



1859

# UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA

FACULTAD DE LA ENERGÍA LAS INDUSTRIAS Y LOS  
RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES

**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

**“DISEÑO DE UN TOSTADOR DE CAFÉ MEDIANTE  
FLUJO DE AIRE CALIENTE PARA LA EMPRESA  
CAFÉ INDERA”**

TESIS DE GRADO PREVIO A OPTAR  
POR EL TÍTULO DE INGENIERO  
ELECTROMECAÁNICO

**AUTOR:** Guillermo Xavier Palacios Arias

**DIRECTOR:** Ing. Milton Amable León Tapia

**LOJA-ECUADOR**

**2016**

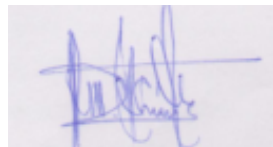
## **CERTIFICACIÓN**

Ing. Milton Amable León Tapia, Mg. Sc., DOCENTE DE LA CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA DE LA FACULTAD DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA Y DIRECTOR DE TESIS,

### **CERTIFICA:**

Que el presente trabajo titulado “DISEÑO DE UN TOSTADOR DE CAFÉ MEDIANTE FLUJO DE AIRE CALIENTE PARA LA EMPRESA CAFÉ INDERA” realizado por el aspirante Guillermo Xavier Palacios Arias, previo a obtener el grado de Ingeniero Electromecánico, se ha desarrollado bajo mi dirección, y luego de revisarlo autorizo su presentación ante el respectivo Tribunal de grado.

Loja, Diciembre de 2016



Ing. Milton Amable León Tapia, Mg. Sc.

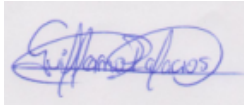
**DIRECTOR DE TESIS**

## **AUTORÍA**

Yo, **GUILLERMO XAVIER PALACIOS ARIAS**, declaro ser el autor del presente trabajo de titulación y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos de posibles reclamos o acciones legales por el contenido de la misma.

Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja, la publicación de mi tesis en el Repositorio Institucional-Biblioteca Virtual.

**Firma:**



**Cédula:** 1105112476

**Fecha:** Loja, 12 de Abril del 2017

**CARTA DE AUTORIZACIÓN DE TESIS POR PARTE DEL AUTOR, PARA LA CONSULTA, REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL Y PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DEL TEXTO COMPLETO.**

Yo, **GUILLERMO XAVIER PALACIOS ARIAS**, declaro ser autor de la tesis titulada: **“DISEÑO DE UN TOSTADOR DE CAFÉ MEDIANTE FLUJO DE AIRE CALIENTE PARA LA EMPRESA CAFÉ INDERA”**, como requisito para optar al grado de **INGENIERO ELECTROMECAÁNICO**; autorizo al Sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que con fines académicos, muestre al mundo la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Digital Institucional:

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el RDI, en las redes de información del país y del exterior, con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia de la tesis que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja a doce días del mes de abril del dos mil diecisiete.

**Firma:**

**Autor:** Guillermo Xavier Palacios Arias

**Cédula:** 1105112476

**Dirección:** Loja (Av. Pablo Palacios y Vía lateral de paso, Barrio Carigan)

**Correo Electrónico:** guillopala@gmail.com

**Teléfono:** 2105264 **Celular:** 0980262081

**DATOS COMPLEMENTARIOS**

**Director de Tesis:** Ing. Milton Amable León Tapia, Mg. Sc.

**Tribunal de Grado:** Ing. Luis Armando Salgado Valarezo, Mg. Sc.

Ing. Byron Agustín Solórzano Castillo, Mg. Sc.

Ing. Miguel Ángel Caraballo Núñez, Mg. Sc.

## **DEDICATORIA**

A la vida por brindarme unos excelentes padres, que me han guiado para poder alcanzar esta meta.

A mi familia, por el apoyo brindado.

**Guillermo Palacios**

## **AGRADECIMIENTO**

A mis padres, por su tenacidad y apoyo incondicional

Al Ing. Milton León por todo el apoyo brindado para poder llevar a buen término el presente trabajo de investigación.

A todos mis maestros, por sus enseñanzas y consejos.

**El Autor**

## TABLA DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN.....	ii
AUTORÍA .....	iii
CARTA DE AUTORIZACIÓN .....	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTO .....	vi
TABLA DE CONTENIDOS .....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	x
ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
SIMBOLOGÍA.....	xiii
1. TÍTULO .....	1
2. RESUMEN.....	2
2.1. ABSTRACT.....	3
3. INTRODUCCIÓN .....	4
4. REVISIÓN DE LITERATURA.....	6
4.1. Proceso de tostado del café.....	6
4.1.1. Principios generales.....	6
4.1.2. Variables básicas de tueste .....	7
4.1.3. Energía de tueste.....	7
4.1.3.1. Humedad de equilibrio.....	9
4.1.3.2. Calor específico del grano de café .....	9
4.1.4. Tiempo de tueste.....	9
4.2. Sistemas de tueste .....	10
4.2.1. Tostadoras por cargas o tandas.....	10
4.2.1.1. Sistema tambor.....	11
4.2.1.2. Sistema turbo o convección.....	11
4.2.1.3. Sistema lecho fluido.....	12
4.3. Diseño de lecho fluidizado .....	12
4.3.1. Componentes del sistema de lecho fluidizado.....	12
4.3.2. Relación de espacio libre entre partículas .....	13

4.3.3.	Esfericidad .....	13
4.3.4.	Diámetro medio de partícula .....	14
4.3.5.	Altura del lecho .....	14
4.3.6.	Velocidad mínima de fluidización.....	15
4.3.7.	Velocidad terminal .....	17
4.3.8.	Diseño del distribuidor .....	18
4.3.8.1.	Coeficiente de arrastre y velocidad local .....	19
4.3.8.2.	Procedimiento generalizado .....	19
4.4.	Sistemas para el tratamiento de humos.....	20
4.5.	Diseño de ciclón.....	20
4.5.1.	Principio de funcionamiento.....	20
4.5.2.	Familias de ciclones .....	22
4.6.	Circulación de aire por conductos .....	25
4.6.1.	Pérdidas de carga .....	25
4.6.1.1.	Tramos rectos .....	25
4.6.1.2.	Conductos rectangulares .....	25
4.6.1.3.	Accidentes en la conducción .....	26
4.6.2.	Cálculo de la pérdida de carga.....	28
4.7.	Ventiladores .....	28
4.7.1.	Definiciones.....	31
4.7.2.	Clasificación de los ventiladores .....	31
4.7.3.	Ventiladores centrífugos.....	32
4.7.4.	Curva característica .....	34
4.7.5.	Punto de trabajo .....	38
4.7.6.	Leyes de los ventiladores.....	40
5.	MATERIALES Y MÉTODOS .....	42
5.1.	Materiales.....	42
5.2.	Métodos .....	42
6.	RESULTADOS .....	44
6.1.	Descripción de la máquina.....	44
6.2.	Diseño de la tolva .....	45
6.3.	Diseño de los ductos de aire.....	52



6.4.	Dimensionamiento del ventilador .....	52
6.5.	Dimensionamiento del sistema de calentamiento de aire .....	55
5.5.1	Dimensionamiento del quemador .....	56
6.6.	Sistema para el tratamiento de Humos .....	57
6.6.1.	Dimensionamiento del ciclón .....	58
6.7.	Aislamiento térmico.....	59
6.8.	Selección de Bridas.....	59
6.9.	Sistema de control.....	59
6.10.	Selección de accesorios .....	62
7.	DISCUSIÓN.....	64
8.	CONCLUSIONES .....	66
9.	RECOMENDACIONES .....	67
10.	BIBLIOGRAFÍA.....	68
11.	ANEXOS.....	71

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Altura del lecho con respecto a la velocidad.....	15
Figura 2	Vórtices en el ciclón.....	21
Figura 3	Principales dimensiones del ciclón de entrada tangencial. ....	23
Figura 4	Diámetro equivalente de un conducto rectangular con igual pérdida de aire. .	26
Figura 5	Conductos circulares rectilíneos (Pérdida de carga por rozamiento del aire)..	27
Figura 6	Coefficientes “n” de pérdida de carga de diversos accidentes en la circulación de aire por conductos. ....	29
Figura 7	Presión dinámica, caudal y diámetro. ....	30
Figura 8	Ventilador de hélice. ....	31
Figura 9	Ventilador centrífugo. ....	32
Figura 10	Rodete centrífugo álabes radiales.....	33
Figura 11	Rodete centrífugo álabes hacia adelante .....	33
Figura 12	Rodete centrífugo álabes hacia atrás .....	33
Figura 13	Pérdida de caudal con la longitud. ....	35
Figura 14	Curva característica de un ventilador. ....	36
Figura 15	Curvas características de los tipos fundamentales de ventilación.....	37
Figura 16	Punto de trabajo de un ventilador. ....	39
Figura 17	Esquema general de la máquina. a) Tolva contenedora de café, b) Ductos de aire, c) Ventilador centrífugo, d) ciclón de lavado, e) Quemador de GLP.....	45
Figura 18	Cálculo de la densidad del café tostado. ....	46
Figura 19	Sección uniformadora .....	49
Figura 20	Distribución de Agujeros .....	51
Figura 21	Quemador de GPL COFACO ® .....	57
Figura 22	Diagrama de Flujo del controlador VG310 AMCE. ....	60
Figura 23	Instalación Correcta del sensor. ....	62
Figura 24	a) Tolva de alimentación b) Ducto de descarga .....	63
Figura 25	Tostador de café Roster-Nesco .....	72
Figura 26	Tostador de café 1. ....	77
Figura 27	Tostador de café 2. ....	77
Figura 28	Tostador de café 3 .....	78
Figura 29	Proceso de soplado.....	78
Figura 30	Esfuerzo de Von Mises. Espesor 3mm .....	82
Figura 31	Deformación Unitaria. Espesor 3mm.....	83
Figura 32	Desplazamiento. Espesor 3mm .....	83
Figura 33	Esfuerzo de Von Mises Espesor 1.5mm .....	84
Figura 34	Desplazamiento. Espesor 1.5mm .....	85
Figura 35	Deformación Unitaria. Espesor 1.5mm.....	85
Figura 36	Esfuerzo de Von Mises. Espesor 2mm .....	86
Figura 37	Desplazamiento. Espesor 2mm .....	87

Figura 38	Deformación Unitaria. Espesor 2mm.....	87
Figura 39	Presión dinámica en el ducto de aire.....	89
Figura 40	Selección de ventilador .....	90
Figura 41	Dimensiones Ventiladores CWTO Rotor O.....	91
Figura 42	Dimensiones de acople rectanfular-circular.....	93
Figura 43	Selección de malla de protección en succión.....	97
Figura 44	Selección de brida de succión .....	98
Figura 45	Diagrama de control.....	101
Figura 46	Diagrama de Fuerza .....	102
Figura 47	Mirilla tipo parche Franko® Serie 6020 .....	103
Figura 48	Termómetro marca WIKA® .....	104

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Características de los ciclones de alta eficiencia.....	24
Tabla 2 Características de los ciclones convencionales. ....	24
Tabla 3 Características de los ciclones de alta calidad.....	24
Tabla 4 Leyes de los ventiladores.....	41
Tabla 5 Cálculo de calor total requerido para tostar 40kg de café en una hora.....	56
Tabla 6 Características eléctricas de los terminales. ....	61
Tabla 7 Selección de Método de calentamiento y movimiento de café .....	71
Tabla 8 Criterios de selección del método de calentamiento .....	71
Tabla 9 Criterios de selección de método de movimiento del café .....	72
Tabla 10 Características Físicas del Café .....	79
Tabla 11 Densidad de varios materiales .....	80
Tabla 12 Propiedades físicas del aire .....	81
Tabla 13 Propiedades Físicas y Mecánicas del Acero Inoxidable .....	88
Tabla 14 Dimensiones de aspiración y descarga del ventilador.....	92
Tabla 15 Humedad Relativa de la ciudad de Loja.....	94
Tabla 16 Calor específico de varios materiales .....	95
Tabla 17 Modelos, potencias y medidas de Quemadores COFACO .....	96
Tabla 18 Aislamiento para Tuberías calientes.....	99
Tabla 19 Características de Junta L-443 marca LAMONS®.....	100

