menor tamaño, o finos, pasan a través del tamiz, mientras que los de mayor tamaño, o colas, no pasan. Un solo tamiz puede realizar una separación en dos fracciones. Dichas fracciones no están dimensionadas, ya que, si bien se conocen los límites superior o inferior de los tamaños de partícula de cada una de las fracciones, no se conocen los demás límites de tamaños. El material que se hace pasar a través de una serie de tamices de diferentes tamaños se separa en fracciones clasificadas por tamaños, es decir,

fracciones en las que se conocen los tamaños máximo y mínimo de las partículas.

Ocasionalmente, el tamizado se realiza en húmedo, si bien, lo más frecuente es operar en seco. Los tamices industriales se construyen con tela metálica, telas de seda o plástico, barras metálicas, placas metálicas perforadas, o alambres de sección transversal triangular. Se utilizan diferentes metales, siendo el acero al carbono y el acero inoxidable los más frecuentes. Los tamaños de los tamices normalizados están comprendidos entre 4 pulg y 400 mallas, y se dispone de tamices comerciales de tela metálica con aberturas tan pequeñas como 1 μm . Los tamices más finos, aproximadamente de 150 mallas, no se utilizan habitualmente debido a que con partículas muy finas generalmente resultan más económicos otros métodos de separación.

La separación en el intervalo de tamaños entre 4 y 48 mallas recibe el nombre de tamizado fino y para tamaños inferiores a 48 mallas el tamizado se considera ultrafino.

2.5.2. Tamices

Cualquier estudio sobre el comportamiento del equipo de separación por tamaños, o el de machacado y molido, implica la determinación de la cantidad de material de diferentes tamaños que hay presente. El único método general y práctico para ello, es determinar la fracción de la muestra que pasa a través de un tamiz con una apertura de malla dada. Antiguamente se acostumbraba a especificar los tamices simplemente por el número de mallas por pulgada lineal. Así, un análisis granulométrico puede indicar el porcentaje en peso del material que pasa a través de un tamiz de 10 mallas y es retenido

por el de 20, el que pasa a través del de 20 es retenido por el de 30, el que pasa a través del de 30 y es retenido por el de 40, y así sucesivamente.

Este resultado es muy incorrecto y nunca debe emplearse a menos que se especifiquen los números de tamices. La razón estriba en que los tejidos de hilo para un número de mallas por pulgada determinado se fabrican con una gran variedad de diámetros y, a medida que varía este, la apertura de la malla también varía. Esto queda reflejado en la tabla II, que hace ver lo improcedente de especificaciones como tamiz de 30 mallas, y que eligiendo el diámetro de los hilos convenientemente, se puede fabricar desde 20 a 35 mallas por pulgada con casi la misma apertura de malla.

Tabla II. **Variación de las aperturas de los tamices con el número de mallas y diámetro del hilo**

Número de mallas	Diámetro del hilo, micrones	Apertura de mallas, micrones
30	432	414
30	356	490
30	305	541
30	254	592
30	203	643
20	813	457
22	711	445
26	508	470
28	457	450
30	381	465
35	280	447

Fuente: BAGDER, Walter; BANCHERO, Julius. *Introducción a la ingeniería química*. p. 639.

2.5.3. Tamices normales

Se han propuesto varias escalas de tamices normalizados, en los que se especifican el diámetro del hilo y el número de mallas por pulgada de tal forma que existe una relación directa entre las aperturas en un tamiz y el que le sigue en serie. Una serie corriente de tamices normales es la escala de tamices normales Tyler. Está basada en el tamiz de 200 mallas con hilos de 0,0021 pulgadas de diámetro, que dan una superficie libre de 0,0029 pulg². Los tamices gruesos que se suceden tienen aperturas de mallas y diámetros de hilo elegidos de tal forma que el área de la apertura de un tamiz es aproximadamente el doble de la del más fino que le sigue.

Esto indica que el tamaño lineal de las aperturas entre dos tamaños sucesivos de tamices están en la relación $1:\sqrt{2}$. En el anexo 1 del presente trabajo de graduación se detalla una tabla completa de estos tamices. Normalmente, el tamiz más pequeño que se utiliza es el de 200 mallas, aunque se dispone de varios tamices más pequeños que llegan a 400 y más, pero que se emplean rara vez, excepto en investigaciones de laboratorio.

Otra especificación casi igualmente corriente para tamices normales es la M.S. Standard. En ella se utiliza el tamiz normal Tyler de 200 mallas, pero difiere ligeramente en otros tamaños. La diferencia entre las dos especificaciones es menor que las tolerancias permitidas en los tejidos de los tamices, por lo que las dos especificaciones pueden considerarse equivalentes.

2.6. Análisis granulométrico

Los sólidos de pequeño tamaño se especifican generalmente de acuerdo con su análisis granulométrico. Este análisis para un material dado se efectúa

colocando una muestra del mismo sobre el tamiz de mayor apertura de malla de una serie de ellos. Por debajo de este tamiz se colocan los restantes de la serie por orden decreciente de tamaño de mallas. Las columna o pila de tamices, con la muestra sobre el superior, se sacude o agita en una forma prefijada, mecánicamente o a mano, durante un tiempo también determinado, recogiendo y pesando el material que es retenido por cada tamiz de la serie.

En la tabla III se da el análisis granulométrico de una muestra. Las columnas primera y cuarta son los datos obtenidos experimentalmente. La segunda de la apertura nominal de mallas en micrones, obtenida en el *Manual del ingeniero químico*. La tercera columna da el tamaño medio de la partícula de la fracción de muestra retenida por cada tamiz, calculado como media aritmética de las dos aperturas de malla utilizadas para obtener la fracción. Por ejemplo; el material que pasa a través del tamiz de 14 mallas y es retenido por el de 20 (apertura 1.168 y 833 micrones, respectivamente) se especifica como que tiene un tamaño medio de partículas de 1,000 micrones. Las columnas quinta y sexta representan otras formas adicionales en que pueden darse los análisis granulométricos y que se obtienen por simple cálculo a partir de la columna 4.

Tabla III. **Análisis por tamaños de una muestra**

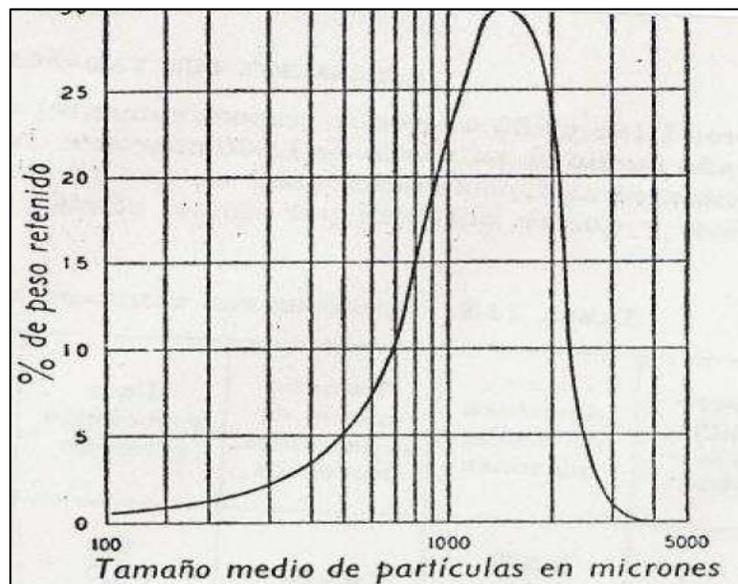
Número de mallas serie Tyler	Apertura de malla, micrones	Tamaño medio de la partícula, micrones	Peso por ciento retenido	Acumulación por ciento de mayor tamaño	Acumulación por ciento de menor tamaño
6	3,327		0,0	0,0	100,0
8	2,362	2,845	1,7	1,7	98,3
10	1,651	2,006	23,5	25,2	74,8
14	1168	1,410	29,8	55,00	45,0
20	833	1,000	21,7	76,7	23,3
28	589	711	10,5	87,2	12,8
35	417	503	6,2	93,4	6,6
48	295	356	2,8	96,2	3,8
65	208	252	1,7	97,9	2,1
100	147	178	1,0	98,9	1,1
150	104	126	0,5	99,4	0,6
200	74	89	0,2	99,6	0,5
>200			0,4		
TOTAL			100,0		

Fuente: BAGDER, Walter; BANCHERO, Julius. *Introducción a la ingeniería química*. p. 639.

La representación gráfica del análisis granulométrico puede hacerse de diferentes formas. En la figura 2 se representa el diagrama que se obtiene al construir el gráfico del peso de muestra retenido (expresado en porcentaje) en función del tamaño medio de la partícula (micrones), y que se denomina gráfico de distribución de frecuencias de tamaño. En la figura 3 se presenta la curva obtenida al construir el gráfico del peso total de muestra que tiene un tamaño mayor o menor que una apertura de malla determinada en función de la apertura de malla; el diagrama se denomina acumulativo-distribución de tamaños.

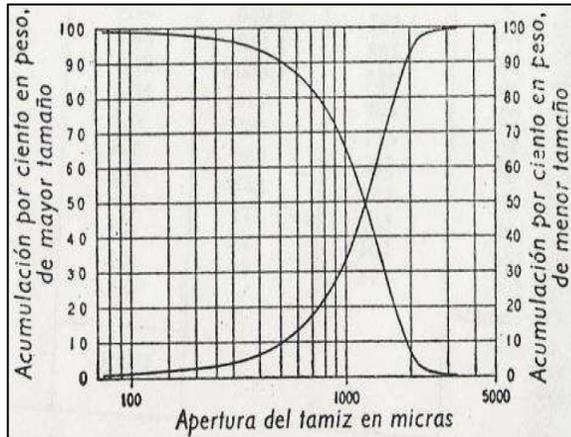
Otro método, representado en la figura 4, es el denominado logaritmo-probabilidad, que se obtiene al llevar en ordenadas el logaritmo de la apertura de mallas en micrones y en abscisas el peso acumulado por encima (o por debajo) de una apertura dada. La escala horizontal es una escala de probabilidad elegida de forma que la probabilidad normal esté representada por un línea recta. Aunque en la figura aparece una línea curva, muchos materiales tienen su representación como una recta. En cualquier caso, este tipo de gráfico ofrece un método conveniente de representación porque la curvatura normalmente no es muy grande.

Figura 2. **Frecuencia-distribucion de tamaños**



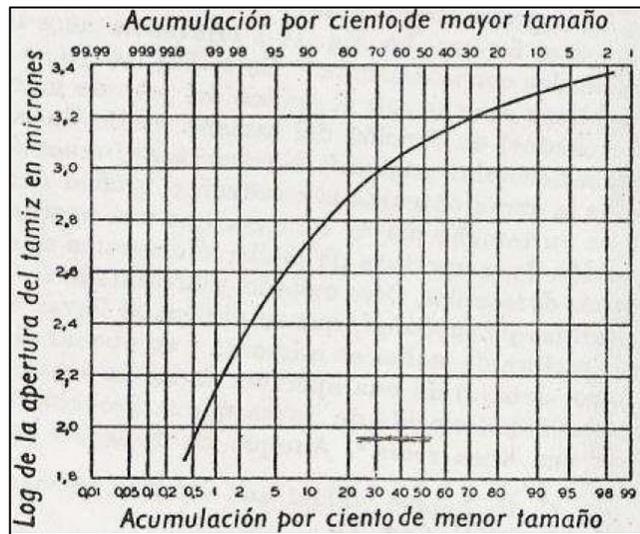
Fuente: BAGDER, Walter; BANCHERO, Julius. *Introducción a la ingeniería química*. p. 642.

Figura 3. Acumulación de tamaños-distribución



Fuente: BAGDER, Walter; BANCHERO, Julius. *Introducción a la ingeniería química*. p. 642.

Figura 4. Diagrama logaritmo-probabilidad



Fuente: BAGDER, Walter; BANCHERO, Julius. *Introducción a la ingeniería química*. p. 642.

2.7. Separación gas-sólido

Es cuando las partículas se separan del gas por sucesivos impactos en cuerpos colectores dispuestos en la trayectoria de la corriente gaseosa.

2.7.1. Mecanismos de recolección de polvos

Las operaciones básicas en la recolección de polvo por medio de cualquier dispositivo son:

- La separación de partículas transportadas por el gas de la corriente gaseosa por deposición sobre una superficie de recolección.
- La retención del depósito sobre la superficie.
- La eliminación del depósito recolectado sobre la superficie para su recuperación o desecho.

El paso de separación requiere:

- La aplicación de la fuerza que produzca un movimiento diferencial de la partícula con relación al gas.
- Un tiempo suficiente de recolección.

En la mayor parte del equipo de recolección de polvo se utiliza más de un mecanismo de recolección y en algunos casos el mecanismo de control puede cambiar cuando el recolector se opera en un intervalo amplio de condiciones.

En consecuencia, los recolectores se clasifican en forma más conveniente por su tipo en lugar del mecanismo de recolección con el que operan.

2.7.2. Propósito de la recolección de polvos

La recolección de polvo se ocupa de la separación o retención de dispersiones de partículas y sólidos de los gases con los siguientes objetivos:

- Control de la contaminación del aire, como la eliminación de cenizas muy finas de los gases de combustión de una planta de producción de energía.
- Reducción del mantenimiento de equipo; como en la filtración del aire de entrada de un motor o en el tratamiento del gas de horno de piritas, antes de su entrada a la planta de ácido sulfúrico por el método de contacto.
- Eliminación de riesgo contra la seguridad o la salud como en la retención de polvos silíceos y metálicos, en las cercanías de equipos de trituración y perforación y en algunas operaciones metalúrgicas, y polvos que se desprenden al efectuarse operaciones de molienda o envasado.
- Mejora de la calidad del producto; como la limpieza purificación del aire en la industria farmacéutica o en la fabricación de película fotográfica.
- Recuperación de un producto valioso; como en la recolección de polvos de unidades de secado y fundición.

- Recolección de productos en forma de polvo; como en transporte neumático; el secado mediante pulverización de leche, huevos y jabón, y la elaboración de óxido de zinc y negro de humo de alta pureza.

2.8. Diseño del recolector de polvo

En el equipo de recolección de polvo, la mayor parte de los mecanismos de recolección, o todos, pueden operar en forma simultánea y su importancia relativa se determina mediante las características del gas y la partícula, la geometría del equipo y el patrón de flujo del fluido. A pesar de que el caso general es extremadamente complejo por lo común, en casos específicos es posible determinar qué mecanismo o mecanismos ejercen el control.

Sin embargo, la dificultad del tratamiento teórico de los fenómenos de recolección de polvo hace necesario el empleo de suposiciones para simplificar, con la introducción de las incertidumbres correspondientes. Los estudios teóricos han sido obstaculizados por la falta de técnicas adecuadas de experimentación para verificar los cálculos. A pesar de que el tratamiento teórico del rendimiento de recolectores se ha ampliado considerablemente, solo unos cuantos modelos resultantes de comportamiento se han verificado experimentalmente en forma adecuada, debido a las limitaciones experimentales.