## SIMBOLOGÍA

$Q_T$	Calor total
$Q_1$	Calor sensible del grano de café
$Q_2$	Calor sensible contenida en el grano de café
$Q_3$	Calor sensible del vapor de agua
$Q_4$	Calor latente del vapor de agua
$\dot{m}_{vapor}$	Flujo másico del vapor
$\dot{m}_{café}$	Flujo másico del café
$\dot{m}_{agua}$	Flujo másico del agua
$C_p$	Calor específico
$L$	Calor Latente
$M$	Humedad de equilibrio de café
$HR$	Humedad relativa del aire ambiente
$C_{p\text{ café}}$	Calor específico del grano de café
$\varepsilon_{mf}$	Porosidad del lecho en condiciones de fluidización mínima
$\Phi$	Esfericidad
$a_g$	Longitud del grano
$b_g$	Ancho del grano
$c_g$	Altura del grano
$V$	Volumen ocupado por las partículas
$A$	Área transversal del lecho
$L_1$	Altura del lecho
$L_{mf}$	Altura mínima de fluidización
$\varepsilon_0$	Porosidad del lecho fijo
$\Delta P_{lecho}$	Caída de presión del lecho
$\rho_s$	Densidad de la partícula
$\rho_g$	Densidad del gas
$g$	Fuerza de gravedad
$d_p$	Diámetro equivalente
$\mu$	Viscosidad dinámica
$u_0$	Velocidad del gas
$u_{mf}$	Velocidad mínima de fluidización
$Re$	Número de Reynolds
$K_1$	Constante de fluidización de Ergun
$K_2$	Constante de fluidización de Ergun
$Ar$	Número de Arquímedes

$u_t$	Velocidad terminal
$C_D$	Coefficiente de descarga
$r_p$	Relación de caída de presión
$\Delta P_{distribuidor}$	Caída de presión del distribuidor
$u_{or}$	Velocidad Local
$C_{dor}$	Coefficiente de arrastre
$t$	Espesor del distribuidor
$d_{or}$	Diámetro de los orificios
$N_{or}$	Número de orificios del distribuidor
$Dc$	Diámetro del ciclón
$a$	Altura de entrada
$b$	Ancho de entrada
$S$	Altura de salida
$Ds$	Diámetro de salida
$h$	Altura parte cilíndrica
$z$	Altura parte cónica
$H$	Altura total del ciclón
$B$	Diámetro salida partículas
$G$	Factor de configuración
$NH$	Número cabezas de velocidad
$N$	Número de vórtices
$P_t$	Presión total
$P_d$	Presión dinámica
$\Delta P$	Perdida de presión
$P_e$	Presión estática
$P_1$	Presión Inicial
$P_2$	Presión final
$N_1$	Potencia Inicial
$N_2$	Potencia Final
$\frac{n_2}{n_1}$	Relación de velocidades
$V_r$	Volumen del recipiente

$m$	Masa de café
$\rho$	Densidad del café tostado
$V_{ct}$	Volumen de café tostado
$u_{op}$	Velocidad de operación
$\epsilon_{op}$	Porosidad del lecho en operación
$L_{op}$	Altura de operación
$hf_p$	Pérdidas primarias en el ducto
$hf_s$	Pérdidas secundarias en el ducto
$Z$	Altura del ducto
$P_t$	Presión total
$\gamma$	Viscosidad Cinemática
$P_e$	Presión estática
$P_d$	Presión dinámica
$I_{or}$	Espacio entre orificios

## **1. TÍTULO**

**“DISEÑO DE UN TOSTADOR DE CAFÉ MEDIANTE FLUJO DE AIRE CALIENTE PARA LA EMPRESA CAFÉ INDERA”**



## **2. RESUMEN**

La empresa Café Indera, con su local de distribución y ventas ubicado en la ciudad de Loja, calles 18 de noviembre entre 10 de agosto y José Antonio Eguiguren, busca mejorar sus procesos de producción, en específico el proceso de tueste del café, implementando nuevas tecnologías.

El presente proyecto propone una solución a este problema diseñando un tostador de café utilizando flujo de aire caliente, esta solución se basa en que el sistema propuesto asegura tueste uniforme, control de calidad, mejora las condiciones de trabajo, disminuye el riesgo de accidentes, se reduce costos de mano de obra, entre otras ventajas.

Basado en información técnica sobre la propuesta de tostadora y en las necesidades productivas de la empresa se diseñó y dimensionó cada uno de los componentes primordiales, prestando mayor atención a la caracterización del flujo de aire caliente y a los elementos electromecánicos que aseguren los parámetros funcionales requeridos.

El diseño obtenido propone el uso de un ventilador centrífugo para aplicaciones industriales y un sistema de calentamiento de aire que emplee GLP por el poder calorífico que brinda y su fácil adquisición en la actualidad.

## **2.1. ABSTRACT**

The company Café Indera, with its distribution and sales store located in the city of Loja, in the streets 18 de Noviembre between 10 de Agosto and José Antonio Eguiguren, seeks the improvement of the production processes, specifically the coffee roasting process, implementing new technologies.

The present project proposes a solution to this problem by designing a coffee roaster using hot air flow, this solution is based on the proposed system ensures uniform roasting, quality control, improves working conditions, reduces the risk of accidents, reduce labor costs, among other advantages.

Based on technical information about the toaster proposal and the productive needs of the company, each of the main components was designed and dimensioned, paying more attention to the characterization of the hot air flow and to the electromechanical elements that ensure the required functional parameters.

The design obtained proposes the use of a centrifugal fan for industrial applications and an air heating system that uses LPG for the calorific power that it provides and its easy acquisition at present.

### **3. INTRODUCCIÓN**

El tostado viene a ser uno de los procesos más delicados dentro de la cadena del café, ya que es aquí donde se obtendrán los aromas y sabores, que serán percibidos al momento de degustar una taza de café. Estos aromas y sabores dependen del sistema de tueste y de la tonalidad que tendrá el café al finalizar el proceso de tostado.

La empresa café Indera actualmente utiliza, como materia prima café arábigo lavado (humedad 13%), para el proceso de tostado de café, máquinas rotacionales tipo tambor y como combustible GLP, tres operarios son los encargados de manipular estas máquinas produciendo a diario 90 kg de café tostado aproximadamente.

Para poder expandir el mercado que ocupa actualmente, la empresa necesita mejorar los sistemas empleados para el procesado de café, aumentar la producción diaria, y manejar varias tonalidades de tueste, mejorando así la calidad del producto final.

Al ser el proceso de tostado uno de los principales factores que afecta la calidad del café, se supone, que al reformar dicho proceso el producto final mejorará. Durante el proceso de tostado, el café debe mantenerse en constante movimiento, la temperatura varía a lo largo del proceso, para lograr que los granos de café tengan una tonalidad homogénea.

El sistema de lecho fluidizado emplea fluidos para mantener en constante movimiento las partículas que se encuentran dentro de ellos, se empleará aire caliente como fluido y las partículas que se desea mantener en movimiento serán granos de café seco, una de las principales ventajas que presenta el proceso de fluidización es la alta superficie de contacto, lo cual representa una excelente transferencia de calor y permite obtener una temperatura homogénea, dando como resultado un tueste uniforme y permitiendo controlar la tonalidad del grano al finalizar el proceso.

Teniendo en cuenta lo antes expuesto se propone diseñar un tostador de café que emplee flujo de aire caliente.

La revisión de literatura recoge varios aspectos correspondientes al proceso de tostado del café y distintos sistemas de tueste que existen en la actualidad, permitiendo conocer y determinar el sistema que brinda mayores beneficios. Seguido, se presenta información sobre fluidización, lecho fluidizado, tratamiento de humos y diseño de ciclones. Finalmente se considera la circulación de aire por conductos y ventiladores, cubriendo así todos los requerimientos para diseñar un tostador de café que emplee flujo de aire caliente.

Los resultados expuestos en el presente trabajo son: descripción de la máquina, diseño de tolva, diseño del lecho fluidizado, diseño de los ductos de aire, dimensionamiento del ventilador, dimensionamiento del sistema de calentamiento de aire, selección del quemador, diseño del sistema de tratamiento de humos, sistema de control y selección de accesorios.

Por último se expone la discusión, conclusiones y recomendaciones a las cuales se llegó al culminar el presente trabajo.

## 4. REVISIÓN DE LITERATURA

### 4.1. Proceso de tostado del café

Ya en verde, el grano de café tiene una vida de un año como máximo. Lo ideal es tostar el café en las épocas tempranas del grano. Es en este cuarto de hora, aproximadamente, cuando se forman alrededor de 800 sustancias responsables del sabor y el aroma del café. (Café La Nacional, 2017)

#### 4.1.1. Principios generales

El tueste del café es una fase vital dentro de su cadena de elaboración. Hay quien sostiene, y no le falta razón, que un buen tueste influye más en la calidad de una taza de café, que la bondad de la mezcla escogida. El proceso de tostar los granos del café verde consiste en someterlos durante un tiempo limitado a una alta temperatura, intervalo durante el cual:

- Pierde peso, alrededor del 15-20%, debido en gran parte a la evaporación de su humedad y en menor parte a la pirólisis<sup>1</sup> de algunos componentes.
- El grano aumenta de volumen, entre un 100 y un 130% en el caso del café natural en función del tiempo de tueste y entre el 70 y el 80% para el torrefacto.
- Su color amarillo verdoso se transforma en un marrón, más o menos oscuro en función del grado de tueste escogido.
- La composición química del grano sufre una importante transformación, tanto a nivel cuantitativo como cualitativo. Azúcares, grasas, proteínas, sustancias nitrogenadas no proteicas, ácidos, entre otros, todo sufre una transformación debido a las altas temperaturas a que es sometido el grano. (Solà, 2014)

Este último punto es el más interesante desde una óptica gastronómica pues es de ahí de donde surgen los aromas y sabores que han convertido al café en el rey de las infusiones. El papel principal en este proceso está a cargo de las transformaciones de los carbohidratos, las grasas y los ácidos. Y una carac-

---

<sup>1</sup> Descomposición química de materia orgánica y todo tipo de materiales, excepto metales y vidrios, causada por el calentamiento a altas temperaturas en ausencia de oxígeno.

terística física importantísima es la solubilidad del café tostado y molido, factor decisivo para proceder a su infusión.

#### **4.1.2. Variables básicas de tueste**

Las variables básicas en el proceso de tueste del café son la temperatura y el tiempo en que ésta actúa. La temperatura no es constante, sino que varía a lo largo del proceso y los tiempos son inversamente proporcionales a la temperatura. Es difícil dar pautas generales pues intervienen:

- Las características técnicas de las instalaciones industriales empleadas y las distintas tecnologías utilizadas por cada fabricante.
- Los niveles de producción esperados: no es lo mismo el sistema empleado por un tostador medio, que puede tostar unas horas al día, que el necesario para una gran empresa funcionando sin interrupción.
- El gusto de cada mercado o tipo de consumidor. Los países nórdicos gustan de un café menos tostado que los mediterráneos, la hostelería precisa un café distinto al consumido en alimentación, las máquinas de café expreso requieren distinto tipo de café que una doméstica. (Solà, 2014)

#### **4.1.3. Energía de tueste**

La energía requerida para el tostado de café o cantidad de calor necesaria, depende básicamente de la temperatura a la que se va a tostar el grano de café y el tiempo.

La temperatura de tueste depende del tipo de máquina de tostar, del tiempo de tueste y de la intensidad del color final requerido.

El proceso de tostado consta de tres fases primordiales, en una primera fase se seca la humedad del café y es la fase que influye menos en el gusto final. En una segunda fase se origina la expansión de las celdillas del grano de café y empieza la creación de los gases. La tercera fase debe ser más lenta pues es la que confiere básicamente el gusto final al producto.

Primero, el café verde se seca para eliminar cualquier residuo de humedad, esto depende del tipo de máquina que se va a utilizar para realizar el proceso de tueste

del grano, y después se lleva a una temperatura de aproximadamente 200 °C. La primera fase del tueste es de intercambio de calor: el grano en bruto empieza a absorber el calor, lentamente se seca y toma un color dorado, mientras se forma un agradable perfume ha tostado.