Los modelos mejor establecidos del rendimiento o comportamiento de los recolectores son los de filtros fibrosos y los filtros granulares con lechos fijos, en los cuales las estructuras y los patrones del flujo del fluido están definidos. Estos dispositivos también se adaptan a pruebas de pequeña escala en condiciones controladas de laboratorio. El diseño de recolectores a escala industrial aún se encuentra basado esencialmente en métodos empíricos o

semiempíricos, no obstante que está guiado, cada vez más, por conceptos obtenidos de la teoría. Los modelos teóricos existentes incorporan con frecuencia constantes, que se deben evaluar en forma experimental y que en realidad pueden compensar las deficiencias de los modelos.

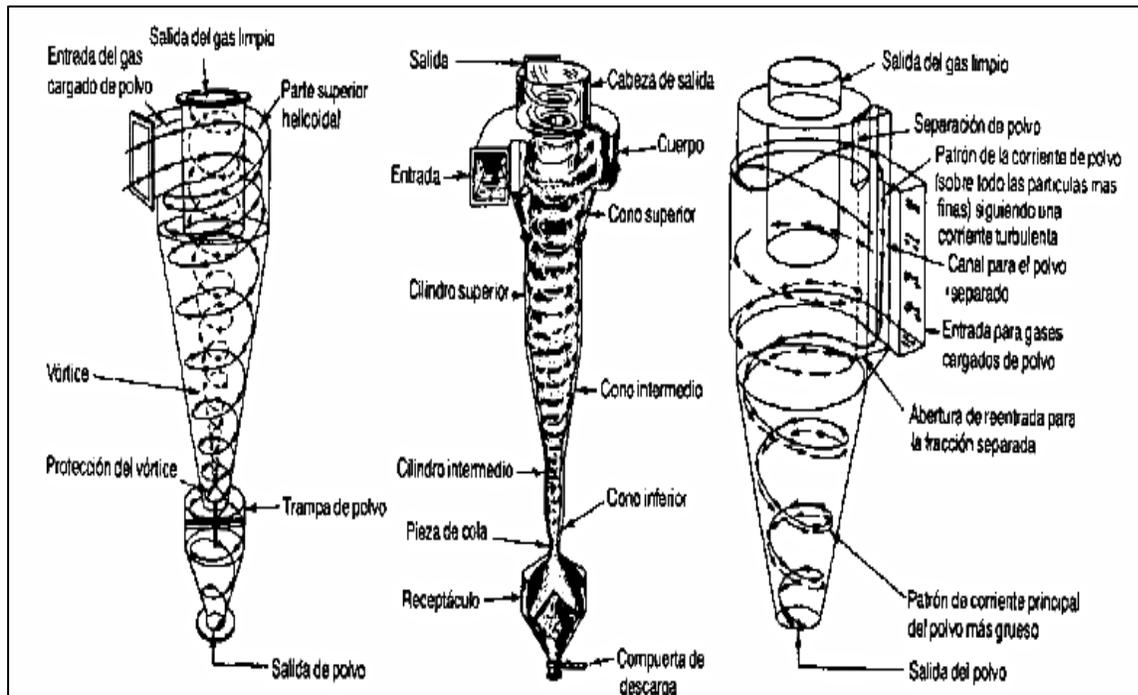
2.8.1. Equipos de recolección de polvo, sepador ciclónico para gas-sólido

Sirven para remover polvos principalmente constituidos por partículas con diámetros mayores a 10-20 μm .

2.8.1.1. Separdor de ciclón para gas-sólido

La mayor parte de los separadores centrífugos para retirar partículas de corrientes gaseosas no contienen partes móviles. El dispositivo típico es el separador de ciclón que se representa en la figura 5. Consiste en un cilindro vertical con un fondo cónico, una entrada tangencial cerca de la parte superior y una salida para el polvo situada en el fondo del cono. La entrada generalmente es rectangular. La conducción de salida se prolonga dentro del cilindro para evitar que se forme un cortocircuito de aire desde la entrada hasta la salida.

Figura 5. Tipos de separadores ciclónicos



Fuente: GEANKOPLIS, C.J. *Principios de transporte y operaciones unitarias*. p. 70.

El aire entra cargado de polvo recorre un camino en espiral alrededor y hacia abajo del cuerpo cilíndrico del ciclón. La fuerza centrífuga desarrollada en el vértice tiende a desplazar radialmente las partículas hacia la pared, de forma que aquellas que alcanzan la pared se deslizan hacia abajo dentro del cono y se recogen.

El ciclón es esencialmente un dispositivo de sedimentación en el que una intensa fuerza centrífuga, que actúa radialmente, es la que se utiliza, en lugar de una fuerza gravitacional relativamente débil dirigida verticalmente.

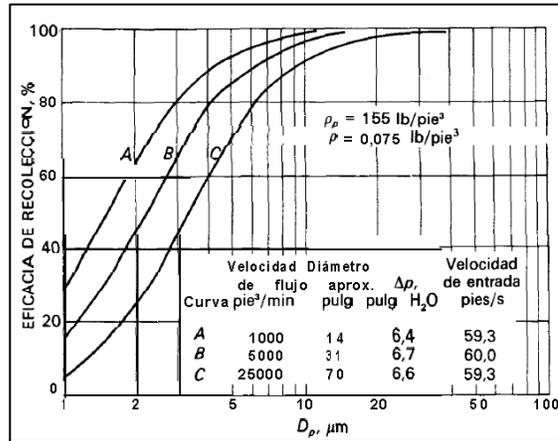
La fuerza centrífuga F_c correspondiente al radio r es igual a mu_{tan}^2/rg_c , donde m es la masa de la partícula y u_{tan} es su velocidad tangencial. La relación entre la fuerza centrífuga y la fuerza de gravedad es:

$$\frac{F_c}{F_g} = \frac{m u_{tan}^2 / r g_c}{m g / g_c} = \frac{u_{tan}^2}{r g}$$

Para un ciclón de 1 pie de diámetro con una velocidad tangencial de 50 pie/s cerca de la pared, la relación F_c/F_g , que recibe el nombre de factor de separación, es $2500/(0,5 \times 32,2) = 155$. Un ciclón de gran diámetro tiene un factor de separación mucho menor para la misma velocidad y velocidades superiores a 50-70 pies/s (15 a 20 m/s) no se pueden utilizar normalmente en la práctica, debido a la elevada caída de presión y al aumento de la abrasión. Los ciclones de pequeño diámetro pueden tener factores de separación tan elevados como 2500. Para tratar grandes flujos de gas se pueden acoplar numerosos ciclones de pequeño diámetro en una sola cámara con conducciones comunes para la alimentación y los gases que salen, así como un único colector de polvo.

Las partículas de polvo que entran en el ciclón son aceleradas radialmente, pero la fuerza que actúa sobre una partícula no es constante debido a la variación de r y también a que la velocidad tangencial en el vórtice varía con r y con la distancia por debajo de la entrada. El cálculo de las trayectorias de las partículas es difícil, por lo que la eficacia de un ciclón se predice ordinariamente a partir de correlaciones empíricas. Datos típicos para ciclones comerciales se presentan en la figura 6, que muestra los fuertes efectos del tamaño de las partículas y del diámetro del ciclón sobre la eficacia.

Figura 6. **Eficiencias de separación de ciclones típicos**



Fuente: GEANKOPLIS, C.J. *Principios de transporte y operaciones unitarias*. p. 70.

Los tres ciclones son de proporciones similares, con diámetros del orden de 14, 31 y 70 pulg, y la menor eficacia de los ciclones más grandes es consecuencia principalmente de la disminución de la fuerza centrífuga. Para una determinada velocidad de flujo de aire y de velocidad de entrada, moderados incrementos en el diámetro del ciclón mejoran la eficacia de separación, debido a que el aumento de superficie compensa sobradamente la disminución de la fuerza centrífuga. Los resultados de la figura 6 son para ciclones de tamaño intermedio, y cabe esperar eficacias más altas o más bajas con unidades mayores o menores para la misma velocidad de flujo y la misma velocidad de entrada.

La disminución de la eficacia al disminuir el tamaño de las partículas en realidad es más gradual que la predicha por teorías sencillas. Para partículas pequeñas, la velocidad radial y la eficacia de separación serán una función de D_p^2 , pero puede producirse aglomeración de partículas finas, aumentando la eficacia para estas partículas. Debido al efecto del tamaño de las partículas, el

polvo no recogido que sale con el gas tiene un tamaño medio mucho menor que el del polvo que entra, lo cual puede ser importante al establecer los límites de emisión.

Por otra parte, la eficacia global es una función de la distribución de tamaños de las partículas y no se puede predecir a partir del tamaño medio. La eficacia de separación de un ciclón aumenta con la densidad de las partículas y disminuye al aumentar la temperatura del gas debido al aumento de la viscosidad del gas. La eficacia depende mucho de la velocidad de flujo debido al término u_{tan}^2 . El ciclón es uno de los pocos dispositivos de separación que opera mejor a toda carga que con carga parcial. A veces se utilizan dos ciclones idénticos en serie para obtener una separación más completa de los sólidos, pero la eficacia de la segunda unidad es menor que la de la primera debido a que la alimentación de la segunda unidad tiene un tamaño de partículas mucho menor.

Los ciclones también se utilizan ampliamente para separar sólidos de líquidos, especialmente con fines de clarificación.

2.8.1.2. Detalles operativos prácticos

- Abrasión: el material del ciclón debe seleccionarse adecuadamente debido al gran desgaste que ocasiona el continuo paso de material sólido.
- Bloqueo de la descarga: cuando se sobrecarga el ciclón, se puede recargar de sólidos el orificio de salida, siendo esta una de las causas más comunes de la falla de la separación. En este caso la caída de presión aumenta abruptamente y la eficiencia de separación cae.

- Ciclones en serie: se colocan ciclones en serie cuando se desea aumentar la eficiencia del proceso.
- Ciclones en paralelo: para un dado tipo de ciclón y una caída de presión definida, el tamaño de corte cae si se disminuye el tamaño del ciclón. El tamaño del ciclón queda definido por el número de Euler y el caudal de gas que circula por el ciclón. Si el caudal de gas que se debe circular es muy grande, el diámetro del ciclón debe ser grande, pero consecuentemente el tamaño de corte puede adquirir valores excesivamente grandes. Por esta razón, puede ser conveniente dividir el caudal de gas original y trabajar con varios ciclones en paralelo.

2.9. Factores de riesgo ocupacionales

La higiene ocupacional es la ciencia que tiene por objeto el reconocimiento, la evaluación y el control de agentes ambientales generados en el lugar de trabajo y que pueden causar enfermedades. Estudia, evalúa y controla factores ambientales existentes en lugar de trabajo, cuyo objetivo es prevenir las enfermedades profesionales que afectan la salud y bienestar del trabajador.

2.9.1. Factores de riesgo químicos

Sustancias orgánicas, inorgánicas, naturales o sintéticas que pueden presentarse en diversos estados físicos en el ambiente de trabajo, con efectos irritantes, corrosivos, asfixiantes o tóxicos y en cantidades que tengan probabilidades de lesionar la salud las personas que entran en contacto con ellas.

2.9.2. Clasificación

- Gaseosos

Son aquellas sustancias constituidas por moléculas ampliamente dispersas a la temperatura y presión ordinaria (25 °C y 1 atm), ocupando todo el espacio que lo contiene. Comúnmente son gases o vapores de productos volátiles.

- Particulados

Constituidos por partículas sólidas o líquidas, que se clasifican en: polvos, humos, neblinas y nieblas.

2.9.3. Polvo

Partícula sólida producida por ruptura mecánica, ya sea por trituración, pulverización o impacto, en operaciones como molienda, perforación, esmerilado, lijado, entre otros.

El tamaño de las partículas de polvo es generalmente menor de 100 μm , siendo las más importantes aquellas menores de 10 μm . Los polvos pueden clasificarse en dos grupos: orgánicos o inorgánicos. Los orgánicos se subdividen en naturales y sintéticos; entre los orgánicos naturales se encuentran los provenientes de la madera, algodón, bagazo, y entre los orgánicos sintéticos, los plásticos y numerosos productos y sustancias orgánicas. Los polvos inorgánicos son partículas finamente polvoreadas de una sustancia inorgánica, especialmente el polvo que, inhalado, puede producir procesos patológicos en los pulmones.

2.9.4. Gestión ambiental

Es un grupo de elementos interrelacionados usados para establecer la política y los objetivos. Para cumplir con estos objetivos, se incluye la estructura de la organización, la planificación de actividades, las responsabilidades, las prácticas, los procedimientos, los procesos y los recursos.

2.9.5. Sistemas de gestión de seguridad y salud ocupacional OHSAS 18001

La seguridad y salud en el lugar de trabajo son claves para cualquier organización, ya que de qué sirve producir en una empresa si las personas que trabajan en ella van a ser lastimadas y explotadas.

OHSAS 18001 es una especificación internacionalmente aceptada que define los requisitos para el establecimiento, implantación y operación de un sistema de gestión en seguridad y salud ocupacional efectivo. La OHSAS 18001 está dirigida a organizaciones comprometidas con la seguridad de su personal y lugar de trabajo.

2.9.5.1. Alcance y campo de aplicación

La serie de normas OHSAS especifica los requisitos para un sistema de gestión de seguridad y salud ocupacional que permita a una organización controlar sus riesgos de seguridad y salud ocupacional y mejorar su desempeño.

Esta norma OHSAS especifica requisitos para un sistema de gestión de seguridad y salud ocupacional para permitir a una organización desarrollar e

implementar una política y objetivos que toman en cuenta requisitos legales e información acerca de los riesgos de seguridad y salud ocupacional. Está hecha para aplicarse a todos los tipos y tamaños de organizaciones y para acomodar diversas condiciones geográficas, culturales y sociales. El éxito del sistema depende del compromiso de todos los niveles y funciones de la organización y, especialmente, de los altos mandos. Un sistema de este tipo permite que una organización desarrolle una política de seguridad y salud ocupacional, establecer objetivos y procesos para mejorar los compromisos con la política, tomar las acciones necesarias para mejorar su desempeño y demostrar la conformidad del sistema a los requisitos de esta norma OHSAS.

El propósito principal de esta norma OHSAS es soportar y promover las buenas prácticas de seguridad y salud ocupacional, en balance con las necesidades socioeconómicas. Debe ser notado que muchos de los requisitos pueden ser gestionados periódicamente o revistados en cualquier momento.

3. METODOLOGÍA

3.1. Variables

A continuación se hace una descripción del conjunto de variables dependientes e independientes que fueron utilizadas para diseñar el sistema de extracción y separación de las partículas de almidón en polvo del aire circundante al área de impacto del presente trabajo de graduación.

3.1.1. Variables independientes

- Densidad aparente de almidón en polvo (ρ): valor necesario para determinar factor de desempeño de separador ciclónico del diseño propuesto.
- Temperatura: temperatura del ambiente constante necesaria para determinar viscosidad y densidad del aire para su uso en la determinación del factor de desempeño del separador ciclónico del diseño propuesto.
- Velocidad de aspiración o captura (V_a): velocidad mínima necesaria para dirigir una corriente de aire hacia la campana del sistema.
- Velocidad de conducción (V_c): velocidad con la que se transporta a través de ductos una corriente de aire, está en función de la velocidad de captura.
- Perímetro de campana (P): perímetro de diseño de la campana del sistema.
- Distancia entre fuente contaminante y la campana (x): altura entre máquina de mezclado y abertura de la campana.

- Diámetro de campana (ϕ): diámetro de la superficie de aspiración de la campana.

3.1.2. Variables dependientes

- Caudal de aspiración de campana (Q): dependiente de la velocidad de captación y superficie de aspiración.
- Diámetro del ducto de diseño (D): dependiente de la velocidad de conducción del flujo de aire a través del sistema.
- Diámetro de separador ciclónico (D_c): diámetro de ciclón tipo Stairmand de alta eficiencia.
- Densidad del aire (ρ_a): dependiente de la temperatura.
- Viscosidad del aire (μ_a): dependiente de la temperatura.

3.2. Delimitación del campo de estudio

El trabajo de graduación realizado tuvo como objetivo diseñar un sistema separación sólido-gas, con el fin de extraer partículas de almidón en polvo que contaminan el aire en un ambiente cerrado, donde no existen corrientes externas de aire que incorporen partículas extrañas.

Con el fin de conocer la concentración del almidón en polvo en el aire del área de estudio, se utilizó un monitoreo ambiental que detecta la concentración de partículas con diámetros de 1, 2.5, 4 y 10 μm . Esto se realizó en una jornada de trabajo, colocando el equipo cerca de la máquina de mezclado de almidón en polvo del cuarto de grasas de la planta. Paralelo al monitoreo, se determinó la densidad aparente del almidón y se realizó el ensayo de distribución de tamaños de partículas del almidón en polvo con una muestra de 0,100 kg.

Estos resultados fueron necesarios para conocer el desempeño del separador ciclónico propuesto en el presente trabajo de graduación.

El fin primordial del estudio de investigación es el de proponer el diseño de un sistema de extracción de partículas de almidón en polvo, con el fin de presentar una respuesta a un agente que pone en riesgo la salud del personal que labora en el cuarto de grasas de la planta.

El estudio será realizado con el apoyo del Departamento de Safety & Health Environment (SHE) de Nestlé, fábrica Antigua Guatemala y los colaboradores del área de impacto del proyecto.

3.3. Recursos humanos disponibles

- Investigador: Br. Christian Andrés Morales Tobón
- Asesor: Ing. Jorge Fernando Isaacs Álvarez
- Coasesor: Ing. Mynor Alejandro Méndez
- Colaboradores: Dra. Astrid Loely Catalán e Inga. Cristina Véliz

3.4. Recursos materiales disponibles

Entre los recursos materiales a utilizarse para realizar la presente investigación están los siguientes:

Tabla IV. **Recursos materiales disponibles**

Recurso	Tipo
Almidón en polvo	Materia prima
3M™ Quest EVM, medidor de partículas	Equipo de medición
Tamices serie Tyler No. 80, 100, 150, 200, 270, 325.	Equipo de medición
Cinta métrica	Equipo de medición
Balanza analítica	Equipo de medición
Papel bond	Equipo de oficina
Lapiceros	Equipo de oficina
Cuaderno para bitácora	Equipo de oficina
Computadora personal	Equipo de oficina
Bata	Equipo de seguridad
Guantes	Equipo de seguridad
Cofia	Equipo de seguridad
Lentes de protección	Equipo de seguridad
Mascarillas	Equipo de seguridad

Fuente: elaboración propia.

3.5. **Técnica cualitativa y cuantitativa**

- **Cuantitativas:**
 - Determinación del tamaño de partícula del almidón en polvo por método de tamices de hilos entrelazados, dicho método corresponde a un tamaño de partículas de 20 μm o más y tamaño de la muestra de 25-200 gramos.
 - Determinación de densidad aparente de una muestra de almidón en polvo por medio de balanza analítica y probeta de 100 ml.

- Cualitativa
 - Se hacen registros narrativos de los fenómenos que son estudiados mediante técnicas como observación participante y entrevistas no estructuradas.
 - Se estudia la asociación o relación entre variables cuantificadas, se trata de identificar su sistema de relaciones y su estructura dinámica.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

Para validar este trabajo de graduación se recolectan datos y se ordena la información.

3.6.1. Técnica de muestreo

- Concentración de almidón en polvo

La concentración de partículas de almidón en el aire del área fue obtenida por medio del monitor ambiental de marca el 3M, modelo Quest EV. La ubicación del equipo se determinó con el criterio de puesto de trabajo, por lo cual se colocó el monitor en las cercanías de la operación de mezclado del almidón en polvo y grasa picada, cuya operación se realiza a una altura de 1,50 m, altura a la que se encuentra las aspas de la mezcladora Laska.

Previo a las mediciones y a poner en marcha el monitor ambiental, se siguieron los protocolos de calibración del flujo, los cuales consisten en poner en funcionamiento la bomba de aspiración durante aproximadamente un minuto

o hayan pasado 3 m³ de aire, que la velocidad del flujo y la temperatura sean constantes. Los valores registrados de calibración fueron 1,63 l/min para el flujo volumétrico y una temperatura de 21 °C.

- Densidad aparente

Se tomó una muestra del almidón en polvo de uno de los sacos proporcionados por el personal del cuarto de grasas. El peso total tomado para la muestra fue de 2,0 kg para determinar la densidad del almidón en 20 repeticiones.

- Análisis granulométrico

Se tomó una muestra del almidón en polvo con un peso total de 0,100 kg de uno de los sacos proporcionados por el personal de cuarto de grasas.

3.6.2. Ordenamiento de muestras

- Material particulado

El medidor de partículas en tiempo real se programó para que realizara las mediciones en un periodo de 5 minutos y un intervalo entre registros de 10 segundos. El registro se programó para realizarse en 5 minutos, puesto que es el tiempo promedio en que el operario ejecuta la labor de vaciar los sacos de almidón en polvo en la máquina mezcladora y el tiempo en que se realiza la operación de mezclado.

- Densidad aparente

Para determinar la densidad se introdujo la cantidad necesaria de la muestra de 2,0 kg de almidón polvo que ocupase un volumen de 50 ml de una probeta de 100 ml. Se tomó en cuenta la tara de la probeta y se realizaron un total de 20 mediciones para la muestra.

- Análisis granulométrico

Se pesó exactamente 100 g del almidón en polvo, el cual se colocó en la pila de tamices. Los tamices fueron colocados de la siguiente forma: 80, 100, 150, 200, 270, 325 mesh y fondo. El equipo de tamizado se programó para que agitara el conjunto de tamices con la muestra por 10 minutos. Previo a colocar la muestra se taró cada tamiz para registrar su peso. Al concluir el ensayo, se pesó de nuevo cada una de las cribas con el contenido de almidón en polvo que retuvieron.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Consiste esencialmente en el recuento de los datos, para el ordenamiento de los mismos.

3.7.1. Determinación de densidad aparente de almidón en polvo

Para diseñar y conocer el desempeño del separador ciclónico propuesto, se hace necesario determinar la densidad del material que se desea separar de la corriente de gas. Por lo tanto, es necesario conocer la densidad aparente del almidón en polvo, la cual se determinó con la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{[(\text{Peso de probeta} + \text{almidón}) - (\text{Peso de probeta})]}{\text{Volumen de probeta}} \quad [\text{Ec. 1}]$$

Al hacer uso de los datos experimentales obtenidos al introducir cierta cantidad de la muestra en probetas de 100 ml y la ecuación de densidad antes descrita, se obtienen los siguientes datos para la densidad del almidón en polvo.

Tabla V. **Densidad aparente del almidón en polvo**

Núm.	Volumen de almidón (ml)	Peso probeta + almidón (g)	Peso de probeta (g)	Peso de almidón (g)	Densidad (g/mL)
1	53	199,83	117,25	82,57	1,56
2	55	203,41	117,44	85,97	1,56
3	52	199,02	117,38	81,64	1,57
4	56	204,20	117,46	86,74	1,55
5	54	202,17	117,61	84,56	1,57
6	53	199,91	117,50	82,42	1,56
7	52	199,05	117,93	81,12	1,56
8	51	196,42	117,17	79,25	1,55
9	52	198,55	117,12	81,43	1,57
10	50	195,32	117,42	77,90	1,56
11	57	205,83	117,25	88,58	1,55
12	52	198,85	117,68	81,17	1,56
13	52	199,27	117,94	81,33	1,56
14	51	196,67	117,16	79,51	1,56
15	53	200,11	117,38	82,73	1,56
16	50	193,40	117,45	75,95	1,52
17	55	202,45	117,25	85,20	1,55
18	51	197,96	117,94	80,02	1,57
19	53	200,58	117,53	83,05	1,57
20	56	204,57	117,61	86,97	1,55

Fuente: elaboración propia.

Como solo se necesita un valor de densidad, se recurre a realizar un promedio aritmético de los datos obtenidos en la tabla V con la siguiente ecuación:

$$\bar{\rho} = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_i}{N} \quad [\text{Ec. 2}]$$

Donde

$\bar{\rho}$: media de densidad del almidón

$\sum_{i=1}^n \rho_i$: sumatoria de densidades

N : total de datos

A partir de los datos tabulados de densidad obtenemos una media de:

$$\bar{\rho} = 1,56 \text{ g/cm}^3 = 1\,560 \text{ kg/m}^3$$

El valor de densidad aparente del almidón en polvo será necesario para realizar una diferencia de densidades entre esta partícula sólida y la corriente de gas, datos necesarios para conocer el desempeño del separador ciclónico que se diseñará.

3.7.2. Determinación del tamaño de las partículas de almidón en polvo

El tamaño de partículas de almidón en polvo se determinó a partir del análisis granulométrico realizado a una muestra de 0,100 kg de almidón en polvo. El peso retenido por cada uno de los tamices se determinó a partir del

peso individual de cada uno de estos antes de colocar la muestra y después de haberse agitado. También se hizo uso de la siguiente ecuación:

$$\text{Peso retenido} = (\text{Peso de tamiz} + \text{almidon retenido}) - (\text{peso de tamiz}) \quad [\text{Ec. 3}]$$

En la tabla VI se detallan los pesos retenidos por cada uno de los tamices utilizados y sus respectivos números de malla.

Tabla VI. **Peso del almidón en polvo retenido por pila de tamices**

Núm. de malla (mesh)	Peso de tamiz + almidón (g)	Peso de tamiz (g)	Peso retenido (g)
80	318,08	318,00	0,08
100	330,34	322,00	8,34
150	334,54	325,00	9,54
200	356,73	340,00	16,73
270	387,35	365,00	22,35
325	438,62	400,00	38,62
	420,32	420,00	0,32
Total			95,98

Fuente: elaboración propia.

A continuación, debe determinarse el tamaño de las partículas de almidón, para lo que es necesario conocer la apertura de malla del tamiz que representó una mayor retención porcentual en peso de la muestra. Esto se obtiene al hacer uso del anexo 1 del presente trabajo de graduación y la siguiente ecuación que da el valor porcentual del peso retenido por tamiz.

$$\text{porcentaje peso retenido} = \frac{\text{Peso retenido}}{\sum_{i=1}^7 \text{Peso retenido}} \quad [\text{Ec. 4}]$$

Tabla VII. **Porcentaje en peso retenido de almidón en polvo en función de número de tamiz**

Núm.	Núm. de malla (mesh)	Peso retenido (g)	Porcentaje peso retenido (g)
1	80	0,08	0,08
2	100	8,34	8,69
3	150	9,54	9,94
4	200	16,73	17,43
5	270	22,35	23,29
6	325	38,62	40,24
7	Fondo	0,32	0,33
Total		95,98	100,00

Fuente: elaboración propia.

El tamaño de la partícula de almidón se usará para conocer el desempeño de la unidad de separación, cuyo valor se observa en la tabla VII, donde se ilustra el análisis de la distribución del tamaño del almidón en polvo.

3.7.3. Concentración de partículas de almidón en polvo en cuarto de grasas

Tras haber colocado el monitor ambiental, como ayuda para determinar la concentración de las partículas de almidón en polvo disperso tras la operación de mezclado de la máquina Laska dentro del cuarto de grasas, se descargaron los resultados de la medición del impactador de partículas.

Tabla VIII. **Concentración promedio de partículas de almidón en polvo para diámetros de 1, 2, 5, 4 y 10 μm**

MP-004 Cuarto de Grasas. 2da Medición Laska					
	PM1	PM2.5	RESP	PM10	TOTAL
Avg	10.435 mg/m ³	10.472 mg/m ³	10.717 mg/m ³	19.588 mg/m ³	62.921 mg/m ³
Max	35.700 mg/m ³	35.800 mg/m ³	36.500 mg/m ³	63.300 mg/m ³	219.000 mg/m ³
Max Time	09:50:28	09:50:28	09:50:28	09:50:28	09:50:28
Min	0.985 mg/m ³	0.990 mg/m ³	1.030 mg/m ³	2.260 mg/m ³	6.120 mg/m ³
Min Time	09:49:58	09:49:58	09:49:58	09:49:58	09:49:58
TWA (8 hr)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
TWA Start Time	09:49:48	09:49:48	09:49:48	09:49:48	09:49:48
TWA End Time	09:54:48	09:54:48	09:54:48	09:54:48	09:54:48

Fuente: 3M, Detection management software (DMS).

3.7.4. **Cálculo y dimensiones del ducto de transporte de la corriente de aire**

La siguiente metodología de cálculos detalla los procedimientos para el transporte del fluido a través de ductos que permitan la anexión entre el área de extracción hasta el equipo colector de polvos.

Como parámetro básico de diseño debe considerarse mantener un equilibrio en la presión del sistema. Este se logra si se tiene un control del volumen y velocidad del fluido que se conduce a través de secciones de tuberías.

La velocidad de transporte del fluido debe considerarse en función de la velocidad de captación o arrastre V_a , puesto que debe cumplir con el mínimo de

velocidad de transporte en los ductos V_t que mantenga la presión a través del sistema hasta la entrada al ciclón. Para el diseño propuesto se determina el caudal necesario para el transporte de las partículas de almidón hasta el colector de polvos, para lo cual se estima una velocidad de captación de 0,5 m/s, por considerar que el aire capturado es libre de corrientes externas. La velocidad de transporte en los ductos es 15 a 20 m/s, por considerar las partículas del almidón en polvo como partículas finas y secas. Estos valores han sido extraídos de las tablas disponibles en el anexo 2.

Teniendo en cuenta la velocidad de captura del aire, puede determinarse el caudal a través de la campana de extracción con la siguiente ecuación:

$$Q = V_a \times S_a \quad [\text{Ec. 5}]$$

Donde

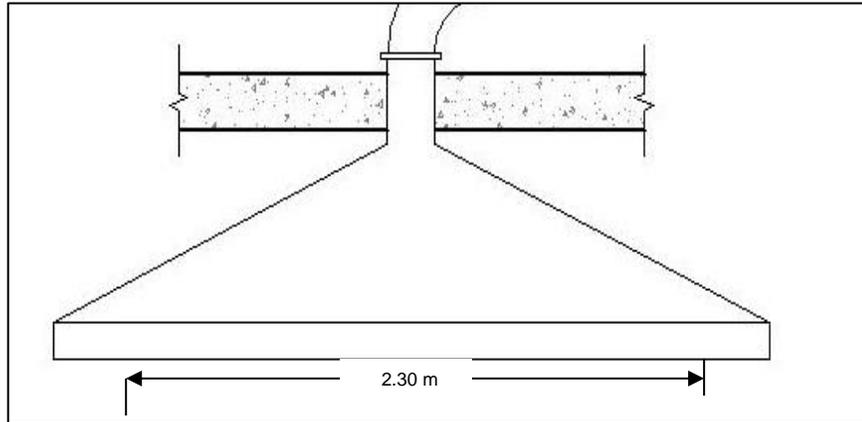
Q = caudal, en metro cúbico por segundo

V_a = velocidad de captación o aspiración, en metro por segundo

S_a = superficie de aspiración de la campana, en metro cuadrado

Para determinar la superficie de aspiración, en la figura 7 donde se detallan las dimensiones de la campana. El diámetro de la campana es de 2,30 m, por lo tanto el área o superficie de aspiración se calcula de la siguiente manera.