En la segunda fase, el grano adquiere el 60% de su volumen, adoptando un ligero color pardo. Surge el primer tronido del café (primer crack), indicándonos su expansión en volumen. El aroma se fortalece, y se vuelve un poco picante, ácido, ya que el café no ha desarrollado aún sus propiedades. El café se expande hasta al doble de su tamaño original y pierde un 15% de su peso. Una vez alcanzados los 220 °C, se obtienen los cafés claros. El humo que despide es blanquizco, formado por el dióxido de carbono, pero el aroma ya es mucho más agradable, dejando percibir los aromas frutales del café. Entre los 225 y 227°C, se obtienen cafés de tuestes medios, y cerca del 228 °C, se obtiene un segundo tronido (segundo crack), indicándonos que entramos a la región de tuestes medio oscuros. Hasta los 230°C se consideran en este nivel de tueste, y a partir de ahí, se vuelven tuestes oscuros (existen subdivisiones de estos tuestes: cubano, italiano y francés). (Solà, 2014)

Lo antes expuesto expresado matemáticamente se resume de la siguiente manera:

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \quad \text{Ecuación 1}$$

Dónde:

$Q_T$ : Calor total

$Q_1 = \dot{m}_{café} Cp \Delta T$ ; Calor sensible del grano de café

$Q_2 = \dot{m}_{agua} Cp \Delta T$ ; Calor sensible del agua contenida en el grano de café

$Q_3 = \dot{m}_{vapor} Cp \Delta T$ ; Calor sensible del vapor de agua

$Q_4 = \dot{m}_{vapor} L$ ; Calor latente del vapor de agua

$\dot{m}_{vapor}$  : Flujo másico del vapor

$\dot{m}_{café}$  : Flujo másico del café

$\dot{m}_{agua}$  : Flujo másico del agua

$C_p$  : Calor específico

$L$  : Calor latente

#### 4.1.3.1. Humedad de equilibrio

Cuando un grano húmedo se pone en contacto con una corriente de aire la transferencia de la humedad del grano termina cuando la presión de vapor del agua en la superficie del grano se iguala con la presión de vapor del aire. Fenómeno que depende del contenido de humedad del grano, de la humedad de aire y de la temperatura a la que se encuentren el sistema aire-grano de café y es conocido como humedad de equilibrio. (Campo, 2013)

$$M = (61.03084HR - 108.3714HR^2 + 74.461059HR^3)e^{[-0.03704HR + 0.070114HR^2 - 0.035177HR^3]} \text{Ecuación 2}$$

Dónde:

$M$ : Humedad de equilibrio de café

$HR$ : Humedad relativa del aire ambiente

#### 4.1.3.2. Calor específico del grano de café

La relación reportada para el cálculo del calor específico es la siguiente:

$$C_{p \text{ café}} = 1.3556 + 5.7859M \text{Ecuación 3}$$

(Campo, 2013)

#### 4.1.4. Tiempo de tueste

Oscila entre un minuto y un máximo de 15 o hasta 30 minutos, según el sistema empleado para realizar esta operación:

**Sistema lento.** - de 15 a 20 minutos, es muy apreciado por los tostadores artesanos. Se consigue así un grano con un color oscuro y uniforme, bonito, con una óptima presencia para ser vendido al detalle y en grano.



**Proceso rápido.** - de 1 a 3 minutos, tiene detractores que le achacan que produce menos calidad que el sistema anterior. Con él se obtiene menos merma al tostar, se gana alrededor de un 2%, y se utiliza principalmente para tostar los cafés de calidades inferiores, normalmente vendidos molidos. El sistema de tueste rápido se aplica en países nórdicos y no es que produzca una menor calidad, sino que da un resultado al gusto local; allí no es aceptado el tueste tipo español pues le encuentran un exceso de acidez y agresividad en el paladar. (PROBAT®, 2010)

## **4.2. Sistemas de tueste**

Hay dos grandes divisiones:

Tostadoras por cargas y tostadoras en continuo, según se encadenen procesos de tueste uno tras otro, o sea un único proceso continuamente alimentado.

A continuación, se señalan todos los tipos y subtipos de sistemas de tueste, que se conoce:

- Tostadoras por cargas o tandas
  - Sistema Tambor
  - Sistema Turbo o convección
  - Sistema lecho fluido
- Tostadoras continuas
- Tostadoras para torrefacto
- Tueste mixto
- Tueste rápido

Se pondrá mayor atención a las tostadoras por cargas o tandas por presentar mejores características y ventajas para tostadoras de tamaño medio o pequeño. (Solà, 2014)

### **4.2.1. Tostadoras por cargas o tandas**

Es el sistema más extendido, utilizado por la mayoría de tostadores de tamaño medio o pequeño. Existe un abanico de máquinas con capacidad de tueste que va desde los 5 kg hasta los 600 kg. Dentro de este apartado, se puede contemplar varias clases.

#### **4.2.1.1. Sistema tambor**

Es un proceso largo, entre 12 y 18 minutos, y se tuesta por aire caliente. La cantidad de aire caliente se mantiene constante o varía según las características de la tostadora, escalonando su temperatura durante todo el proceso. Este aire es relativamente seco, con un contenido de agua de los gases de escape de 18 g por m<sup>3</sup>. Con este sistema se consigue una gran uniformidad del tueste del grano, tanto en el núcleo como en la superficie, debido al reparto uniforme del aire caliente en toda la masa de café que está girando dentro del bombo. Este sistema es óptimo para tostar cafés de diferentes características y permite realizar tuestes oscuros.

No existe un sistema único que guíe todos los pasos dentro del proceso: cada fabricante y cada tostador, en función de su experiencia, de sus gustos personales y de la variedad de café tratada, le da un sello personal. Así, varían el escalado de temperatura, siempre oscilando alrededor de los 200 °C, o introducen aire ambiente para abrir el grano y no requemarlos al frenar la combustión, o vaporizan el café en la última fase del tueste inyectando agua a razón de +/- 1 litro por cada 10 kg de café. Hay quien está en contra de añadir agua en esta fase pues han comprobado que puede enranciar el café y prefiere el sistema de enfriado por aire, que potencia la conservación de aromas y sabores. (Solá, 2012)

#### **4.2.1.2. Sistema turbo o convección**

Es una variante del sistema convencional a tambor. La diferencia estriba en que la aportación de calor se realiza totalmente por convección y prácticamente sin conducción, permitiendo unos tuestes más rápidos, del orden de 5 a 6 minutos. La temperatura del aire de tueste es de aproximadamente 550 ° C, escalonándose durante el proceso y regulando su cantidad en determinados momentos. (Solá, 2012)

Existen máquinas de este tipo que pueden tostar café hasta en 14 minutos haciendo unas adaptaciones en su funcionamiento original. El café en estas máquinas está en flotación y por lo tanto los granos no se pueden quemar con el contacto de las partes metálicas con temperaturas más altas que las del aire caliente.

#### **4.2.1.3. Sistema lecho fluido**

Es una combinación de los sistemas tambor y convección. Con este sistema se puede obtener una gran variedad de tipos de tueste.

El café está en una cámara estática, que tiene perforada únicamente la base, por donde se inyecta aire caliente a presión, que provoca que los granos de café se muevan en suspensión. El café es impulsado por una fuerte corriente de aire caliente que fluye del fondo perforado, obligando al café a elevarse por un lateral describiendo una curva o bóveda en la parte superior de la cámara y descendiendo por el lateral opuesto. Durante el proceso, los humos son aspirados y se elimina la cascarilla, que es depositada en un ciclón colector. (PROBAT, 2010)

#### **4.3. Diseño de lecho fluidizado**

La fluidización ocurre cuando pequeñas partículas sólidas son suspendidas por una corriente de un fluido que se dirige de abajo hacia arriba venciendo el peso de las mismas. Cuando la velocidad del fluido debe ser lo suficientemente alta como para suspender las partículas, pero a la vez no tan elevada como para expulsar las partículas fuera del recipiente. Las partículas sólidas rotan en el lecho rápidamente, creándose un excelente mezclado. El material que se fluidiza es casi siempre un sólido y el medio que fluidiza puede ser tanto líquido como gas. Las características y comportamiento de los lechos fluidizados dependen fuertemente de las propiedades del sólido y del fluido. (Centro Científico Tecnológico Bahía Blanca, 2017).

##### **4.3.1. Componentes del sistema de lecho fluidizado**

El lecho fluidizado depende mucho del tipo de fluidización que se esté realizando y la aplicación que quiera tenerse, pero puede decirse que existen ciertos componentes que son bastante comunes en todos ellos. A continuación se describe brevemente los elementos más significativos:

- Columna de fluidización: consiste en un tubo sobre el cual viajará el fluido que suspenderá las partículas.

- Sección uniformadora: se trata de un cono difusor que existe con el objeto de obtener un perfil de velocidad deseado.
- Distribuidor: consiste en una placa con algunas perforaciones. Es uno de los componentes más importantes, ya que su diseño impacta directamente en la calidad de la fluidización.
- Sistema de suministro de fluido: consiste en un sistema de válvulas reguladoras de flujo, calentadores, ventiladores y otros dispositivos con el objeto de proporcionar el fluido en las condiciones termodinámicas requeridas. (Delgadillo Vargas, 2017)

#### 4.3.2. Relación de espacio libre entre partículas

La relación de espacio libre entre partículas representa la porosidad del lecho fluidizado que está ocupada por el espacio entre moléculas. Se representa con  $\varepsilon_{mf}$  en condiciones de fluidización mínima.

El conocimiento de  $\varepsilon_{mf}$  es muy importante en el estudio de la fluidización. La forma más común de determinarlo es por medio de la experimentación, se lo puede calcular de la siguiente manera:

$$\varepsilon_{mf} = 1 - \frac{\text{volumen del sólido}}{\text{volumen del lecho}} \quad \text{Ecuación 4}$$

El volumen sólido es conocido, ya que se tiene la densidad del material y la masa se puede medir fácilmente. (Kunii & Levenspiel, 1969)

#### 4.3.3. Esfericidad

El parámetro de la esfericidad se utiliza debido a que las partículas en los lechos suelen ser irregulares, así que al conocer su esfericidad se puede saber que tan esféricas son o cuanto difieren de una esfera regular. La esfericidad se define de la siguiente manera:

$$\Phi = \frac{\text{área superficial de la esfera}}{\text{área superficial de la partícula}} \quad \text{Ecuación 5}$$

El área superficial de la esfera debe ser del mismo volumen de una partícula. (Guarneros, 2017).

La esfericidad también se la puede calcular con la relación de las dimensiones del grano de café. (Mohsenin, 1970):

$$\Phi = \frac{(a_g b_g c_g)^{1/3}}{a_g} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

$a_g$  : Longitud del grano

$b_g$  : Ancho del grano

$c_g$  : Altura del grano

#### **4.3.4. Diámetro medio de partícula**

Es lógico pensar que las partículas a fluidizar nunca van a ser iguales. Sin embargo, muchos de los parámetros dependen del diámetro medio de partículas. Para poder calcularlo, es necesario conocer la distribución de esta variable, lo cual es posible realizando un muestreo.

#### **4.3.5. Altura del lecho**

Es importante describir dos diferentes estados de un lecho: fijo y fluidizado. Se le llama lecho fijo cuando la diferencia de presión varía con respecto a la velocidad, esto es, en valores menores que la mínima de fluidización. En estas condiciones, la altura del lecho permanece constante debido a que las partículas no han sido aún suspendidas.

Cuando el fluido alcanza la velocidad mínima de fluidización, entonces su altura comienza a cambiar. El fenómeno de expansión es una característica de los lechos fluidizados. La Figura 1 se muestra este comportamiento:

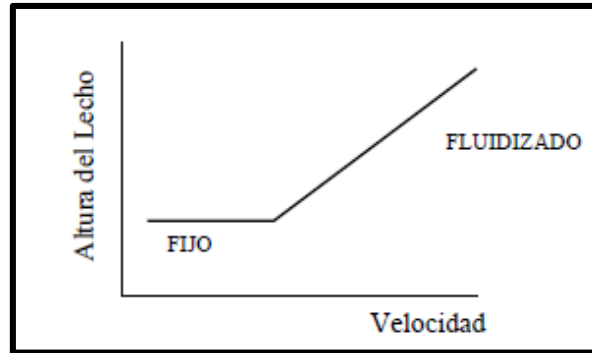


Figura 1 Altura del lecho con respecto a la velocidad.