Figura 7. **Diámetro de campana de extracción suspendida**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2014.

$$S_a = \pi \times \left(\frac{\phi}{2}\right)^2 \quad [\text{Ec. 6}]$$

Donde

S_a = superficie de aspiración de la campana, en metro cuadrado

ϕ = diámetro de la campana, en metro

Por lo tanto, la superficie de aspiración es:

$$S_a = \pi \times \left(\frac{2,30 \text{ m}}{2}\right)^2$$
$$S_a = 4,1547 \text{ m}^2$$

Tomando el valor de la superficie de aspiración y la velocidad de captura se obtiene un caudal de:

$$Q = (0,5 \text{ m/s}) \times (4,1547 \text{ m}^2)$$
$$Q = 2,0774 \text{ m}^3/\text{s} \text{ o } 4401,76 \text{ pie}^3/\text{min}$$

Al haber obtenido el valor del caudal se puede determinar el diámetro del ducto que transportará el fluido hasta la entrada al ciclón. Para esto se hará uso de la velocidad promedio de conducción en los ductos de 15 a 20 m/s y las siguientes ecuaciones:

$$A = \frac{Q}{V_t} \quad [\text{Ec. 7}]$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \times Q / V_t}{\pi}} \quad [\text{Ec. 8}]$$

Donde

A = área de la sección transversal del ducto; en metro cuadrado

Q = caudal del aire, en metro cúbico por segundo

V_c = velocidad de transporte de la corriente de aire en el ducto, en metro por segundo

D = diámetro del ducto, en metro

Por lo tanto, el diámetro del ducto que transporta el flujo de gas a la entrada del ciclón tiene un valor de:

$$D = \sqrt{\frac{4 \times \left(2,0774 \text{ m}^3/\text{s} / 17,5 \text{ m/s} \right)}{\pi}}$$

$$D = 0,3887 \text{ m} \cong 15,3031 \text{ pulg}$$

Para fines prácticos, el ducto debe ser de diámetro nominal de 16 pulgadas cédula número 20; correspondiente a un diámetro interno de 15,376 pulgadas (0,3905 m), área de sección transversal de 1,2985 pies² (0,1206 m²).

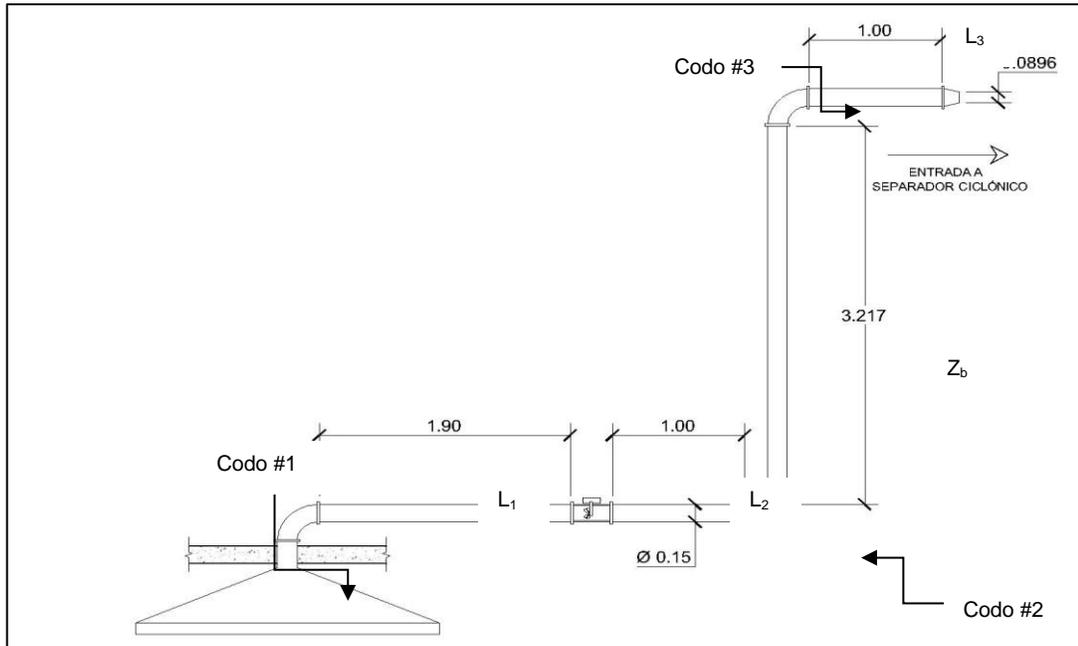
3.7.5. Caída de presión en el sistema de ductos

La determinación de la caída de presión o las pérdidas de carga del transporte del fluido a través del sistema de ductos es de suma importancia, debido a que permite conocer la potencia del ventilador a instalarse en el sistema, para que cumpla con la velocidad de entrada al separador ciclónico y se dé la separación deseada de las partículas del almidón en polvo del flujo de gas.

Se utilizará el método de presión dinámica, el cual se basa en el hecho de que todas las pérdidas de carga, por rozamientos en conductos y resistencia de forma por desprendimientos en accesorios, son función de la presión dinámica y puede ser calculada multiplicando la presión dinámica por un factor. De esta manera, es preciso establecer al inicio del proceso de diseño los valores de los factores de pérdida de codos y uniones. Este método trata todas las pérdidas y tiene la ventaja de que se pueden realizar reajustes en el tamaño de los ductos propuestos. Al usar este método se podrá seleccionar un ventilador y colector de polvos acorde a los datos del caudal y las pérdidas de carga del sistema propuesto.

Para hacer válido todo cálculo ha de observarse la figura 8, donde se detallan los puntos de referencia, las longitudes de los tramos rectos y los accesorios acoplados al ducto, que serán útiles para determinar las pérdidas de carga.

Figura 8. Sistema de ductos de carga y descarga al sistema de extracción propuesto



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2014.

Con el uso de la ecuación de balance de la energía del sistema, se determinarán los puntos de análisis para determinar la carga total del sistema.

$$\frac{p_a}{\gamma} + z_a + \frac{v_a^2}{2g} + H_A - H_L = \frac{p_b}{\gamma} + z_b + \frac{v_b^2}{2g} \quad [\text{Ec. 9.}]$$

Como la instalación del sistema de ductos será en un cuarto cerrado donde la velocidad del viento en ambos puntos es relativamente igual, así como la presión en los puntos a y b, se tiene que $\frac{v_a^2}{2g} - \frac{v_b^2}{2g} = 0$ y $\frac{p_a}{\gamma} - \frac{p_b}{\gamma} = 0$; la ecuación 9 se reduce a:

$$z_a + H_A - H_L = z_b$$

El objetivo es determinar las pérdidas de carga del sistema y la potencia del ventilador a instalar en este diseño propuesto se acomodará la ecuación anterior para la carga total, H_A .

$$H_A = z_b - z_a + H_L$$

Se toma de referencia la altura en a, entonces la ecuación anterior se reduce a:

$$H_A = z_b + H_L$$

Se necesita conocer las pérdidas de carga, tanto en tubería recta como en singulares o accesorios, donde se realizará el cálculo por separado, tanto para el ducto de toma el aire como el ducto de descarga, ya que en la descarga se tomará en cuenta la velocidad del ventilador que difiera a la velocidad de captura.

- Paso 1: codo en el ducto de entrada, codo a 90° liso redondeado; C= 0.22. Los valores de C, coeficiente de pérdida dinámica de accesorios en ductos, se encuentran en el anexo 3.

$$H_v = \left(\frac{v_a}{1,289} \right)^2 ; Pa \quad [Ec. 10]$$

$$H_v = \left(\frac{0,5 \text{ m/s}}{1,289} \right)^2$$

$$H_v = 0,15 Pa$$

Pérdida dinámica en el codo 1:

$$H_{LC1} = C(H_v) \quad [\text{Ec. 11}]$$

$$H_{LC1} = 0,22(0,15 \text{ Pa})$$

$$H_{LC1} = 0,033 \text{ Pa}$$

- Paso 2: ducto de entrada al ventilador, $L_1 = 1,90 \text{ m}$; $Q = 2,077 \text{ m}^3/\text{s}$ y diámetro del ducto $D_c \approx 400 \text{ mm}$. Del anexo 4 se obtiene la pérdida por fricción en el ducto de $h_{L2} = 6,9 \text{ Pa/m}$.

Entonces, la pérdida total de energía para la longitud del ducto de entrada al ventilador es:

$$H_{L2} = h_{L2}(L_1) \quad [\text{Ec. 12}]$$

$$H_{L2} = 6,9 \text{ Pa/m}(1,90 \text{ m})$$

$$H_{L2} = 13,11 \text{ Pa}$$

- Paso 3: ducto de descarga del ventilador, $L_2 = 1,00 \text{ m}$; $Q = 2,077 \text{ m}^3/\text{s}$ y diámetro del ducto $D_c \approx 400 \text{ mm}$. Se tiene una velocidad de descarga de $17,5 \text{ m/s}$ por lo que se obtiene una pérdida por fricción en el ducto de $h_{L2} = 6,9 \text{ Pa/m}$

$$H_{L2} = h_{L2}(L_2)$$

$$H_{L2} = 6,9 \text{ Pa/m}(1,0 \text{ m})$$

$$H_{L2} = 6,9 \text{ Pa}$$

- Paso 4: dos codos a 90°, lisos redondeados; C = 0,22. Codos 2 y 3.

$$H_{v2,3} = \left(\frac{17,5 \text{ m/s}}{1,289} \right)^2$$

$$H_{v2,3} = 184,32 \text{ Pa}$$

Pérdida dinámica en los codos 2 y 3:

$$H_{L2,3} = 2 \times 0,22 \times (184,32)$$

$$H_{Lc2,3} = 81,10 \text{ Pa}$$

- Paso 5: ducto de descarga del ventilador, $L_3 = 1,00 \text{ m}$; $Q = 2,077 \text{ m}^3/\text{s}$ y diámetro del ducto $D_c \approx 400 \text{ mm}$. Se tiene una velocidad de descarga de $17,5 \text{ m/s}$, por lo que se obtiene una pérdida por fricción en el ducto de $h_{L3} = 6,9 \text{ Pa/m}$

$$H_{L3} = h_{L2}(L_2)$$

$$H_{L3} = 6,9 \text{ Pa/m}(1,0 \text{ m})$$

$$H_{L3} = 6,9 \text{ Pa}$$

Para conocer la carga total h_A que se necesita para determinar la potencia del ventilador, debe hacerse una sumatoria de todas las cargas de pérdidas por fricción por el ducto y las dinámicas provocadas por los accesorios acoplados al ducto del sistema, entonces:

$$H_L = H_{LC1} + H_{L1} + H_{L2} + H_{LC2,3} + H_{L3}$$

$$H_L = 108,04 \text{ Pa}$$

Tomando en cuenta la diferencia de altura en los puntos a y b según figura 8, se tiene una carga total de:

$$\begin{aligned}H_A &= z_b + H_L \\H_A &= (z_b \times \rho_{aire,21^\circ C} \times g) + H_L \\H_A &= \left(3,21 \text{ m} \times 1,204 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9,806 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) + 108,04 \text{ Pa} \\H_A &= 145,94 \text{ Pa} \quad (14,88 \text{ mmH}_2\text{O})\end{aligned}$$

3.7.6. Selección de ventilador

Para el diseño propuesto se ha seleccionado un ventilador axial del tipo tuboaxial con aletas hacia atrás. Estos operan a caídas de presión entre 0 a 50,8 mmH₂O y caudales de 0,24 a 28,32 m³/s, lo cual es acorde a la caída de presión del diseño propuesto, siendo esta de 14,88 mmH₂O y un caudal de 2,07 m³/s. Este ventilador es de fácil instalación y fabricación, por lo que representa un bajo costo en su implementación. Aunque los intervalos típicos de operación de los diferentes tipos de ventiladores centrífugos se encuentran dentro de los parámetros de caudal y caída de presión requeridos por el sistema diseñado, se escoge el ventilador tipo tuboaxial por la facilidad de acople al ducto circular de todo el sistema.

Tabla IX. **Intervalos típicos de operación de los ventiladores axiales**

Los intervalos típicos de operación de los ventiladores axiales son [4]:

Tipo	Caudal (m ³ /s)	Caída de presión (mm H ₂ O)
Axial de propela	0.24-23.60	0-15.9
Axial de aspas	0.24-18.88	0-15.9
Tuboaxial	0.24-28.32	0-50.8
Helicoidales	0.24-70.79	0-127

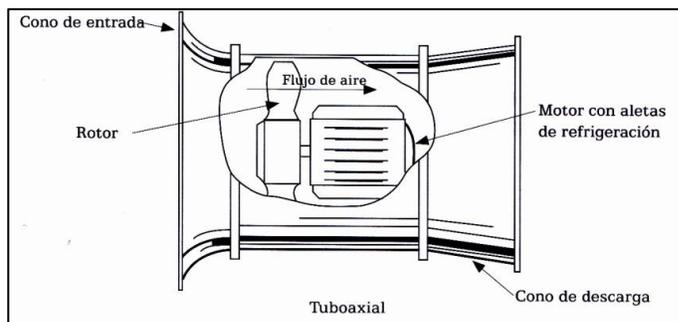
Fuente: LONDOÑO ECHEVERRI, Carlos. *Ventilación industrial*. p. 132.

La potencia entregada al aire por el ventilador depende del caudal que circula y la presión necesaria para vencer las pérdidas que ofrece el sistema de conductos, lo cual resulta igual a:

$$\begin{aligned} \text{Pot} &= Q \times H_A \times g \\ \text{Pot} &= 2,077 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \times 14,88 \text{ mmH}_2\text{O} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \\ \text{Pot} &= 303,12 \text{ W} \cong 0,41 \text{ hp} \end{aligned}$$

Para el propósito de instalación se debe adquirir un ventilador tuboaxial de ½ hp.

Figura 9. **Ventilador tuboaxial**



Fuente: LONDOÑO ECHEVERRI, Carlos. *Ventilación industrial*. p. 131.

3.7.7. Selección, cálculo y diseño del separador ciclónico

La realización del monitor ambiental facilitó el conocimiento de variables claves para la selección del tipo de equipo. Puesto que se tienen concentraciones del almidón en polvo entre 7 y 10 g/m³, diámetro de partícula menor o iguales a 10 µm, densidad del sólido cercana a 1,5 g/cm³ y el ciclón operará a temperaturas entre -40 a 550 °C con pérdidas de carga entre 500 a 1 500 Pa. Estos valores se dan con referencia de los citados en el anexo 5 sobre las características de los polvos de procesos industriales, donde se clasifica al almidón como un proceso en el que se manejan harinas en una planta alimenticia. Al haber clasificado el almidón en polvo bajo las características antes mencionadas, se sugiere, en el anexo 6, sean utilizados ciclones múltiples pequeños.

El *Manual del ingeniero químico* menciona que los ciclones utilizados para eliminar sólidos en algunos casos han tenido eficiencias de casi el 98 % con polvos cuyo diámetro de partículas varían entre las 0,1 y 0,2 µm por efecto predominante de floculación. Haciendo referencia a las descripciones antes mencionadas en cuanto a los parámetros de operación de separadores ciclónicos, se diseñará un separador ciclónico de alta eficiencia tipo Stairmand, ya que opera a velocidades en la entrada al ciclón de 9 a 27 m/s, que, en función de la velocidad de diseño de conducción en los ductos de 17,5 m/s, se encuentra dentro de las velocidades de conducción del aire del sistema propuesto. Además, tiene la capacidad de coleccionar partículas de diámetros menores a 10 µm.

Tras haber elegido el tipo de separador ciclónico, se procede a conocer el diámetro a la entrada del ciclón D_c que está en función del caudal y la velocidad

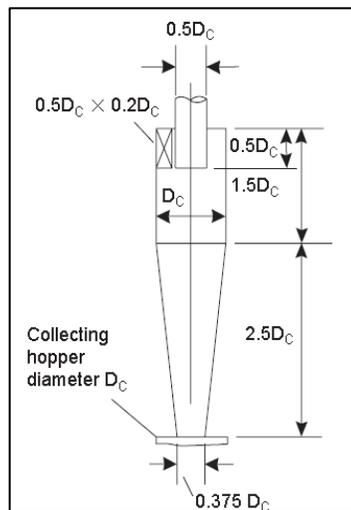
de transporte del aire en los ductos y es útil para conocer el área de la sección transversal del ducto:

$$A = \frac{2,0774 \text{ m}^3/\text{s}}{17,5 \text{ m/s}}$$

$$A = 0,1187 \text{ m}^2$$

Al conocer el área de sección transversal y teniendo en cuenta la figura 8, las dimensiones de D_c son las siguientes.

Figura 10. **Dimensiones de ciclón de alta eficiencia en función del diámetro D_c**



Fuente: TOWLER, Gavin y SINNOTT, Ray. *Chemical engineering desing, principles, practice and economics of plant and design*. p. 595.

$$A = 0,5D_c \times 0,2D_c$$

$$0,1187 \text{ m}^2 = 0,5D_c \times 0,2D_c$$

$$D_c = 1,0895 \text{ m}$$

El diámetro obtenido D_c para este sistema en específico es claramente mayor al compararse con el diámetro de diseño estándar de 0,203 m.³ Es por esto que se dispone diseñar 6 ciclones en paralelo, lo cual ayudará a disminuir el diámetro del ducto y se tendrá una caída de presión menor que al diseñar con un diámetro mayor a 0,203 m. El diámetro del ducto de entrada al ciclón será entonces:

$$A = \frac{0,1187 \text{ m}^2}{6}$$

$$A = 0,0198 \text{ m}^2$$

$$0.0198 \text{ m}^2 = 0,5D_c \times 0,2D_c$$

$$D_c = 0,448 \text{ m}$$

3.7.8. Desempeño del ciclón propuesta

Para el diseño de un ciclón se parte del diámetro de la entrada a la sección cónica, el cual se determinará a partir de la distribución de tamaño de la partícula, la densidad promedio de la partícula con un valor de $1\,560 \text{ Kg/m}^3$ ⁴ y el factor de escalamiento que hace una relación de entre las propiedades del fluido y la partícula, así como consideraciones estándar para diseño de ciclones.

$$d_2 = d_1 \left[\left(\frac{D_{c2}}{D_{c1}} \right)^3 \times \frac{Q_1}{Q_2} \times \frac{\Delta\rho_1}{\Delta\rho_2} \times \frac{\mu_1}{\mu_2} \right]^{1/2} \quad [\text{Ec. 13}]$$

³TOWLER y Gavin, SINNOTT, Ray. *Chemical engineering desing, principles, practice and economics of plant and design*. p. 595.

⁴Determinada experimentalmente, como se detalla en la sección 3.7.1.

Donde:

d_1 = diámetro promedio de la partícula a las condiciones estándar, a la eficiencia de separación elegida, como se muestra en las figuras 10,45 a, sección de anexos, en milímetros.

d_2 = diámetro promedio de la partícula para el diseño propuesto a la misma eficiencia de separación, en milímetros.

D_{c_1} = diámetro del ciclón estándar = 8 pulgadas (203 mm).

D_{c_2} = diámetro del ciclón propuesto, en milímetros.

Q_1 = flujo estándar, diseño de alta eficiencia = 223 m³/h diseño de alta velocidad de flujo = 669 m³/h.

Q_2 = flujo para el diseño propuesto, en metro cúbico por hora.

$\Delta\rho_1$ = diferencias de densidades sólido-fluido a las condiciones estándar =2 000 kilogramos por metro cúbico.

$\Delta\rho_2$ = diferencia de densidades sólido-fluido, para el diseño de propuesto, en kilogramo por metro cúbico.

μ_1 = viscosidad de fluido de prueba (aire a 1 atm, 20 °C) = 0,018 newton segundo por metro cuadrado.

μ_2 = viscosidad para el fluido propuesto, en newton segundo por metro cuadrado.

Al determinar el factor de escalamiento, se podrán conocer las condiciones de operación y desempeño del ciclón, que se presenta en el presente trabajo de graduación como un diseño propuesto.

Para esto se conoce la distribución de tamaño de partículas, previamente determinada por el análisis granulométrico; la densidad del sólido, que en este caso son las partículas de almidón en polvo; el diámetro del ducto, que a su vez será el diámetro a la entrada del ciclón; el flujo volumétrico, que tiene el valor de

la sexta parte del calculado, siendo este de $7478,64 \text{ m}^3/\text{h} / 6$, ya que primero se determinarán las dimensiones de un solo ciclón que serán las misma para los 6 ciclones propuestos. También se requiere conocer la temperatura promedio de $21 \text{ }^\circ\text{C}$ del área, que será de ayuda para conocer la densidad y viscosidad del aire (fluido) del área donde se instalará el ciclón.

En la tabla X se detallan los valores de diseño para un ciclón estándar y el diseño propuesto:

Tabla X. **Datos estándar y propuestos para diseño de separador ciclónico tipo Stairmand**

	Estándar(1)	Propuesto (2)/ Referencia	
d_n	0,044 mm	0,044 mm	Resultados
D_{c_n}	203 mm	445 mm	Resultados
Q_n	$223 \text{ m}^3/\text{h}$	$1\ 246,44 \text{ m}^3/\text{h}$	Resultados
$\Delta\rho_n$	$2\ 000 \text{ kg}/\text{m}^3$	$(1\ 560 - 1\ 204) \text{ kg}/\text{m}^3$	Núm. 12
μ_n	$0,018 \text{ Ns}/\text{m}^2$	$1,825 \times 10^{-5} \text{ Ns}/\text{m}^2$	Núm. 12

Fuente: elaboración propia.

Tomando en cuenta los valores de la tabla X, se tiene el valor del factor de escalamiento para un ciclón tipo Stairmand.

$$f_{sc} = \left[\left(\frac{0,445}{0,203} \right)^3 \times \frac{223}{1,246,44} \times \frac{(1560 - 1,204)}{2000} \times \frac{0,001800}{0,001825} \right]^{1/2}$$

$$f_{sc} = 1,2036 \text{ (adimensional)}$$

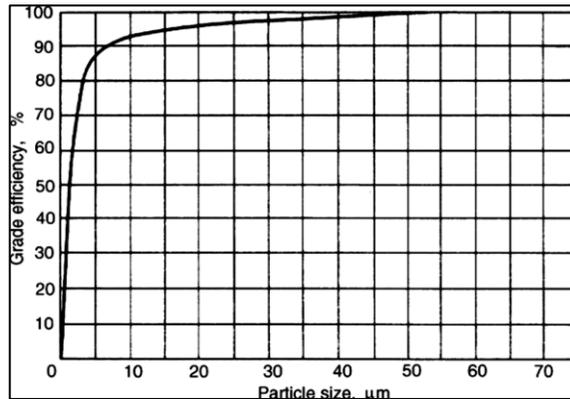
A continuación, en la tabla XI se observa el funcionamiento para el ciclo propuesto.

Tabla XI. **Desempeño del separador ciclónico tipo Stairmand diseñado**

Tamaño promedio de la partícula (µm)	Peso por ciento retenido	Tamaño promedio de partícula / factor de escalamiento	Eficiencia diseño propuesto	Porcentaje Colectado 2X4/100	Porcentaje No colectado	Porcentaje a la salida
177	0,41	147,50	99,00	0,41	0,00	0,32
149	8,02	124,17	99,00	7,94	0,08	6,26
106	11,07	88,33	99,00	10,96	0,11	8,65
74	19,48	61,67	99,00	19,29	0,19	15,21
53	27,26	44,17	99,00	26,99	0,27	21,29
44	30,9	36,67	98,00	30,28	0,62	48,27
TOTALES				95,86	1,28	100

Fuente: elaboración propia.

Figura 11. **Curva de desempeño de ciclón de alta eficiencia a condiciones estándar**



Fuente: TOWLER, Gavin y SINNOTT, Ray. *Chemical engineering desing, principles, practice and economics of plant and design*. p. 596.

3.7.9. Cálculo de caída de presión en separador ciclónico

La caída de presión para un ciclón tipo Stairmand está dada por la siguiente ecuación:

$$\Delta P = \frac{\rho_f}{203} \left\{ u_1^2 \left[1 + 2\phi^2 \left(\frac{2r_t}{r_e} - 1 \right) \right] + 2u_2^2 \right\} \quad [\text{Ec. 14}]$$

Donde

ΔP = caída de presión del ciclón, en milibares

ρ_f = densidad del gas, en kilogramo por metro cúbico

u_1 = velocidad del ducto de entrada, en metro por segundo

u_2 = velocidad del tubo de salida, en metro por segundo

r_t = radio del ducto de la entrada, en metro

r_e = radio del tubo de salida, en metro

ϕ = factor obtenido de la figura 17

ψ = parámetro obtenido de la figura 17, dado por:

$$\psi = f_c \frac{A_s}{A_1}$$

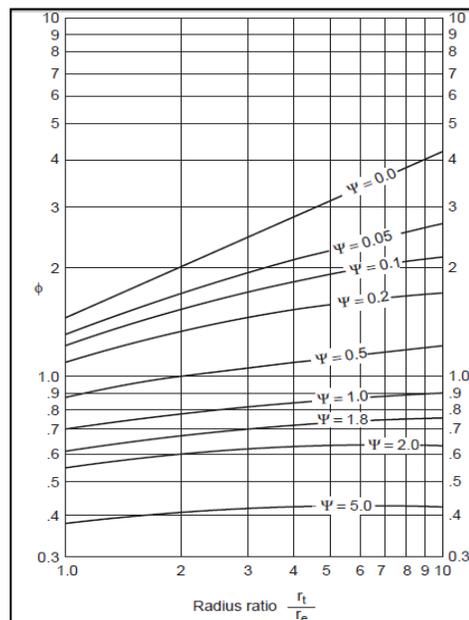
Donde

f_c = factor de fricción para gases tomado como 0,005.

A_s = área superficial expuesta del ciclón donde gira el fluido, esta debe ser igual a la superficie de un cilindro con el diámetro de diseño del ciclón y largo igual a la altura de este, en metros cuadrados.

A_1 = área del ducto de entrada, en metros cuadrados.

Figura 12. **Factor de caída de presión del ciclón**



Fuente: TOWLER, Gavin y SINNOTT, Ray. *Chemical engineering desing, principles, practice and economics of plant and design*. p. 598.

Seguindo la metodología antes descrita, la caída de presión en cada unidad del conjunto de ciclones es:

$$A_1 = 0,5D_c \times 0,2D_c = 0,5(0,4448 \text{ m}) \times 0,2(0,4448 \text{ m}) = 0,0198 \text{ m}^2$$

$$A_s = \pi(D_c) \times (1,5 + 2,5)D_c = \pi(0,4448 \text{ m}) \times (4)0,4448 \text{ m} = 2,4862 \text{ m}^2$$

Factor de caída de presión:

$$\psi = 0,005 \times \frac{2,4862}{0,0198} = 0,63$$

Relación de radios:

$$\frac{r_t}{r_e} = \frac{[(D_c) - (0,2 \times D_c)]}{(0,5 \times D_c)} = \frac{[(0,4448) - (0,2 \times 0,4448)]}{(0,5 \times 0,4448)} = 1,6$$

De la figura 17 $\phi = 1,1$

$$u_1 = Q_2 \times \frac{1h}{3600s} \times \frac{1}{A_1} = 1,246,44 \frac{m^3}{h} \times \frac{1h}{3600s} \times \frac{1}{0,0198m^2} = 17,48 \text{ m/s}$$

Área del tubo de salida:

$$\frac{\pi(0,5 \times D_c)^2}{4} = 0,0388m^2$$

$$u_2 = Q_2 \times \frac{1h}{3600s} \times \frac{1}{A_1} = 1,246,44 \frac{m^3}{h} \times \frac{1h}{3600s} \times \frac{1}{0,0388m^2} = 8,92 \text{ m/s}$$

Entonces la caída de presión del ciclón tiene un valor de:

$$\Delta P = \frac{1,204}{203} \{17,48^2 [1 + 2 \times 1,1^2 (2 \times 1,6 - 1)] + 2 \times 8,92^2\}$$

$$\Delta P = 12,40 \text{ milibares} \cong 1\,240 \text{ Pa}$$

Teniendo en cuenta el resultado para la caída de presión y el parámetro de caída de presión en la operación de un conjunto de ciclones pequeños descrito en el anexo 6, se concluye que este opera dentro de las pérdidas por carga esperadas para el diseño de ciclones.

3.7.10. Colector de polvo

Para asegurar que al final de la operación de separación sólido-gas realizada por el conjunto de ciclones diseñados no se expulse trazas de pequeñas partículas menores a 0,5 μm por el ducto de salida de sistema aire, se instalará un colector de polvo. Este colector seleccionado comercialmente, puesto que no se requiere mayor información más que el caudal de aire y el diámetro de partícula a filtrar.

Con la ayuda de las características técnicas disponibles por el fabricante de colectores Donaldson Torit, se ha seleccionado el modelo UMA 450 el cual opera con un flujo de 1 350 a 5 000 pie^3/min .