Fuente: (Patiño, 2017)

La altura del lecho se la puede calcular, despejando de la ecuación de volumen que ocuparán las partículas, como se indica a continuación:

$$V = AL_1 \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

$A$  : Área transversal del lecho

$L_1$  : Altura del lecho

Y la altura de mínima fluidización se la puede calcular en función de la porosidad del lecho (Kunii & Levenspiel, 1969), como se expresa en la Ecuación 8.

$$\frac{L_1}{L_{mf}} = \frac{(1-\varepsilon_{mf})}{(1-\varepsilon_0)} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

$L_{mf}$  : Altura mínima de fluidización

$\varepsilon_0$  : Porosidad del lecho fijo

#### 4.3.6. Velocidad mínima de fluidización

La velocidad mínima de fluidización es una propiedad de la partícula. Esta propiedad es sensible a su forma, densidad y tamaño. Hay tres procedimientos básicos para generar ecuaciones que correlacionen estos datos. Estos son válidos tanto para sistemas de fluidización líquido-sólido y gas-sólido.

El inicio de la fluidización comienza cuando el peso de las partículas es igualado por la caída de presión, así que:

Fuerza de arrastre = peso de las partículas

$$\left( \begin{array}{c} \text{Caída} \\ \text{de} \\ \text{presión} \end{array} \right) \left( \begin{array}{c} \text{Área} \\ \text{transversal} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \text{Volumen} \\ \text{del lecho} \end{array} \right) \left( \begin{array}{c} \text{Fracción} \\ \text{sólida} \end{array} \right) \left( \begin{array}{c} \text{Peso} \\ \text{específico de} \\ \text{los sólidos} \end{array} \right)$$

Matemáticamente se expresa de la siguiente forma:

$$\Delta P_{lecho} A = A L_{mf} (1 - \varepsilon_{mf}) [(\rho_s - \rho_g) g] \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

$\Delta P_{lecho}$  : Caída de presión del lecho

$\rho_s$  : Densidad de la partícula

$\rho_g$  : Densidad del gas

$g$  : Fuerza de gravedad

Reordenando términos se tiene:

$$\frac{\Delta P_{lecho}}{L_{mf}} = (1 - \varepsilon_{mf}) [(\rho_s - \rho_g) g] \quad \text{Ecuación 10}$$

El valor de  $\varepsilon_{mf}$  se lo determina experimentalmente. (Delgadillo Vargas, 2017)

Ergun en su libro “*Fluid flow through packed columns*”, correlacionó la caída de presión friccional de lechos de longitud  $L_{mf}$ , conteniendo partículas de diámetro  $d_p$  con la siguiente expresión:

$$\frac{\Delta P_{lecho}}{L_{mf}} g = 150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})^2}{\varepsilon_{mf}^3} \frac{\mu \cdot u_0}{(\Phi d_p)^2} + 1.75 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3} \frac{\rho_g \cdot u_0^2}{\Phi d_p} \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde:

$\mu$  : Viscosidad dinámica

$u_0$  : Velocidad del gas

Al combinar las Ecuaciones 10 y 11, resulta una ecuación cuadrática de  $u_{mf}$  para sólidos isotrópicos:

$$\frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3 \Phi} \left( \frac{d_p u_{mf} \rho_g}{\mu} \right)^2 + 150 \frac{(1-\varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \Phi^2} \left( \frac{d_p u_{mf} \rho_g}{\mu} \right) = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \quad \text{Ecuación 12}$$

O también:

$$\frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3 \Phi} Re^2 + 150 \frac{(1-\varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \Phi^2} Re = Ar \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde el número de Arquímedes y el de Reynolds se definen como:

$$Ar = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \quad \text{Ecuación 14}$$

$$Re = \frac{d_p u_{mf} \rho_g}{\mu} \quad \text{Ecuación 15}$$

Una forma de determinar la velocidad mínima de fluidización, si no se conocen  $\varepsilon$  y/o  $\Phi$  es:

$$K_1 Re^2 + K_2 Re = Ar \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde:

$$K_1 = \frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3 \Phi}; \text{ Constante de fluidización de Ergun}$$

$$K_2 = \frac{(1-\varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \Phi^2}; \text{ Constante de fluidización de Ergun}$$

Wen y Yu notaron que  $K_1$  y  $K_2$  variaban muy poco para diferentes valores de Reynolds y desde entonces otros investigadores han propuesto valores para estos coeficientes. La alternativa propuesta por ellos se resume en la siguiente expresión:

$$K \frac{\varepsilon_{mf}^3}{1-\varepsilon_{mf}} = u_{mf} \quad \text{Ecuación 17}$$

#### 4.3.7. Velocidad terminal

Una vez que se ha alcanzado la velocidad mínima de fluidización, si se sigue incrementando el caudal de fluido el sistema estará cada vez más vigorosamente fluidizado. Si se sigue aumentando este llegará un momento en que las partículas



sean arrastradas por el fluido, alcanzando lo que se denomina velocidad terminal. Si se aumenta el flujo por encima de la velocidad terminal, tiene lugar el denominado arrastre o transporte neumático de partículas, dejando de existir el lecho fluidizado. (Kunii & Levenspiel, 1969)

Para una partícula aislada, la velocidad terminal viene dada por la aplicación de un balance de cantidad de movimiento, cuya expresión final es:

$$u_t = \sqrt{\frac{4d_p(\rho_s - \rho_g)g}{3\rho_g C_D}} \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde  $C_D$  es un coeficiente de descarga que depende de las características de las partículas y del régimen de circulación del gas. Para el caso de velocidad terminal, el número de Reynolds es muy grande y  $C_D$  no puede obtenerse de forma teórica y su estimación está basada en correlaciones experimentales. Kunii y Levenspiel obtuvieron una correlación experimental para el valor de  $C_D$  en función de  $\Phi$  y  $Re$ , cuyo resultado se muestra en la Ecuación 19.

$$C_D = \frac{24}{Re} [1 + (8.171e^{-4.0566\Phi})Re^{0.0964+0.5565\Phi}] + \frac{73.69Re(e^{-5.0748\Phi})}{Re+5.37e^{6.2122\Phi}} \quad \text{Ecuación 19}$$

Los resultados de la ecuación anterior, introducidos en la Ecuación 18, dan directamente la velocidad terminal.

#### 4.3.8. Diseño del distribuidor

En el diseño de un distribuidor existen diferentes parámetros que son importantes. Entre ellos están la caída de presión, el coeficiente de arrastre, la velocidad local esperada, el número de orificios, la longitud de celda unitaria y el espesor del distribuidor. (Patiño, 2017)

La caída de presión en el distribuidor se diseña con respecto a la caída de presión producida por el lecho fluidizado. Para esto se utiliza la relación de caída de presión que se muestra en la Ecuación 20.

$$r_p = \frac{\Delta P_{distribuidor}}{\Delta P_{lecho}} \quad \text{Ecuación 20}$$

#### 4.3.8.1. Coeficiente de arrastre y velocidad local

Para obtener la velocidad local en cada orificio, se utiliza la siguiente relación:

$$u_{or} = C_{dor} \sqrt{\frac{2\Delta P_{distribuidor}}{\rho_g}} \quad \text{Ecuación 21}$$

Donde:

$u_{or}$  : Velocidad local [m/s]

$C_{dor}$  : Coeficiente de arrastre

Si  $\frac{t}{d_{or}} > 0.09$  se puede calcular el valor del coeficiente de arrastre como se muestra a continuación: (Clift, 1986)

$$C_{dor} = 0.82 \left(\frac{t}{d_{or}}\right)^{0.13} \quad \text{Ecuación 22}$$

Donde:

$t$  : Espesor del distribuidor [mm]

$d_{or}$  : Diámetro de los orificios [mm]

#### 4.3.8.2. Procedimiento generalizado

Para el diseño de un distribuidor se deben seguir los siguientes pasos:

- Determinar la caída de presión necesaria a lo largo del distribuidor, utilizando un valor de  $r_p$  adecuado.
- Obtener el valor correspondiente de  $C_{dor}$ .
- Determinar la velocidad del gas a través del orificio. La relación  $u_0/u_{or}$  nos da la fracción de área libre en el distribuidor. Confirmar que este valor es menor de 10%.
- Decidir el número de orificios por unidad de área necesarios en el distribuidor, encontrar el diámetro de orificio correspondiente usando la Ecuación 23. (Kunii & Levenspiel, 1969)

$$u_o = \frac{\pi}{4} d_{or}^2 u_{or} N_{or} \quad \text{Ecuación 23}$$

Donde:

$N_{or}$  : Número de orificios del distribuidor

#### **4.4.Sistemas para el tratamiento de humos**

Existen normativas para evitar la contaminación atmosférica causada por las emisiones de humos en el proceso de tostado del café y varios sistemas para eliminar la contaminación ambiental o reducir las emisiones a los límites adecuados, los métodos más aplicados son:

- Recirculación
- Quemador de humos
- Catalizador
- Ciclón de lavado

#### **4.5.Diseño de ciclón**

##### **4.5.1. Principio de funcionamiento**

En un ciclón, la trayectoria del gas comprende un doble vórtice, en donde el gas dibuja una espiral descendente en el lado externo, y ascendente, en el lado interno. La Figura 2 ilustra dichos vórtices.

En un ciclón, el gas entra en la cámara superior tangencialmente y desciende en espirales hasta el ápice de la sección cónica; luego, asciende en un segundo espiral, con diámetro más pequeño, y sale por la parte superior a través de un ducto vertical centrado. Los sólidos se mueven radialmente hacia las paredes, se deslizan por las paredes, y son recogidos en la parte inferior. El diseño apropiado de la sección cónica del ciclón obliga al cambio de dirección del vórtice descendente; el vórtice ascendente tiene un radio menor, lo que aumenta las velocidades tangenciales; en el cono se presenta la mayor colección de partículas, especialmente de las partículas pequeñas al reducirse el radio de giro. (Petit, Pico, & Barbosa, 2013)

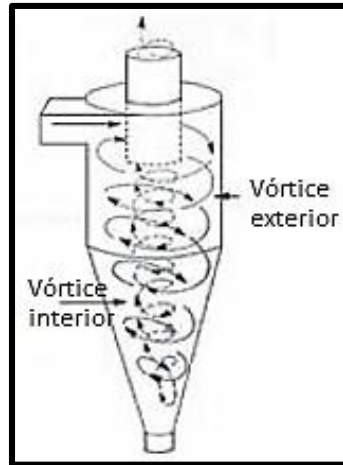


Figura 2 Vórtices en el ciclón.

Fuente: (Londoño, 2016)

Los ciclones se diseñan habitualmente de tal modo que se satisfagan ciertas limitaciones bien definidas de caída de presión. Para instalaciones ordinarias que operan más o menos a la presión atmosférica, las limitaciones del ventilador dictaminan, casi siempre, una caída de presión máxima permisible correspondiente a una velocidad de entrada al ciclón dentro del intervalo de 15.2 a 27.4 m/s. Por consiguiente, los ciclones se suelen diseñar para una velocidad de entrada de 22 m/s, aunque no es necesario apegarse estrictamente a este valor. (Escobar, Arestegui, Moreno, & Sanchez, 2013)

Las siguientes son algunas de las características que debe cumplir la corriente de emisión para utilizar ciclones:

- Caudal de aire: los caudales típicos de gas para unidades de un solo ciclón son de 0.5 a 12  $m^3/s$  a condiciones de referencia. Los caudales en la parte alta de este intervalo y mayores (hasta aproximadamente 50  $m^3/s$ ) utilizan multiciclones. Hay ciclones que se emplean en aplicaciones especializadas, las cuales tienen flujos desde 0.0005 hasta 30  $m^3/s$ .
- Temperatura: las temperaturas del gas de entrada están limitadas únicamente por los materiales de construcción de los ciclones y han sido operados a temperaturas tan altas como 540°C.

- Concentración de partículas: las concentraciones típicas de partículas en el gas van de 2.0 a 230  $\text{g}/\text{m}^3$  a condiciones de referencia. En aplicaciones especializadas, estas cargas pueden ser tan altas como 16.000  $\text{g}/\text{m}^3$  y tan bajas como 1.0  $\text{g}/\text{m}^3$ .