Considerando el flujo los 6 tubos de salida del conjunto de ciclones tiene un valor de:

$$Q_{6c} = N \times \left(\frac{\pi(0,5 \times D_c)^2}{4} \right) \times u_2$$

Donde

N = número de ciclones, adimensional

$0,5 \times D_c$ = diámetro del tubo de salida del separador ciclónico, en metros

u_2 = velocidad del ducto de salida, en metros por segundo

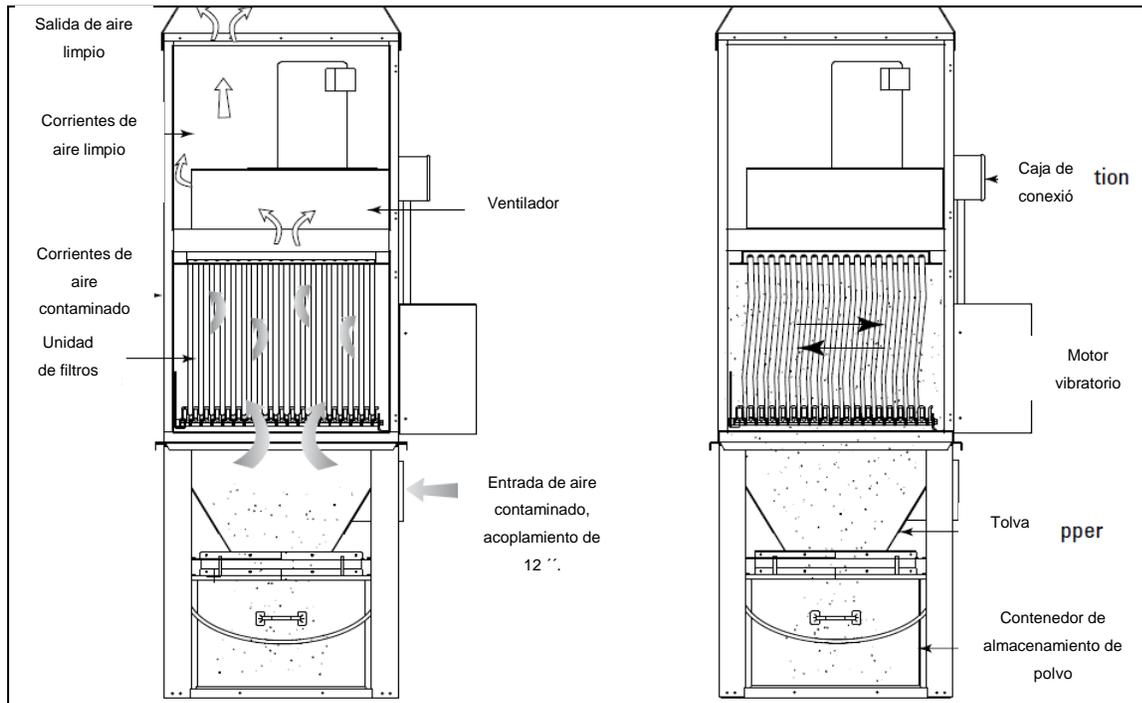
Entonces, se obtiene un valor para el flujo de aire de salida del conjunto de ciclones de:

$$Q_{6c} = 6 \times \left(\frac{\pi(0,5 \times 0,4448m)^2}{4} \right) \times 8,92 \text{ m/s}$$

$$Q_{6c} = 2,08 \text{ m}^3/\text{s} \text{ ó } 4400,02 \text{ pie}^3/\text{min} \text{ (cfm)}$$

Considerando dicho flujo, se justifica el uso del colector de polvo seleccionado, el cual permite coleccionar partículas de hasta $0,5 \mu\text{m}$ con eficiencias de 99,99 %. Contiene dos bolsas de filtros de 8 onzas fabricados de una sola pieza de poliéster con un área de filtrado de 444 pie^2 . A continuación se ilustran las partes esenciales del colector de polvos y cómo funciona.

Figura 13. Colector de polvos Unimaster, Donaldson Torit



Fuente: Donaldson Torit.

3.8. Análisis estadístico

- Análisis de varianza

La varianza mide la mayor o menor dispersión de los valores de la variable respecto a la media aritmética. Si la varianza es mayor, existe una mayor dispersión, por lo tanto, los datos tienen una mayor representatividad en términos de su media aritmética.

$$\sigma^2 = \sum \frac{(\rho_i - \bar{\rho})^2}{N}$$

Donde:

σ^2 : varianza

$\bar{\rho}$: media

ρ_i : valor de la muestra

N : total de datos

Tomando el valor de $1,56 \text{ g/cm}^3$ y los datos tabulados de densidad se tiene como resultado para la varianza de la densidad de la muestra de almidón:

$$\sigma^2 = 0,0115$$

- Desviación estándar

Indica la dispersión de los valores para una misma medición con relación al valor promedio de una forma cuantitativa.

$$\sigma = \sqrt{\sum \frac{(\rho_i - \bar{\rho})^2}{N}}$$

Donde:

σ : desviación estándar

$\bar{\rho}$: media

ρ_i : valor de la muestra

N : total de datos

La desviación estándar para los valores de densidad aparente para la muestra de almidón en polvo tiene un valor de:

$$\sigma = 0,1072$$

- Coeficiente de variación

Indica la relación existente entre la desviación típica de una muestra y su media aritmética.

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{\rho}}$$

Donde:

CV : coeficiente de variación

σ : desviación estándar

$\bar{\rho}$: media aritmética

El valor del coeficiente de dispersión de la relación de la desviación y media aritmética de los valores experimentales de densidad aparente del almidón en polvo es:

$$CV = 0,0069$$

Este indica que la densidad aparente se comporta uniformemente en cuanto a su determinación experimental.

4. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados de esta investigación.

Tabla XII. **Análisis de tamaño de almidón en polvo**

Núm. de malla (mesh)	Apertura de malla (mm)	Tamaño promedio de la partícula (μm)	Peso retenido (g)	Peso por ciento retenido (g)
80 mesh	0,177	177	0,08	0,08
100 mesh	0,149	149	8,34	8,69
150 mesh	0,105	106	9,54	9,94
200 mesh	0,074	74	16,73	17,43
270 mesh	0,053	53	22,35	23,29
325 mesh	0,044	44	38,62	40,24
Fondo			0,32	0,33
TOTAL			95,98	100,00

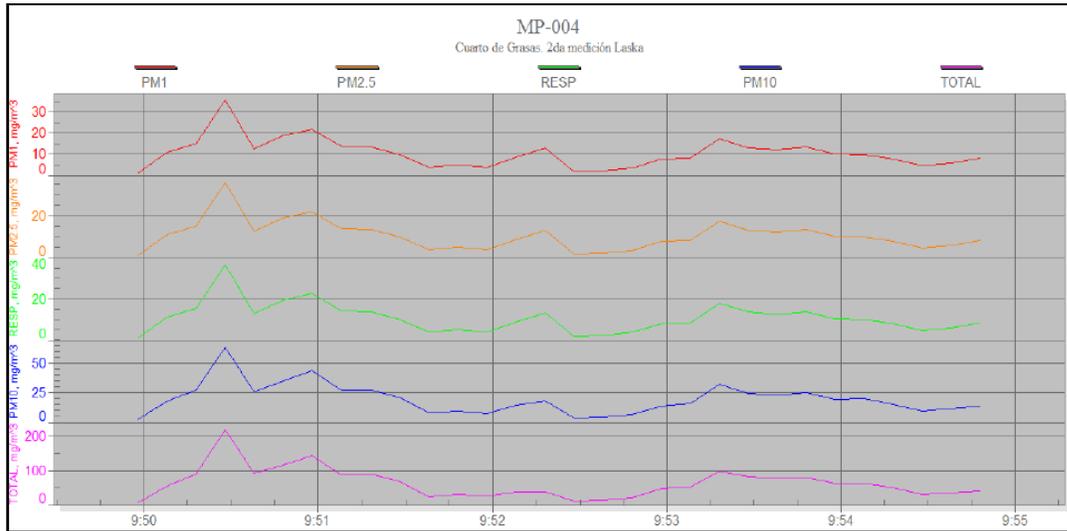
Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Concentración promedio de partículas en cuarto de grasas de la planta**

Diámetro Aerodinámico (μm)	Concentración Promedio (mg/m^3)
1	10,44
2,5	10,47
4	10,72
10	19,59

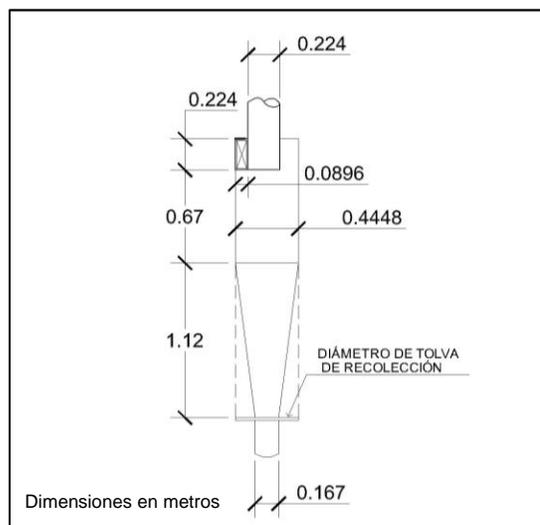
Fuente: elaboración propia, empleando el monitor ambiental 3M, QuestEVM.

Figura 14. **Concentración de partículas de almidón en polvo en función del tiempo para un diámetro de partícula dado**



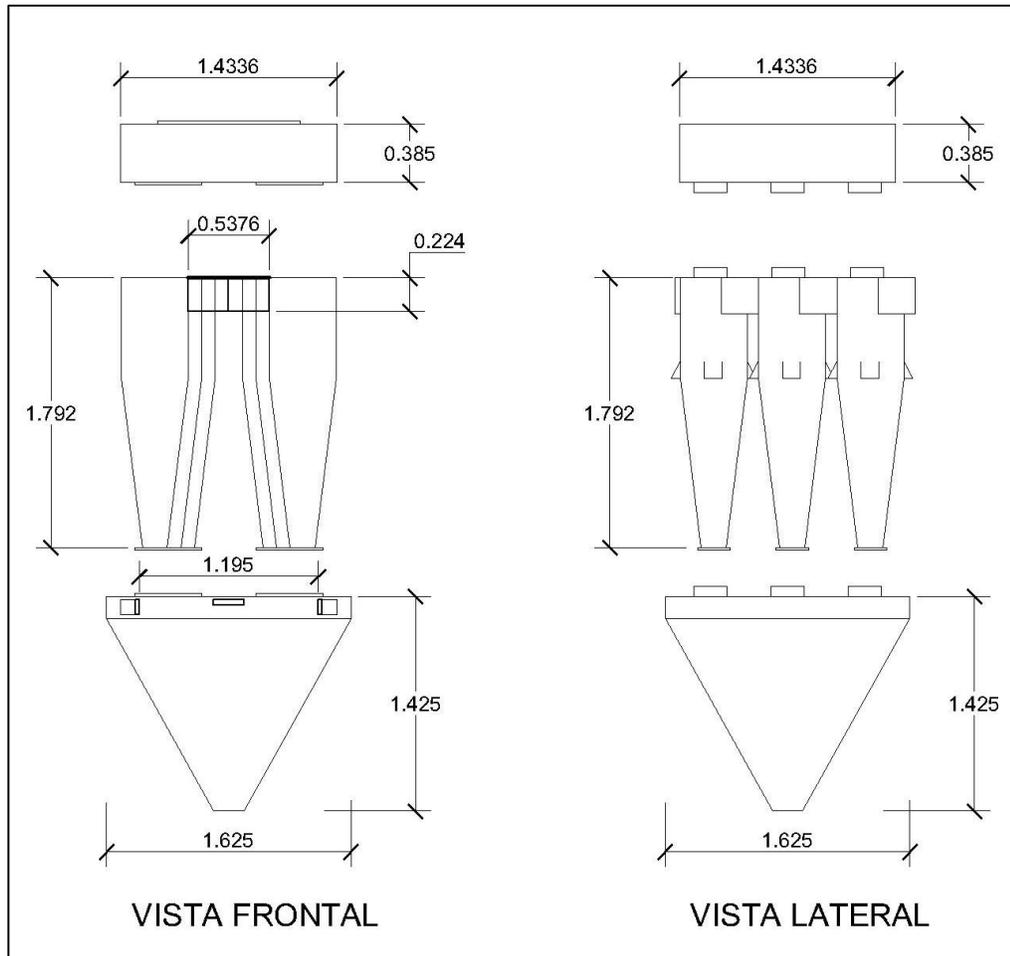
Fuente: monitor ambiental 3M QuestEVM, 3M Detection Management Software DMS.

Figura 15. **Separador ciclónico de alta eficiencia Stairmand**



Fuente: elaboración propia, AutoCAD© 2014.

Figura 16. **Vistas frontal y lateral sistema de 6 ciclones en paralelo**



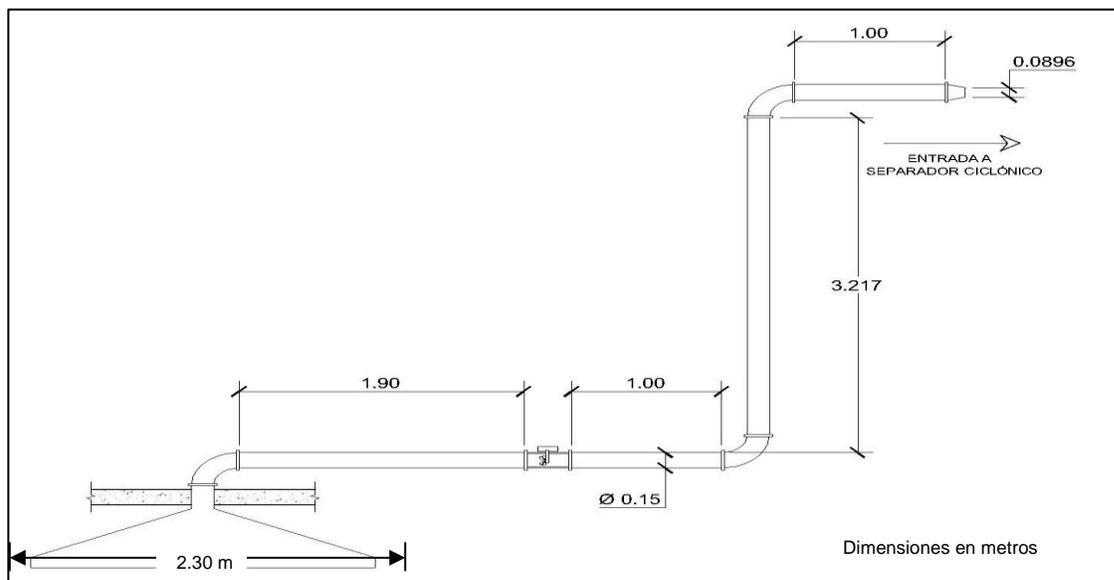
Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2014.

Tabla XIV. **Desempeño del ciclón tipo Stairmand propuesto**

Tamaño promedio de la partícula (μm)	Peso porcento retenido (%)	Tamaño promedio de partícula / factor de escalamiento	Eficiencia diseño propuesto	Porcentaje colectado 2X4/100	Porcentaje no colectado	Porcentaje a la salida
177	0,41	360,34	99,00	0,41	0,00	0,32
149	8,02	303,34	99,00	7,94	0,08	6,26
106	11,07	215,80	99,00	10,96	0,11	8,65
74	19,48	150,65	99,00	19,29	0,19	15,21
53	27,26	107,90	99,00	26,99	0,27	21,29
44	30,9	89,58	98,00	30,28	0,62	48,27
TOTALES				95,86	1,28	100

Fuente: elaboración propia.

Figura 17. **Sistema de ducto de carga y descarga al separador ciclónico**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2014.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

El perfil granulométrico del almidón en polvo para la muestra se detalla en la tabla XII. En las columnas 3 de dicha tabla se aprecia el diámetro de la partícula retenida (micrómetros) en función del número de malla o *mesh* para el tamiz que tuvo una mayor retención en peso de la cantidad total en masa de las muestras del ensayo. Tomado en cuenta que el tamaño promedio de partículas es aquel en el que se tiene una retención porcentual cercana a 50 %, en una de las mallas⁵, el tamiz que retuvo un porcentaje mayor en masa fue el tamiz *mesh* 325, dando como resultado un tamaño promedio de partícula de 0,044 mm o 44 micrones, estos datos se dan en referencia de la tabla de U.S. Sieve Serie and Tyler Equivalents (ASTM-E-11-16).

Los resultados del monitor ambiental representados en la tabla XIII muestran la concentración promedio de partículas con diámetro aerodinámico de 1, 2, 5, 4 y 10 μm . El monitoreo de área se hizo de acuerdo al apartado 4.3.1. de la norma OHSAS 18001:2007, el cual sugiere que deben identificarse los peligros y riesgos a los que están sujetos todo personal de una organización en el lugar de trabajo. Se identificó como un riesgo a la salud ocupacional del personal del cuarto de grasas la exposición de partículas respirables con un diámetro aerodinámico menor a 4 μm y concentración promedio de 10,72 mg/m^3 , cuya concentración sobrepasa los límites máximos permisibles de partículas respirables, siendo este de 5 mg/m^3 para el almidón en polvo.⁶

⁵HENDERSON, S.M. y PERRY Robert. *Agricultural process engineering*. p. 150.

⁶OHSAS. *Límites para contaminantes del aire, sustancias tóxicas y peligrosas*. Apartado Z: tabla Z1 Código estándar 1910.1000.

El tamaño de partícula, dado por la abertura de malla descrito con anterioridad, justifica la escogencia del sistema de separación sólido-gas, por lo cual se sugiere el diseño de un separador ciclónico. Esto se justifica en función de lo mencionado en el Manual del ingeniero químico “el factor de diseño primario que se utiliza para controlar la eficiencia de recolección es el diámetro del ciclón (...)”⁷ también se conoce que existe una distribución del tamaño de partícula uniforme. El diseño propuesto consta de 6 separadores ciclónicos en forma paralela con un diámetro aproximado de 0,4448 m y 1,792 m de altura. La entrada a cada uno de los ciclones tiene dimensiones de 0,224 por 0,0896 metros, de esta forma se asegura que las unidades tengan un diámetro pequeño que funciona a una caída de presión de diseño fija, para la capacidad específica requerida.

Las 6 unidades han sido diseñadas con base en un factor de escalamiento de un ciclón tipo Stairmand de alta eficiencia. Es por esto que se evaluó el diseño propuesto con uno del tipo estándar, lo cual tuvo como resultado un desempeño por cada unidad cercano al 99 %, como se observa en la tabla XIV de la sección de resultados. Con esto se garantiza que cada unidad del sistema hará una separación de las partículas del almidón de diámetro de 44 μm del aire que entra al sistema de extracción propuesto.

El sistema de ducto de carga y descarga parte de una campana de sección circular con un diámetro de 2,30 metros. Dicha campana debe ser instalada a una altura no mayor de 1,86 metros con una velocidad de captura de 0,5 m/s según estándares industriales, lo que garantiza mantener un equilibrio en la presión del sistema, sustentando así la velocidad de transporte de 17,5 m/s del fluido que se conduce a través de secciones de tuberías. Por fines comerciales, se debe instalar un ducto circular de 16 pulgadas de diámetro y

⁷PERRY, R. H. *Manual del ingeniero químico*. 85 p.

cedula núm. 20, el sistema consta de 3 tramos rectos y 3 codos a 90° lisos, el material óptimo de fabricación del ducto debe ser de acero inoxidable. Esto se debe a que la empresa pertenece a la industria de alimentos, en donde se manejan estándares de inocuidad lo cuales pueden verse afectados si el ducto presenta señales de oxidación por factores ambientales.

Para asegurar el transporte del fluido a través del sistema de captación y descarga hacia el conjunto de ciclones, se instalará un ventilador de ducto de ½ hp, el cual opera aproximadamente a 4 401,76 pie³/min. El colector de polvos seleccionado opera de 1 350 a 5 000 pie³/min, con efectividad del 99,99 % en la colección de partículas de hasta 0,5 µm, por lo que cabe esperar que el sistema en su descarga expulse aire limpio exhausto de partículas de almidón en polvo.

CONCLUSIONES

1. Por medio del perfil granulométrico practicado a las muestras del almidón en polvo, se determinó que este tiene un diámetro de 44 μm , correspondiente al número de malla 325 Mesh, el cual constituye al 40,24 % de los sólidos retenidos por la pila de tamices utilizados en el ensayo.
2. La concentración del material particulado suspendido determinada por el monitor ambiental sobrepasa los límites permisibles de concentración de partículas respirables e inhalables, por lo que se determina que la suspensión de este material es perjudicial para la salud de los trabajadores del área.
3. El diseño propuesto consta de 6 ciclones tipo Stairmand, los cuales se diseñaron en función de las propiedades fisicoquímicas del sólido y la corriente de gas a separar, así como su desempeño y la facilidad de fabricación.
4. Se diseñó un sistema de aspiración y descarga del aire contaminado hacia el sistema colector de polvos que sustenta las pérdidas de carga a través de las secciones del ducto, con el fin de mantener un equilibrio en las presiones del sistema propuesto.

RECOMENDACIONES

1. Evaluar si la disminución en el diámetro del ducto, con fines comerciales y de fabricación, favorece la instalación y una disminución en las pérdidas de carga total del sistema de transporte del fluido.
2. Determinar si es factible la instalación de un ducto de hierro laminado de sección rectangular que mantenga la inocuidad en el proceso.
3. Considerar el uso de un separador ciclónico tipo Stairmand de alta velocidad y evaluar si se tiene el mismo desempeño con una cantidad menor de unidades.

BIBLIOGRAFÍA

1. BADGER, Walter L. *Introducción a la ingeniería química*. México: McGraw-Hill, 1970. 778 p.
2. British Standards Institution. *Sistema de gestión de seguridad y salud en el trabajo*. OHSAS 18001. México: McGraw-Hill, 1990. 150 p.
3. CATALÁN ALVAREZ, Edwin Rolando. *Aplicación práctica de un separador tipo ciclón para la recuperación continua de partículas finas de pulpa de madera*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Universidad San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1986. 86 p.
4. GEANKOPLIS, C. J. *Principios de transporte y operaciones unitarias*. 4a. ed. México: Continental, 2006. 1 034 p. ISBN: 9702408563.
5. GRIM, Nils. *Manual de diseño de calefacción, ventilación y aire acondicionado*. España: McGraw-Hill, 2007. ISBN: 0070248419.
6. LONDOÑO ECHEVERRI, Carlos A. *Ventilación industrial*. Medellín: Ediciones de la U, 2001. 214 p. ISBN 97895886920704.
7. MENESES, Claudia; OBREGÓN, Rodolfo. *Medición de Higiene ocupacional informes 1 y 2*. Guatemala: Nestlé, fábrica Antigua Guatemala. 2013. 80 p.

8. MCCABE, W. L; SMITH, J. C. y HARRIOT, P. *Operaciones unitarias en ingeniería química*. 7a ed. México: McGraw-Hill, 2007. 1 189 p. ISBN: 84-306-0267-4.
9. MILLER, J. C. y MILLER, J. N. *Estadística para química analítica*. Argentina: Addison-Wesley, 1993. 211 p.
10. MONTERROSO CASTILLO, M. E. *Sistema de control de higiene enzimático, en una planta de detergente en polvo*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Universidad San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2009. 155 p.
11. MOTT, Robert, *Mecánica de fluidos*. 6a ed. México: Pearson Educación, 2006. 150 p.
12. PERRY, R. H. *Manual del ingeniero químico*. 8a ed. México: McGraw-Hill, 2008. 85 p.
13. RHODES, M. *Introduction to particle technology*. Inglaterra: John Wiley & Sons, 1998. 105 p.
14. S&P Sistemas de ventilación. *Hojas técnicas y manuales de ventilación*. [en línea]. <<http://www.solerpalau.es/es-es/hojas-tecnicas>>. [Consulta: 17 de julio de 2015].
15. TOWLER, Gavin y SINNOTT, Ray. *Chemical engineering desing, principles, practice and economics of plant and design*. Londres: Butterworth-Heinemann, 2008. 155 p.

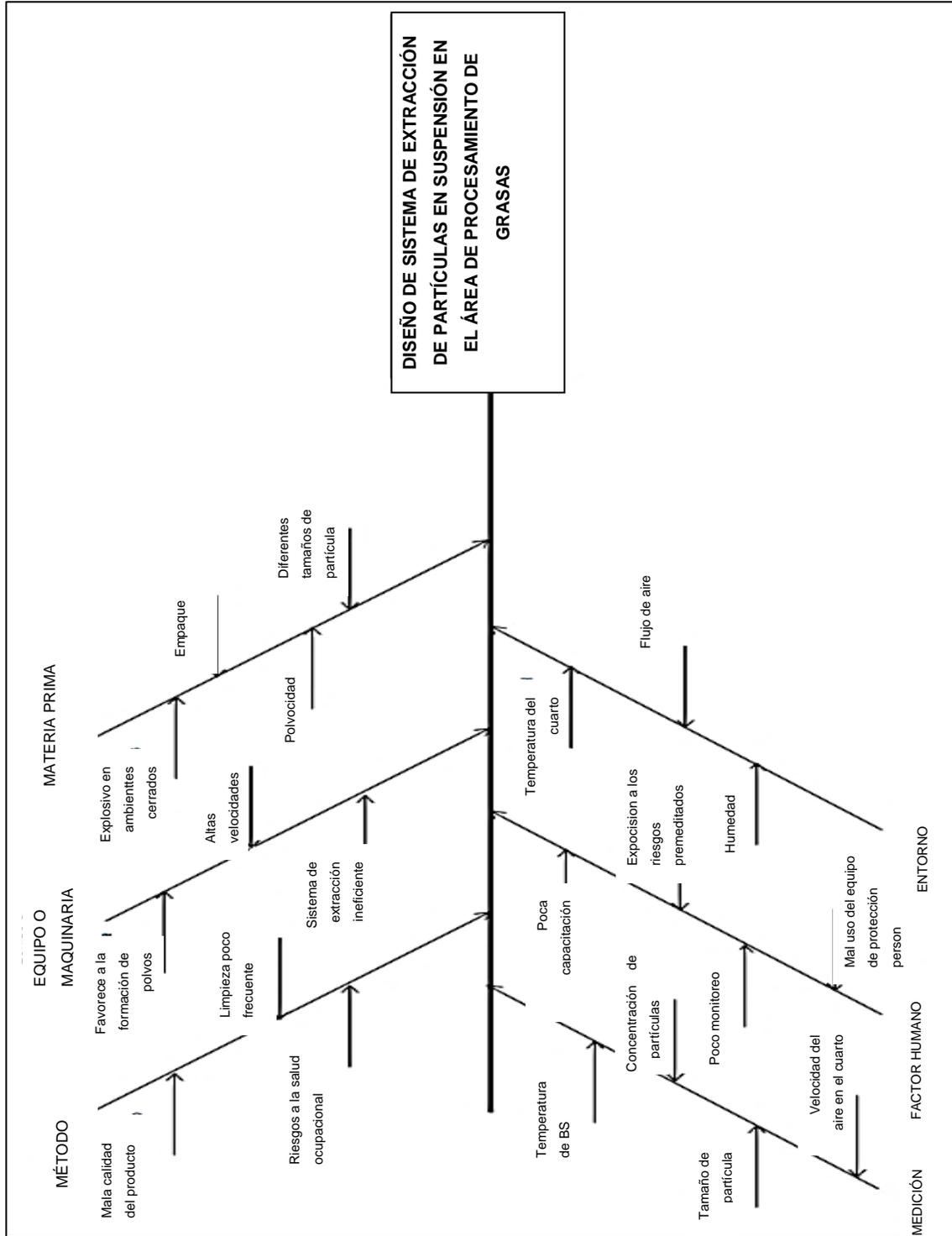
APÉNDICES

Apéndice 1. Tabla de requisitos académicos

ÁREA DE QUÍMICA	<ul style="list-style-type: none"> • Química 3 • Química 4 • Química ambiental • Control de contaminantes industriales 	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Determinación de concentraciones</i> - <i>Propiedades de los gases</i> - <i>Definición de fases de un sistema</i> - <i>Determinación de las variables de un sistema.</i>
ÁREA DE OPERACIONES UNITARIAS	<ul style="list-style-type: none"> • Flujo de fluidos (IQ-2) • Laboratorio de ingeniería química 1 y 2 • Operaciones unitarias complementarias (IQ-6) 	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Transporte de fluidos en ductos.</i> - <i>Materiales de ductos</i> - <i>Conocimiento operacional de equipos</i> - <i>Manejo de sólidos, Separación por tamaños, Análisis granulométrico</i> - <i>Separación sólido-gas (separador ciclónico)</i>
ÁREA DE ESPECIALIZACIÓN	<ul style="list-style-type: none"> • Ciencia de los materiales • Seguridad e higiene industrial • Diseño de equipo • Gestion total de la calidad 	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Tipos de materiales, características.</i> - <i>Seguridad y salud ocupacional, normativas OHSAS.</i> - <i>Diseño de equipos de separación de sólidos(separador ciclónico)</i> - <i>Aseguramiento de la calidad en la industria alimenticia.</i>
ÁREA FISICOQUÍMICA	<ul style="list-style-type: none"> • Laboratorio de fisicoquímica 1 	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Características fisicoquímicas de las partículas.</i>
ÁREA DE CIENCIAS BÁSICAS Y COMPLEMENTARIAS	<ul style="list-style-type: none"> • Idioma técnico • Técnica complementaria 1 y 2 • Área de matemática • Física 1 • Psicología industrial • Administración de empresas 	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Referencias bibliográficas en inglés.</i> - <i>Dibujo y planeación de equipos.</i> - <i>Conocimientos aritméticos básicos.</i> - <i>Movimiento de partículas bajo las leyes de la física.</i> - <i>Interacción laboral con recursos humanos.</i>
EPS	<ul style="list-style-type: none"> • Práctica inicial • Práctica intermedia • Práctica final 	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Experiencia laboral.</i> - <i>Realización de informes de trabajo.</i> - <i>Conocimiento del campo de acción de un ingeniero químico.</i>

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Diagrama de IshikawaP



Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1. Escala de tamices serie Tyler estándar

Esta escala de tamices está basada en una abertura de 0.0029 in., que es la abertura del tamiz estándar de 200 mallas y 0.0021 in. de diámetro de alambre, tal como ha sido adoptada por el National Bureau of Standard.