El procedimiento general de diseño es el siguiente:

- Seleccionar el tipo de ciclón, dependiendo del funcionamiento o necesidades requeridas.
- Obtener un estimativo de la distribución de tamaño de las partículas en la corriente gaseosa a ser tratada.
- Calcular el diámetro del ciclón para una velocidad de entrada de 22 m/s (opcional), y determinar las otras dimensiones del ciclón con las relaciones establecidas para las familias de ciclones con base en el diámetro (tablas 1 a 3).
- Estimar el número de ciclones necesarios para trabajar en paralelo.
- Calcular la eficiencia del ciclón y, si se requiere, seleccionar otro tipo de ciclón.
- Calcular la caída de presión del ciclón y, si se requiere, seleccionar otro tipo de ciclón.
- Calcular el costo del sistema y optimizar para hacer el mejor uso de la caída de presión disponible o, si se requiere, para dar el más bajo costo de operación. (Safikhani & Shams, 2011)

#### **4.5.2. Familias de ciclones**

Los ciclones son un dispositivo de control de material particulado bastante estudiado, el diseño de un ciclón se basa normalmente en familias de ciclones que tienen proporciones definidas.

Las principales familias de ciclones de entrada tangencial son: ciclones de alta eficiencia, ciclones convencionales y ciclones de alta capacidad.

Los márgenes de la eficiencia de remoción para los ciclones están con frecuencia basados en las tres familias de ciclones, es decir, convencional, alta eficiencia y alta capacidad.

Los ciclones de alta eficiencia están diseñados para alcanzar mayor remoción de las partículas pequeñas que los ciclones convencionales. Los ciclones de alta eficiencia pueden remover partículas de  $5 \mu\text{m}$  con eficiencias hasta del 90%, pudiendo alcanzar mayores eficiencias con partículas más grandes. Los ciclones de alta eficiencia tienen mayores caídas de presión, lo cual requiere de mayores costos de energía para mover el gas sucio a través del ciclón. Por lo general, el diseño del ciclón está determinado por una limitación especificada de caída de presión, en lugar de cumplir con alguna eficiencia de control especificada.

Las

, Tabla 2 y Tabla 3 presentan un resumen de las características de las principales familias de ciclones de entrada tangencial. La Figura 3 identifica las principales dimensiones del ciclón de entrada tangencial. El diámetro del ciclón identifica la dimensión básica de diseño, todas las demás dimensiones simplemente son una proporción del diámetro del ciclón.

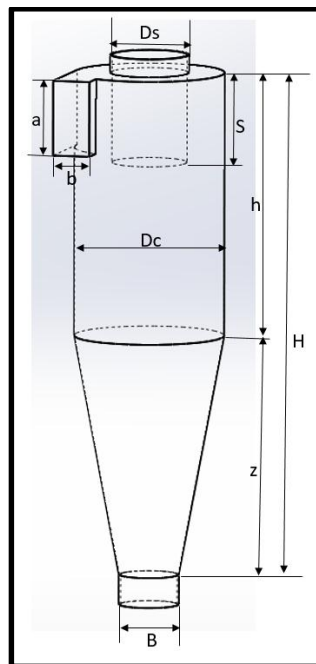


Figura 3 Principales dimensiones del ciclón de entrada tangencial.

Fuente: (Londoño, 2016)

Tabla 1 Características de los ciclones de alta eficiencia.

Dimensión	Nomenclatura	Tipo de ciclón		
		Stairmand	Swift	Echeverri
Diámetro del ciclón	Dc/Dc	1.0	1.0	1.0
Altura de entrada	a/Dc	0.5	0.44	0.5
Ancho de entrada	b/Dc	0.2	0.21	0.2
Altura de salida	S/Dc	0.5	0.5	0.625
Diámetro de salida	Ds/Dc	0.5	0.4	0.5
Altura parte cilíndrica	h/Dc	1.5	1.4	1.5
Altura parte cónica	z/Dc	2.5	2.5	2.5
Altura total del ciclón	H/Dc	4.0	3.9	4.0
Diámetro salida partículas	B/Dc	0.375	0.4	0.375
Factor de configuración	G	551.22	698.65	585.71
Número cabezas de velocidad	NH	6.4	9.24	6.4
Número de vórtices	N	5.5	6.0	5.5

Fuente: (Londoño, 2016)

Tabla 2 Características de los ciclones convencionales.

Dimensión	Nomenclatura	Tipo de ciclón			
		Lapple	Swift	Peterson-Whitby	Zenz
Diámetro del ciclón	Dc/Dc	1.0	1.0	1.0	1.0
Altura de entrada	a/Dc	0.5	0.5	0.583	0.5
Ancho de entrada	b/Dc	0.25	0.25	0.208	0.25
Altura de salida	S/Dc	0.625	0.6	0.583	0.75
Diámetro de salida	Ds/Dc	0.5	0.5	0.5	0.5
Altura parte cilíndrica	h/Dc	2.0	1.75	1.333	2.0
Altura parte cónica	z/Dc	2.0	2.0	1.837	2.0
Altura total del ciclón	H/Dc	4.0	3.75	3.17	4.0
Diámetro salida partículas	B/Dc	0.25	0.4	0.5	0.25
Factor de configuración	G	402.88	381.79	342.29	425.41
Número cabezas de velocidad	NH	8.0	8.0	7.76	8.0
Número de vórtices	N	6.0	5.5	3.9	6.0

Fuente: (Londoño, 2016)

Tabla 3 Características de los ciclones de alta calidad.

Dimensión	Nomenclatura	Tipo de ciclón	
		Stairmand	Swift
Diámetro del ciclón	Dc/Dc	1.0	1.0
Altura de entrada	a/Dc	0.75	0.8
Ancho de entrada	b/Dc	0.375	0.35
Altura de salida	S/Dc	0.875	0.85
Diámetro de salida	Ds/Dc	0.75	0.75
Altura parte cilíndrica	h/Dc	1.5	1.7
Altura parte cónica	z/Dc	2.5	2.0
Altura total del ciclón	H/Dc	4.0	3.7
Diámetro salida partículas	B/Dc	0.375	0.4
Factor de configuración	G	29.79	30.48
Número cabezas de velocidad	NH	8.0	7.96
Número de vórtices	N	3.7	3.4

Fuente: (Londoño, 2016)

## **4.6.Circulación de aire por conductos**

Para ventilar un espacio, un recinto o una máquina, ya sea impulsando aire o bien extrayéndolo, es muy corriente tener que conectar el ventilador/extractor por medio de un conducto, una tubería, de mayor o menor longitud y de una u otra forma o sección.

El fluir del aire por tal conducto absorbe energía del ventilador que lo impulsa/extrae debido al roce con las paredes, los cambios de dirección o los obstáculos que se hallan a su paso. La rentabilidad de una instalación exige que se minimice esta parte de energía consumida.

Como el consumo de un ventilador es directamente proporcional a la presión total  $P_t$  a que trabaja, podemos constatar que, de no cuidar el diseño de una canalización, puede darse el caso de gastar mucha más energía de la necesaria. (Soler & Palau, 2002)

### **4.6.1. Pérdidas de carga**

A la presión del aire necesaria para vencer la fricción en un conducto, que es la que determina el gasto de energía del ventilador, se le llama pérdida de carga. Se calcula a base de la longitud de la conducción, el llamado diámetro hidráulico, la velocidad y densidad del aire y el coeficiente de frotamiento, de la rugosidad de las paredes, de las dimensiones y la disposición del mismo.

#### **4.6.1.1.Tramos rectos**

La forma práctica de hacerlo es recurriendo a nomogramas confeccionados en base a todo el bagaje técnico necesario y son válidos para conducciones con la rugosidad corriente en materiales habitualmente usados.

El nomograma de la Figura 5 muestra uno de ellos para secciones circulares y un coeficiente de fricción  $\lambda = 0'02$  (plancha de hierro galvanizada).

#### **4.6.1.2.Conductos rectangulares**

Si la sección del conducto no es circular, caso frecuente en instalaciones de ventilación en donde se presentan formas rectangulares o cuadradas, es necesario



determinar antes la sección circular equivalente, esto es, aquélla que presenta la misma pérdida de carga que la rectangular considerada.

El diámetro equivalente puede determinarse de forma práctica por medio de la Figura 4.

#### 4.6.1.3. Accidentes en la conducción

Las canalizaciones de aire no siempre se componen de tramos rectilíneos, sino que a menudo se presentan accidentes en su trayectoria que obligan al uso de codos, desviaciones, entradas, salidas, obstáculos, etc., todos los cuales ofrecen resistencia total de un sistema de conductos será necesario calcular las pérdidas de cada uno de tales accidentes y sumarlas a las de los tramos rectos.

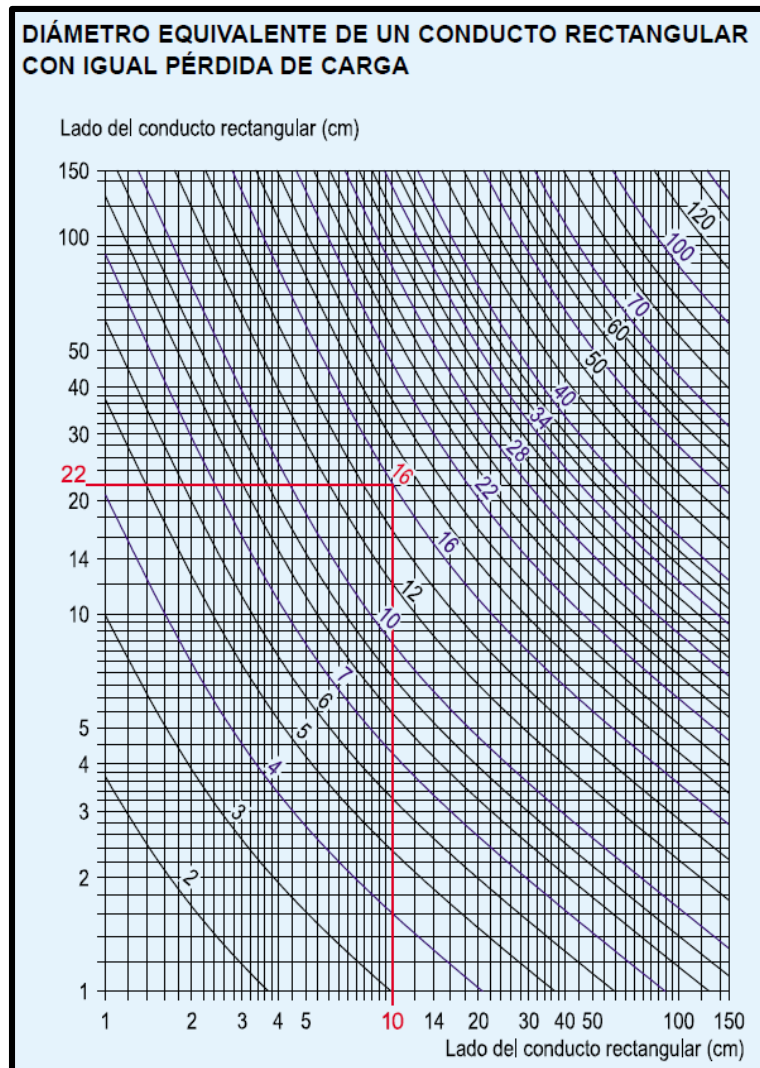


Figura 4 Diámetro equivalente de un conducto rectangular con igual pérdida de aire.

Fuente: (Soler & Palau, 2002)

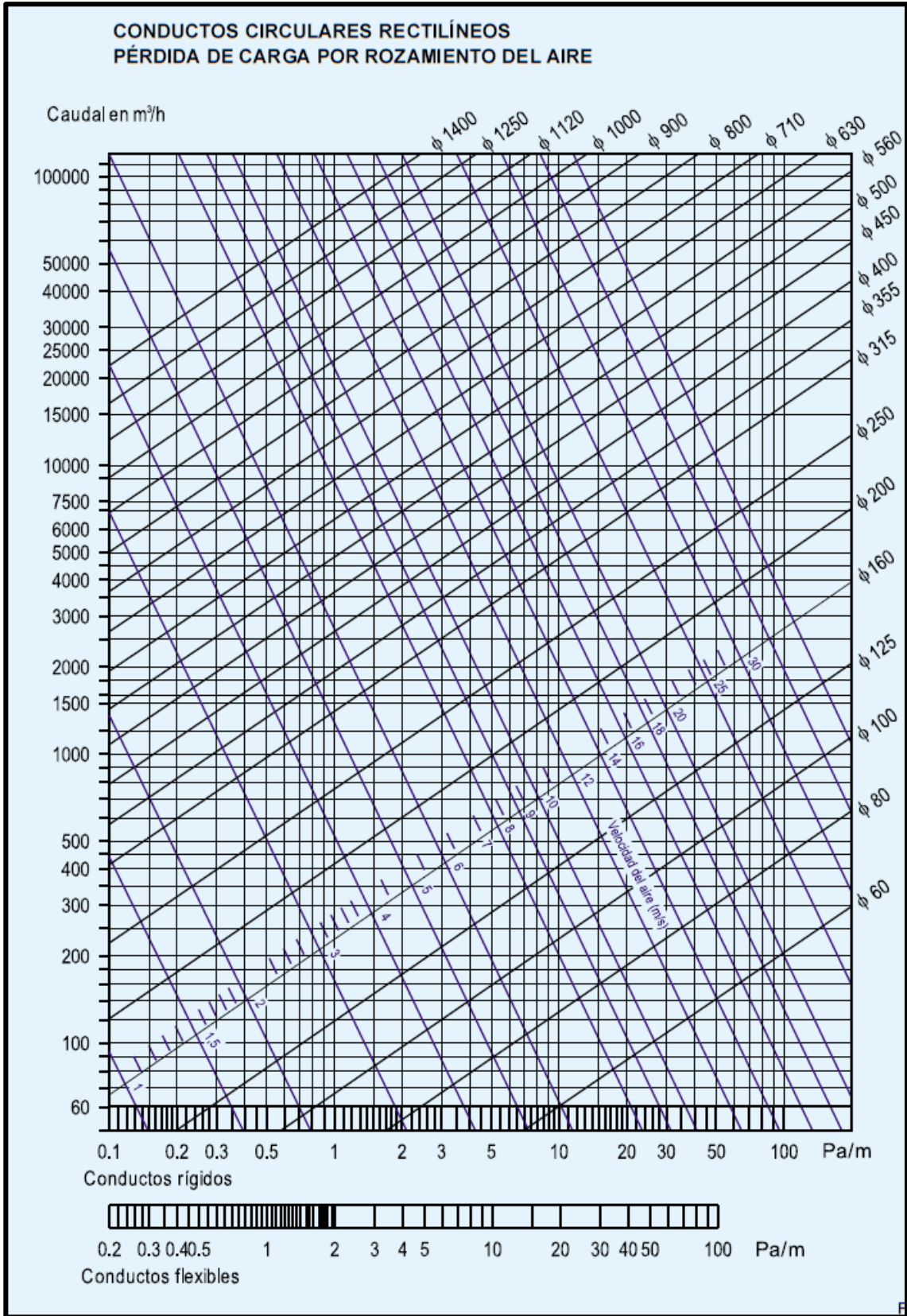


Figura 5 Conductos circulares rectilíneos (Pérdida de carga por rozamiento del aire).

Fuente: (Soler & Palau, 2002)

## 4.6.2. Cálculo de la pérdida de carga

### Método del coeficiente “n”

Se basa este método en calcular la pérdida de carga de un elemento de la conducción en función de la presión dinámica  $P_d$  del aire que circula y de unos coeficientes “n” de proporcionalidad, determinados experimentalmente, para cada uno según su forma y dimensiones. La fórmula usada es:

$$\Delta P = n \times P_d (\text{mm c. d. a.}) \quad \text{Ecuación 24}$$

De esta forma se calcula uno a uno los accidentes de la conducción que, sumados a los de los tramos rectos, se tiene la pérdida de carga total del sistema de conducción.

La presión dinámica  $P_d$  que aparece en la fórmula puede hallarse fácilmente del siguiente modo. A partir del caudal de aire que circula  $Q$  ( $m^3/h$ ) y el diámetro del conducto  $d$  (m), en la gráfica de la Figura 5 se determina la velocidad  $v$  (m/s) del aire. Con este dato, y por la gráfica de la Figura 7 se encuentra la presión dinámica  $P_d$  (mmca) necesaria para aplicar la fórmula de la pérdida de carga. (Soler & Palau, 2002)

En la Figura 6 se proporcionan los coeficientes “n” de pérdida de carga de diversos accidentes en la circulación de aire por conductos, desde su captación hasta la descarga.

## 4.7. Ventiladores

Los ventiladores son máquinas rotatorias capaces de mover una determinada masa de aire, a la que comunican una cierta presión, suficiente para que pueda vencer las pérdidas de carga que se producirán en la circulación por los conductos.

Se componen de:

- Elemento rotativo
- Soporte
- Motor

El elemento rotativo es la pieza del ventilador que gira en torno al eje del mismo. Puede ser una Hélice o un Rodete.

Se denomina Hélice si la dirección de salida del aire impulsado es paralela el eje del ventilador (dirección axial). Generalmente la hélice puede mover gran cantidad de aire comunicando al mismo una discreta presión.

Se denomina Rodete si la dirección de salida del aire impulsado es perpendicular al eje del ventilador.

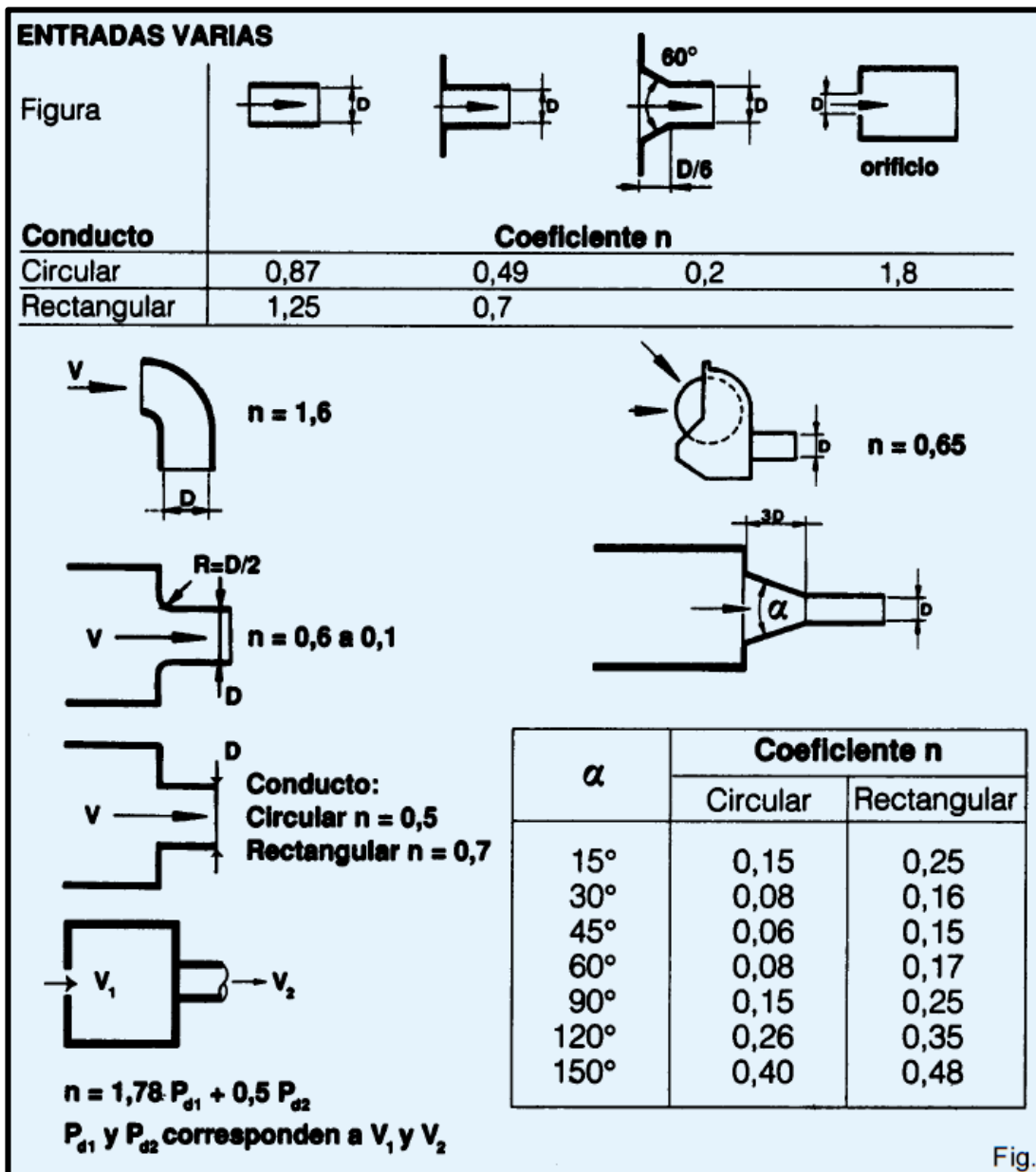


Figura 6 Coeficientes "n" de pérdida de carga de diversos accidentes en la circulación de aire por conductos.

Fuente: (Soler & Palau, 2002)

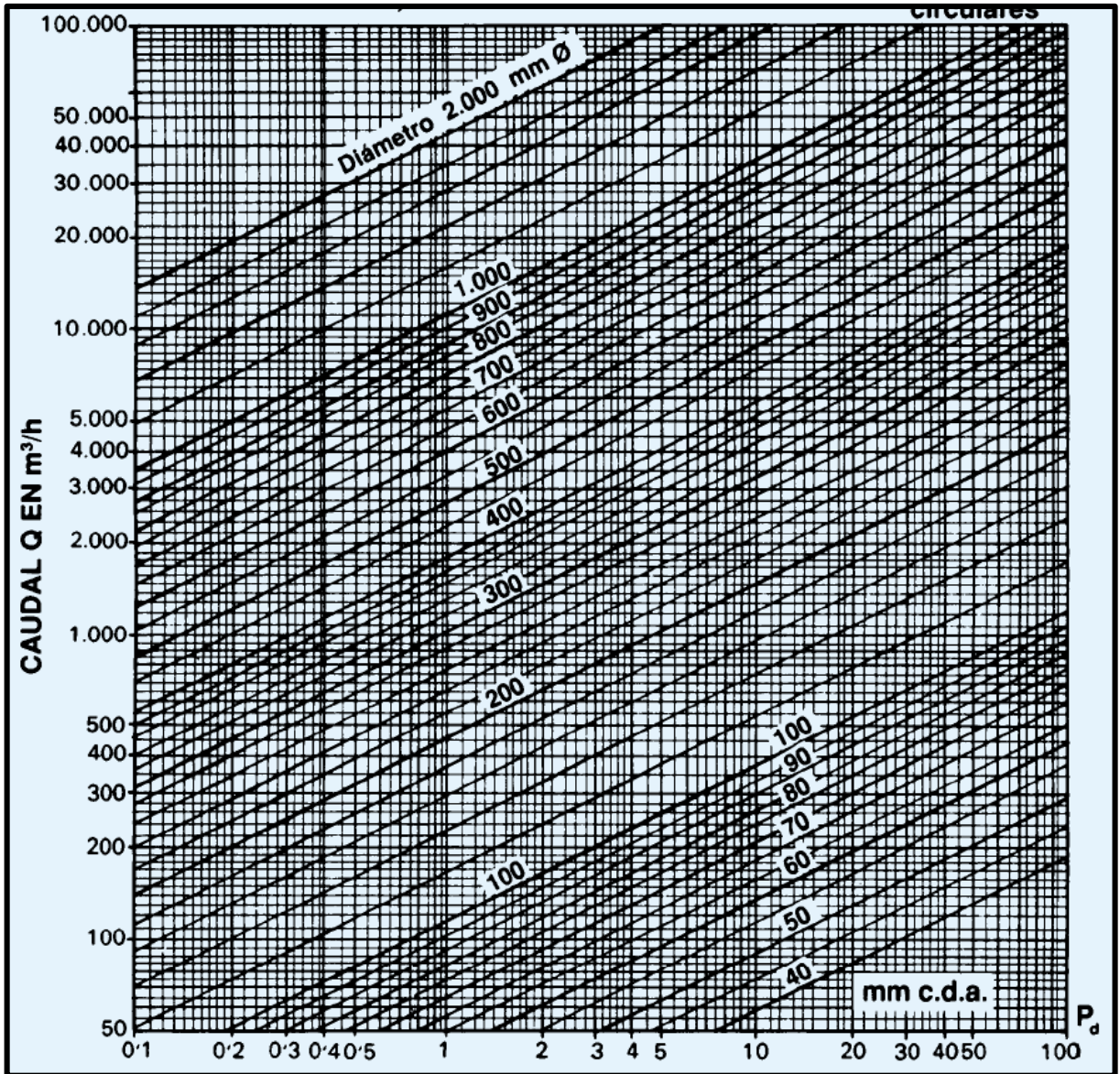


Figura 7 Presión dinámica, caudal y diámetro.