Mallas	Abertura efectiva, in.	Abertura efectiva, mm	Abertura aproximada, in.	Diámetro del alambre, in
	1.050	26.67	1	0.148
	0.883	22.43	$\frac{7}{8}$	0.135
†	0.742	18.85	$\frac{3}{4}$	0.135
	0.624	15.85	$\frac{1}{2}$	0.120
†	0.525	13.33	$\frac{1}{2}$	0.105
	0.441	11.20	$\frac{1}{2}$	0.105
†	0.371	9.423	$\frac{3}{8}$	0.092
	0.312	7.925	$\frac{3}{8}$	0.088
$2\frac{1}{2}$ †	0.263	6.680	$\frac{1}{4}$	0.070
3	0.221	5.613	$\frac{1}{4}$	0.065
$3\frac{1}{2}$ †	0.185	4.699	$\frac{3}{16}$	0.065
4	0.156	3.962	$\frac{5}{32}$	0.044
5†	0.131	3.327	$\frac{5}{32}$	0.036
6	0.110	2.794	$\frac{1}{8}$	0.0328
7†	0.093	2.362	$\frac{7}{64}$	0.032
8	0.078	1.981	$\frac{3}{32}$	0.033
9†	0.065	1.651	$\frac{5}{64}$	0.035
10	0.055	1.397	$\frac{1}{16}$	0.028
12†	0.046	1.168	$\frac{3}{64}$	0.025
14	0.0390	0.991	$\frac{1}{32}$	0.0235
16†	0.0328	0.833	$\frac{1}{32}$	0.0172
20	0.0276	0.701		0.0141
24†	0.0232	0.589		0.0125
28	0.0195	0.495		0.0118
32†	0.0164	0.417	$\frac{1}{64}$ (Ninguna)	0.0122
35	0.0138	0.351		0.0100
42†	0.0116	0.295		0.0092
48	0.0097	0.246		0.0070
60†	0.0082	0.208		0.0072
65	0.0069	0.175		0.0056
80†	0.0058	0.147		0.0042
100	0.0049	0.124		0.0038
115†	0.0041	0.104		0.0026
150	0.0035	0.088		0.0024
170†	0.0029	0.074		0.0021
200	0.0021	0.053		
270	0.0017	0.044		
325				

†Estos tamices se incluyen cuando se desea un intervalo de tamizado más estrecho, completando la serie estándar utilizada habitualmente. Con esta inclusión la relación de los diámetros de las aberturas entre dos tamices sucesivos es de $1:\sqrt{2}$ en vez de $1:\sqrt{2}$.

Fuente: MCCABE, W. L; SMITH, J. C. y HARRIOT, P. *Operaciones unitarias en ingeniería química*. p. 1 146.

Anexo 2. Velocidad de captación y transporte del aire

Tabla 3.2. Valores recomendados para la velocidad de captación.

Condiciones de dispersión del contaminante	Ejemplos	Velocidad de captación (m/s)
Liberado casi sin velocidad en aire tranquilo.	Evaporación en tanques, desengrase.	0.3-0.5
Liberado a baja velocidad en aire moderadamente tranquilo.	Cabinas de pintura, llenado intermitente de tanques, soldadura, baños electrolíticos, decapado.	0.5-1.0
Generación activa en una zona de rápido movimiento de aire.	Aplicación de pintura con pistola, llenado de recipientes, trituración.	1.0-2.5
Liberado con alta velocidad inicial en una zona de movimiento muy rápido del aire.	Pulido, operaciones de abrasión en general, esmerilado, desmolde en fundiciones.	2.5-10

Fuente: Quinchía, R. y Puerta, J. Ventilación industrial y equipos de limpieza. Ingeaire. Medellín, 2003; y Pedelaborde, Carlos. Curso de ventilación industrial. Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, 2007.

Tabla 4.2. Velocidad de transporte mínima para algunos materiales.

Contaminante	Ejemplo	V_t (m/s)
Vapores, gases, humos de combustión	Todos los vapores, gases y humos	5-10
Humos de soldadura	Soldadura	10-13
Partículas muy finas y ligeras	Partículas de algodón, aserrín, talco	13-15
Partículas finas y secas	Partículas de caucho, baquelita, algodón, virutas (ligeras), detergente, cuero	15-20
Partículas industriales	Partículas de café, cuero, sílice, ladrillo, arcilla, fundiciones, caliza	18-20
Partículas pesadas	Partículas de viruta metálica, moldes de fundición, madera,	20-23
Partículas pesadas y húmedas	Partículas de cemento	> 23

Fuente: Pedelaborde, Carlos. Curso de ventilación industrial. Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, 2007; y U.S. Environmental Protection Agency. Manual de Costos de Control de Contaminación del Aire de la EPA. Springfield, 2002.

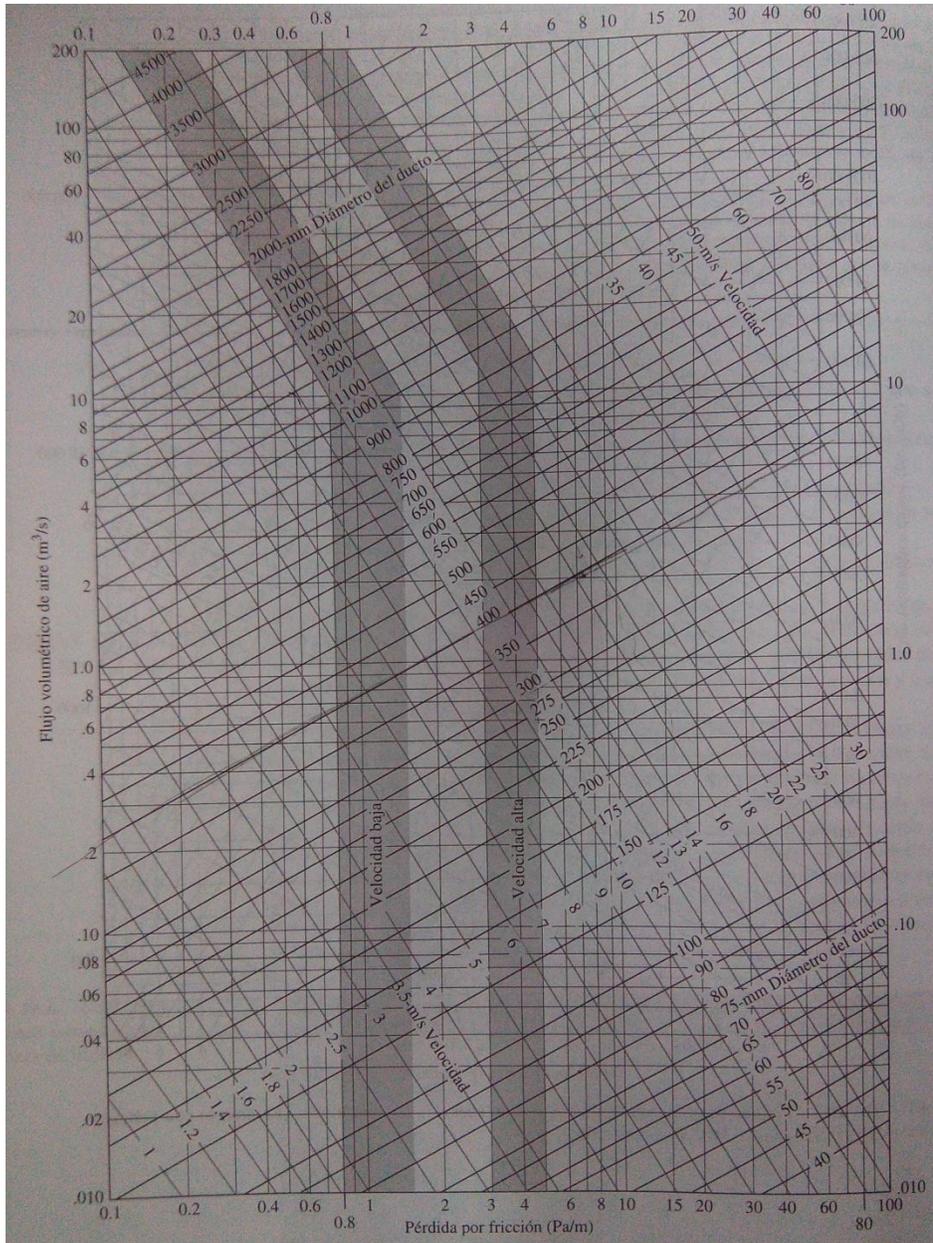
Fuente: LONDOÑO ECHEVERRI, Carlos. *Ventilación industrial*. pp.43 y 95.

Anexo 3. **Coefficientes de pérdida dinámica para accesorios en diseño de ductos**

Coeficiente de pérdida dinámica, <i>C</i>						
Codos a 90°						
	Liso, redondo					0.22
	5 piezas, redondo					0.33
	4 piezas, redondo					0.37
	3 piezas, redondo					0.42
	Puntiagudo, redondo					1.20
	Liso, rectangular					0.18
	T, rama					1.00
	T, flujo a través de la tubería principal					0.10
	Y simétrica					0.30
Amortiguador:						
Posición	0°	10°	20°	30°	40°	50°
	(completamente abierto)					
<i>C</i>	0.20	0.52	1.50	4.5	11.0	29
Rejilla de salida: Suponga que la caída total de presión a través de la rejilla es de 0.06 pulg H ₂ O (15 Pa).						
Lumbreras de alimentación: Suponga que la caída de presión total a través de la lumbrera es de 0.07 pulg H ₂ O (17 Pa).						

Fuente: MOTT, Robert. *Mecánica de fluidos*. p. 523.

Anexo 4. Pérdidas de energía en ductos



Fuente: MOTT, Robert. *Mecánica de fluidos*. p. 521.

Anexo 5. Características de polvos de procesos industriales

36.8 MANUAL DE CALEFACCION, VENTILACION Y AIRE ACONDICIONADO

TABLA 36.1. Características de polvos de procesos industriales.

Servicio	Operación	Concen- tración, g/m ³	MMD, μm	σ _g	d _g g/cm ³	Código*
Cenizas volantes de calderas	Parrilla articulada, carbón	1-5	4-20	3	0,7-3	1
	Hogar mecánico, carbón	5-7	4-20	2-3	0,7-3	2
	Pulverizado, carbón	10-30	4-20	2-3	0,7-3	3
Cerámicas	Combustión de madera	5-20	12	4		4
	Pulverización de frita	1-8	5	2	2,7	5
Productos químicos	Compresión, triturado	5-15	5-20	2	2,5	6
	Secadores, hornos	10-20	10	2	2,5	7
	Ventilación de recipientes	1-5	5-10	2	1	8
	Manejo de materiales	1-20	5-20	2	1	9
Minas y manejo de carbón	Desempolvado, limpieza	10-20	10	1,7	2	10
	Secado	10-20	5-11	1,7	2	11
Fertilizantes	Amoniadores	1-7	5-10	2	2	12
Alimentación	Proceso azucarero	1-11	5-10	2	1,7	13
	Tostado de café	1-5	1-2	2	2	14
	Secado de granos	1-5	20-30	3	2	15
	Manejo de harina	7-10	10	2	1,5	16
Fundiciones	Cubilotos	2-10	1-10	2	4	17
	Hornos eléctricos	0,7-2	0,5-1,5	2	4,5	18
	Moldeo	7-10	2-10	2	2,5	19
	Desmoldeo	3-12	1-10	4	2,5	20
Cueros	Descarnadura	7-11	11	2,5	0,7	21
Metales	Rectificado	0,5-8	10-40	2,5	3-6	22
	Pulido, bruñido	1-5	5-15	2,5	4	23
	Mecanizado	1-8	1-5	2,2	3,7	24
	Soldadura, corte	0,02-1,5	0,5-3	1,8	4	25
	Limpieza abrasiva	7-30	5-10	2	2,5	26
	Pintura con pistola	0,2-3	15-30	2	1,1	27
Papel	Corte	7-10	12	4	1	28
Farmacéutica	Recubrimiento, empaquetado	5-10	5-10	2	1,7	29
Plásticos, caucho	Mezcla	7-11	5	2	1,2	30
	Triturado, pulido	7-11	20	2,5	1,2	31
Metalización	Colector neblina ácida	1-30	1,6-2	1,7	1	32
Imprenta	Salas de imprenta	0,001-0,01	10	3	1,5	33
Productos no metalíferos	Triturado, cribado	10-30	5-10	2,5	2,5	34
	Secadores, hornos	7-20	10-15	2,5	2,5	35
Acería	Horno Martin-Siemens	1-20	0,5-3	2	5,2	36
	Hornos de arco eléctrico	1-5	0,5-1	2	5,2	37
	Hornos de oxígeno básico	5-30	0,5-1	2	5,2	38
	Escarado	1-5	1,5	2,5	6	39
	Sinterizado, nodulización	10-20	5-12	2	5,4	40
	Tren de laminación	1-5	5	2,5	7	41
Textiles	Cardado, tejido	0,001-2	3-10	2,5	1,2	42
	Estirado fibras sintéticas	0,01-2	5	2	1	43
Madera	Aserrado, cepillado	7-12	10-1.000	5	1	44
	Lijado	7-10	10-30	2,6	1	45
Otros	Incineradores	1-15	10-30	3	0,7-2	46
	Admisión motor, compresor	0,001-0,03	1-30	2	2,5	47

* Los códigos de operación se utilizan también en la Tabla 36.10.

Fuente: GRIM, Nils. *Manual de diseño de calefacción, ventilación y aire acondicionado*. p. 83.

Anexo 6. Equipos de control de contaminación particulada: características y campos de aplicación

TABLA 36.10. Equipos de control de contaminación particulada: características y campos de aplicación.

Tipo de equipo	Pérdida de carga*, Pa	Rango de temperatura†, °C		Áreas de aplicación (véase Tabla 36.1 para códigos)
		Mín.	Máx.	
Ciclones a gran escala	125-800	-40	550	4, 5, 9, 10, 15, 16, 22, 28, 31, 35, 42, 44
Ciclones múltiples pequeños	500-1.500	-40	550	1-5, 7, 9, 10, 15, 16, 22, 26, 31, 34, 35, 42
Persianas	125-500	-40	350	47
Colectores dinámicos secos‡		-30	370	5-7, 10, 11, 16, 22, 23, 26, 29, 31, 34, 44, 45
Colectores dinámicos húmedos‡		5	70	5, 7, 9, 13, 19-21, 29, 31, 45
Colectores centrífugos de neblina‡		5	110	24
Filtros de mangas con sacudidas	500-1.500	-30	300	6-10, 17, 26, 35, 42, 44, 45
Filtros de mangas con ciclos de desinflamiento	500-1.500	-30	300	
Filtros de mangas de impulso inverso	500-1.800	-30	300	1-10, 13, 15-17, 20-22, 26, 29, 30, 40
Colectores cartucho impulsado	300-1.000	-20	110	5, 8, 9, 13, 22, 24, 25, 29-31, 45, 47
Lechos de gránulos		-40	800	46
Colector de hilazas	180-400	-20	65	13, 28, 29, 33, 42
Precipitadores electrostáticos, dos etapas, baja tensión	125-375	-30	60	14, 22, 24, 25, 31, 43
Precipitadores electrostáticos, una etapa, alta tensión	125-375	-20	400	1-3, 17, 18, 35-41, 46
Lavadores venturi	2.000-20.000	5	90	7, 11, 12, 17, 18, 35-39, 46, 32
Lavadores de lecho compacto	250-2.500	5	90	32
Depuradores de choque	500-2.000	5	90	6, 7, 9, 19-26, 29, 31, 32, 34, 35, 39, 41
Depuradores boquillas sumergidas	500-1.500	5	90	6, 7, 9, 19-27, 31, 32, 34, 35, 39, 41

* 249 Pa = 1 "H₂O.

† El rango de temperatura se determina por los materiales de construcción, excepto para lavados húmedos. Los valores indicados son típicos para equipos comerciales existentes. Para convertir en unidades USCS: °F = 1,8 × °C + 32.

‡ Estos equipos combinan el ventilador y el colector; normalmente proporcionan presión estática externa de 500 a 2.500 Pa. Los motores requieren protección para trabajar a las temperaturas indicadas.

Fuente: GRIM, Nils. *Manual de diseño de calefacción, ventilación y aire acondicionado*. p. 85.