Fuente: (Soler & Palau, 2002)

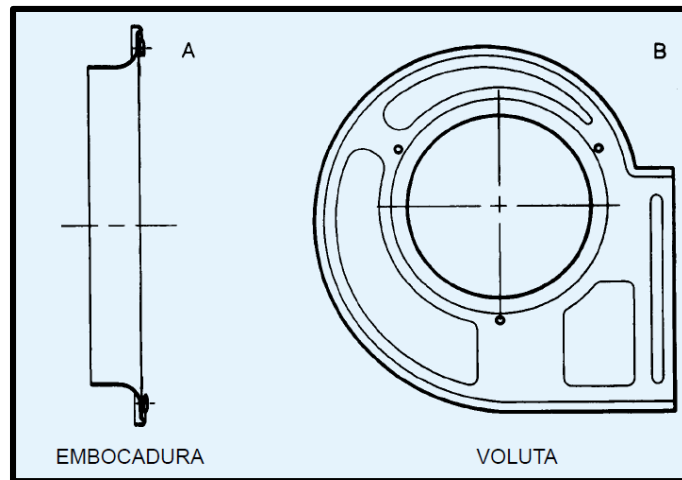
Generalmente los rodets mueven un volumen de aire menor que las hélices, pero con una presión mucho mayor.

En los ventiladores de hélice, generalmente, el conjunto se compone también de una embocadura acampanada que mejora el rendimiento, Figura 8 A.

Los ventiladores de rodete se montan en una voluta en espiral, Figura 8 B. Cuando se desea conseguir ventiladores con rendimiento por encima de los usuales, puede recurrirse a las directrices, que son unos álabes fijos, colocados a la entrada o salida del ventilador, cuya función principal es enderezar la vena de aire haciéndola



aproximadamente axial. El motor es el componente que acciona la hélice o rodete.  
(Soler & Palau, 2002)



*Figura 8 Ventilador de hélice.*

Fuente: (Soler & Palau, 2002)

#### **4.7.1. Definiciones**

Un ventilador, en la aceptación más amplia del vocablo, es una turbo máquina que recibe energía mecánica para mantener un flujo continuo de aire, u otro gas, con una presión de hasta 3.000 mmca

#### **4.7.2. Clasificación de los ventiladores**

Los ventiladores, denominados así de una forma amplia para todas sus concepciones, pueden clasificarse de formas muy diferentes, siendo la más común la siguiente (Soler & Palau, 2002):

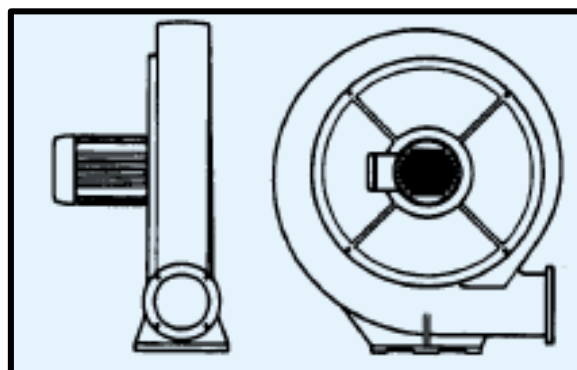
- Según su función
  - Ventiladores con envolvente
    - Impulsores
    - Extractores
    - Impulsores-Extractores
  - Ventiladores Murales
  - Ventiladores de Choro
- Según la trayectoria del aire en el ventilador
  - Ventiladores centrífugos

- Ventiladores axiales
- Ventiladores helicocentrífugos
- Ventiladores tangenciales
- Según la presión del ventilador
  - Baja presión
  - Mediana presión
  - Alta presión
- Según las condiciones de funcionamiento
  - Ventiladores corrientes
  - Ventiladores especiales
- Según el sistema de accionamiento de la hélice
- Según método de control de las prestaciones del ventilador
  - Con regulador de velocidad
  - Con compuertas
  - Con álabes de inclinación variable

#### 4.7.3. Ventiladores centrífugos

Los ventiladores centrífugos se usan industrialmente por varias razones: tienen menos componentes a fricción, proporcionan un caudal mayor que los ventiladores axiales y tangenciales de tamaño similar, son adecuados para aplicaciones donde se requiere trabajo continuo.

En este tipo de ventiladores el aire entra en el rodete con una trayectoria esencialmente axial y sale en dirección perpendicular. (Ver Figura 9)

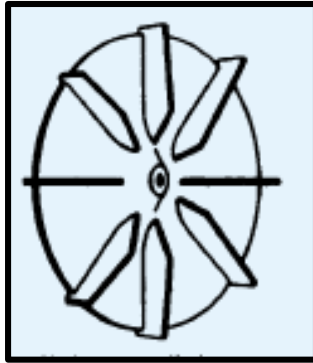


*Figura 9 Ventilador centrífugo.*

Fuente: (Soler & Palau, 2002)

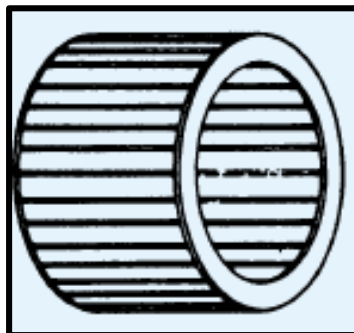
Los rodetes de los ventiladores centrífugos pueden ser de tres tipos:

- Álabes radiales, Figura 10.
- Álabes hacia adelante, Figura 11.
- Álabes hacia atrás, Figura 12



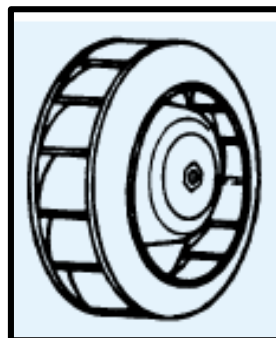
*Figura 10 Rodete centrífugo álabes radiales.*

Fuente: (Soler & Palau, 2002)



*Figura 11 Rodete centrífugo álabes hacia adelante*

Fuente: (Soler & Palau, 2002)



*Figura 12 Rodete centrífugo álabes hacia atrás*

Fuente: (Soler & Palau, 2002)



#### 4.7.4. Curva característica

El ensayo de ventiladores tiene por objeto determinar la capacidad del aparato para transferir la potencia al aire que mueve.

El ventilador se hace funcionar a un régimen de giro constante, tomando valores de diferentes caudales movidos, según sea la pérdida de carga que debe vencerse.

La curva característica de un ventilador se obtiene dibujando en unos ejes de coordenadas los distintos valores caudal-presión, obtenidos mediante ensayo en un laboratorio.

Para entender mejor el concepto de curva característica se propone el siguiente ejemplo:

Un ventilador tubular trabajando según indica la posición “a” de la Figura 13. Al medir el caudal de aire que proporciona, se encuentra  $Q_1 = 10.000 \text{ m}^3/\text{hora}$ .

Si se repite el ensayo empalmando un conducto de 10 m por el lado de admisión (posición b) y se mide de nuevo el caudal, se encuentra que ha bajado a  $Q_2 = 8.000 \text{ m}^3/\text{hora}$ .

En otro ensayo, se acopla un tubo de 50 m de longitud (posición c), y se comprueba que el caudal ha descendido a  $Q_3 = 5.000 \text{ m}^3/\text{hora}$ .

Las experiencias anteriores demuestran que no es suficiente conocer el caudal que es capaz de suministrar un ventilador a descarga libre (posición a), esto es, sin obstrucciones, para poder catalogarlo. Es necesario conocer qué caudales irá proporcionando según sean las distintas pérdidas de carga que deba vencer.

En la Figura 14 está representada la curva característica de un ventilador.

Se observa en primer lugar curvas diferentes. Cada una de ellas representa un valor distinto y su lectura se hace en las diferentes escalas que están a la izquierda de la figura.

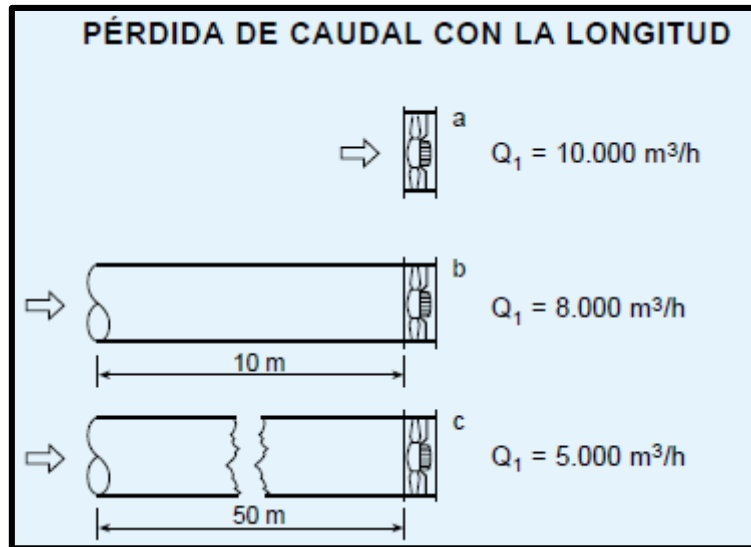


Figura 13 Pérdida de caudal con la longitud.

Fuente: (Soler & Palau, 2002)

Tres de dichas curvas están relacionadas con la presión que da el ventilador para distintos caudales (son las denominadas  $P_t$ ,  $P_e$ ,  $P_d$ ).

Donde:

$P_e$ : Presión Estática

$P_d$ : Presión Dinámica (debido a la velocidad)

$P_t$ : Presión Total

Cumpléndose en todo momento

$$P_t = P_e + P_d$$

Ecuación 25

Obsérvese que, a descarga libre, es decir cuando la Presión Estática ( $P_e$ ) es nula, el ventilador da el máximo caudal que puede mover; en este punto la Presión Total es igual a la Dinámica ( $P_t = P_d$ ).

Asimismo, cuando el ventilador está obturado, es decir que da el mínimo caudal, la Presión Dinámica ( $P_d$ ) es nula; en este punto, la Presión Total es igual a la Estática ( $P_t = P_e$ ). Otra curva que se puede observar en el gráfico es: la curva de potencia absorbida ( $W$ ), que se lee en la escala vertical situada más a la izquierda (en vatios). Esta curva da

la potencia que consume el motor que acciona el ventilador, y presenta un máximo (en la figura corresponde al punto de caudal 3.000 m<sup>3</sup>/h).

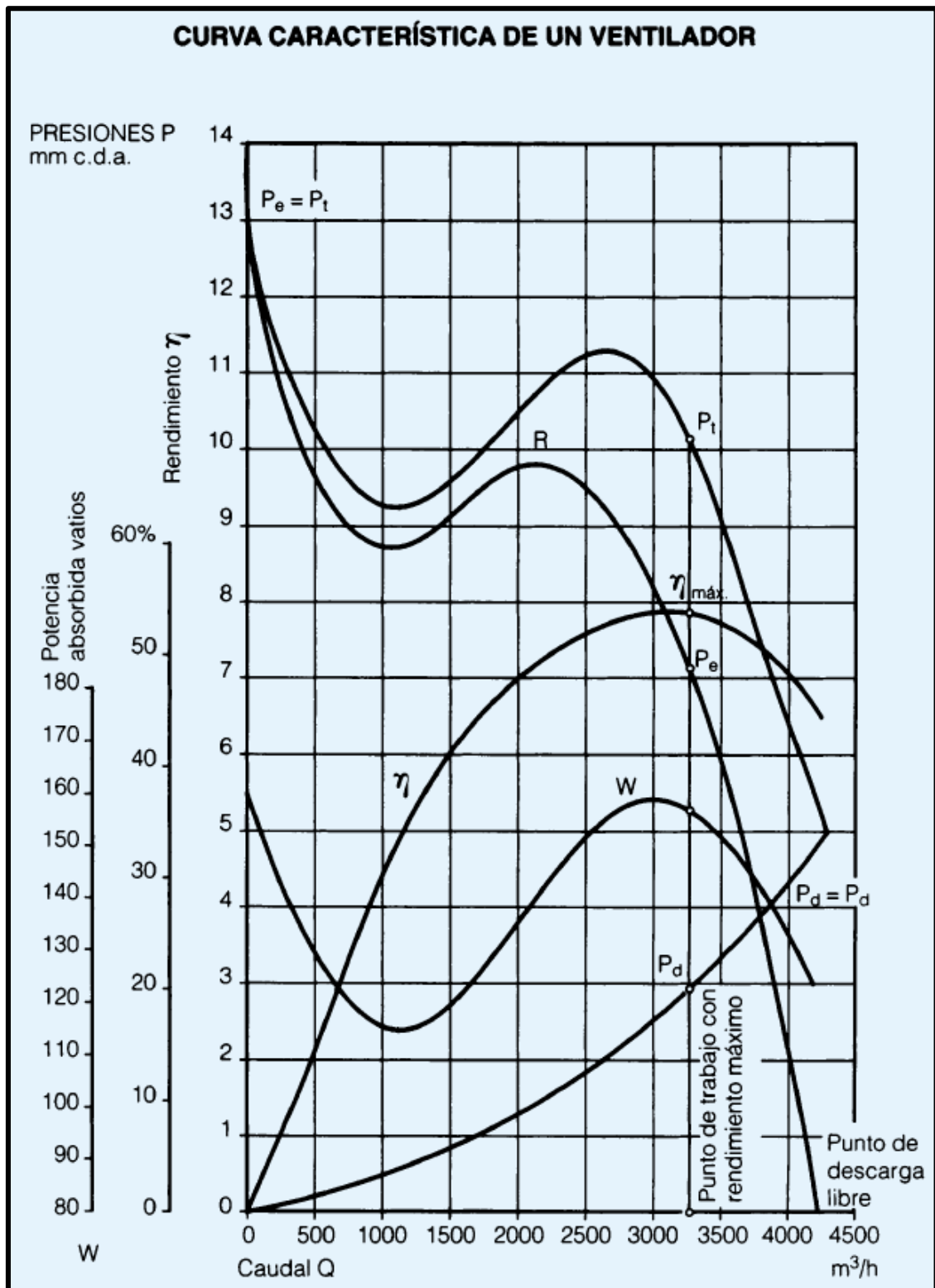


Figura 14 Curva característica de un ventilador.

Fuente: (Soler & Palau, 2002)

También se representa la curva de rendimiento ( $\eta$ ), que se lee en % en la escala vertical intermedia, se puede ver que el rendimiento del ventilador depende del caudal que está moviendo.

El conjunto de estas curvas recibe el nombre de característica de un ventilador.

La característica de un ventilador es la mejor referencia del mismo, ya que siempre nos indicará su comportamiento según sea el caudal y la presión que esté dando.

En los catálogos comerciales, suele darse solamente una curva, que es la de mayor importancia la de Presión Estática ( $P_e$ ). Los servicios técnicos suministran más información si se les solicita.

El punto ideal de funcionamiento del ventilador, aquél para el que ha sido diseñado, es el correspondiente al máximo rendimiento. Cuanto más cerca de este punto trabaje el ventilador, más económico será su funcionamiento.

El punto R de la Figura 14 se conoce como punto de desprendimientos, y la zona a la izquierda de éste es de funcionamiento inestable. Debe, por tanto, escogerse el ventilador de manera que el punto de trabajo esté a la derecha de R; de esta manera se evita la inestabilidad de funcionamiento.

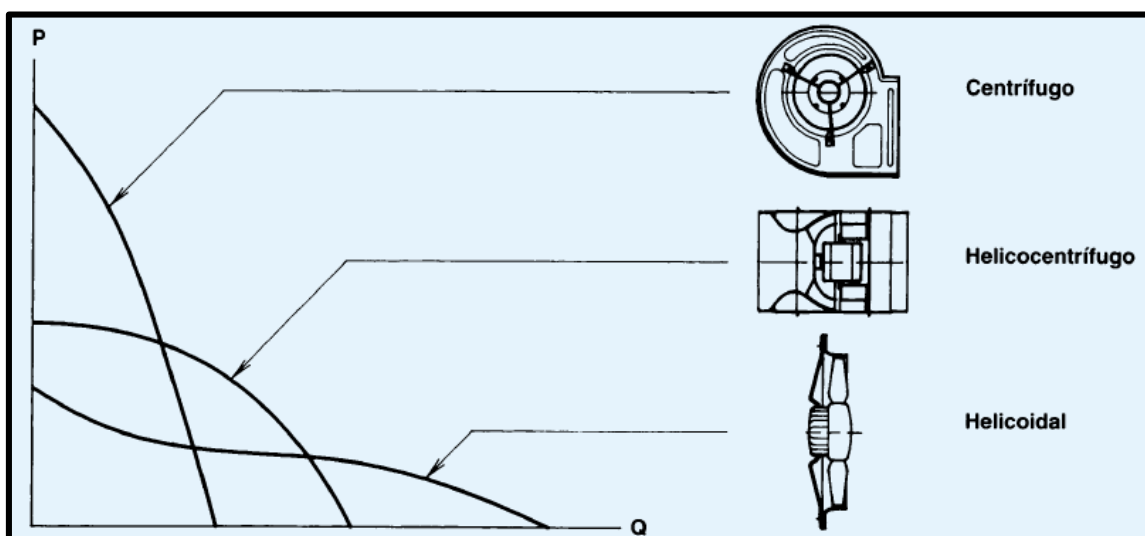


Figura 15 Curvas características de los tipos fundamentales de ventilación.

Fuente: (Soler & Palau, 2002)

En la Figura 15 se han representado las curvas características de los tipos fundamentales de ventilación, para poder comprender mejor su comportamiento.

Los tres ventiladores que se comparan tienen el mismo diámetro de rodete.

Se observa, a igualdad de caudal impulsado ( $Q$ ), los ventiladores centrífugos dan más presión que los helicocentrífugos, y éstos a su vez más que los helicoidales.

También se observa que, los centrífugos mueven caudales menores que los helicocentrífugos, y éstos menos que los helicoidales.

Por tanto, puede aceptarse que los ventiladores más adecuados cuando los caudales sean grandes y las presiones que deban vencer sean pequeñas son los helicoidales. Este tipo de ventilador tiene además la ventaja de la facilidad de instalación. (Soler & Palau, 2002)

#### **4.7.5. Punto de trabajo**

La curva característica del ventilador depende únicamente del ventilador, y solamente puede variar si el ventilador funciona a una velocidad de rotación distinta.

Puede aceptarse en principio que la curva característica es totalmente independiente del sistema de conductos al que se acople.

Sin embargo, hay que considerar que un ventilador puede funcionar moviendo distintos caudales y comunicándoles distintas presiones, de tal forma que todos los puntos posibles de funcionamiento se hallen representados sobre la curva ( $P_e$ ), Figura 14. Para saber exactamente en qué condiciones funcionará el ventilador, es necesario conocer la curva resistente de la instalación, es decir, la curva que relaciona la pérdida de carga de la instalación con el caudal que pasa por ella. (Soler & Palau, 2002)

Se puede encontrar de forma fácil el punto de trabajo de un ventilador simplemente superponiendo las curvas características del ventilador y resistente del conducto según se indica en la Figura 16.

Se puede comprobar que la pérdida de carga de una conducción varía proporcionalmente con el cuadrado del caudal según la ecuación 26.

$$\Delta P_2 = \Delta P_1 \left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^2$$

**Ecuación 26**

Por lo que, para encontrar la característica resistente y una vez hallada la pérdida de carga inicial ( $\Delta P_1$ ) a un determinado caudal ( $Q_1$ ), bastará con suponer un segundo caudal ( $Q_2$ ), para hallar un segundo punto de la característica resistente ( $\Delta P_2$ ). Si fuese necesario se podrían suponer más caudales con los que se hallarían, siempre para la misma instalación, nuevos puntos de pérdida de carga. Uniendo todos los puntos encontrados se representará la característica resistente de la instalación estudiada. (Soler & Palau, 2002)

La intersección entre la curva del ventilador y la característica resistente de la instalación dará el punto de trabajo.

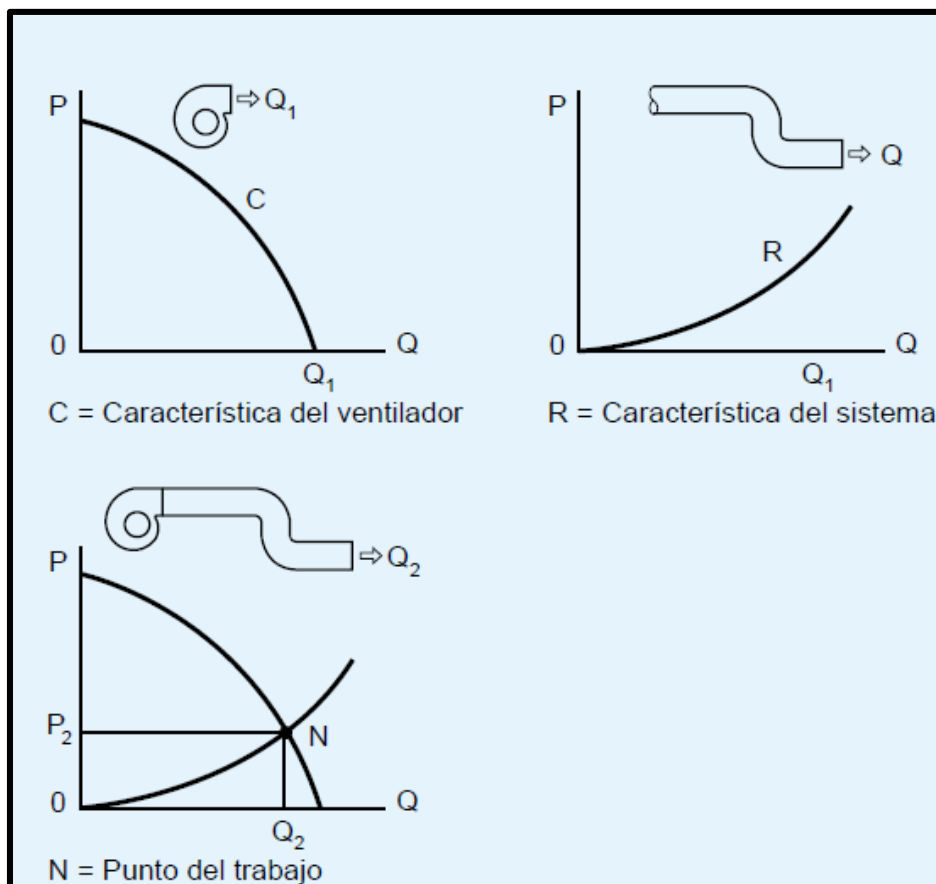


Figura 16 Punto de trabajo de un ventilador.

Fuente: (Soler & Palau, 2002)

#### 4.7.6. Leyes de los ventiladores

Las curvas características de los ventiladores siguen ciertas leyes, llamadas “leyes de los ventiladores”, que permiten determinar cómo varían caudal, presión y potencia absorbida por el ventilador al variar las condiciones de funcionamiento. Se aplica estas leyes en el caso de la variación de velocidad de giro del ventilador:

El caudal es proporcional a la relación de velocidades:

$$Q_2 = Q_1 \times \left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad \text{Ecuación 27}$$

La presión es proporcional al cuadrado de la relación de velocidades:

$$P_2 = P_1 \times \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \quad \text{Ecuación 28}$$

La potencia absorbida es proporcional al cubo de la relación de velocidades:

$$N_2 = N_1 \times \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3 \quad \text{Ecuación 29}$$

Donde:

$Q_1$ : Caudal Inicial

$Q_2$  Cauda Final

$P_1$ : Presión Inicial

$P_2$ : Presión Final

$N_1$ : Potencia Inicial

$N_2$  : Potencia Final

$\frac{n_2}{n_1}$ : Relación de velocidades

La Tabla 4 reúne las leyes agrupadas en función de tres variaciones.

Mediante las relaciones anteriores se puede conocer los valores que toman las diferentes variables para diferentes regímenes de giro del ventilador.

Variando la velocidad de este se consigue que el caudal y la presión se ajusten a las necesidades de cada momento.

Es prudente tener muy en cuenta que las curvas características de los ventiladores están siempre realizadas a las máximas revoluciones posibles. La regulación sólo se puede realizar disminuyendo la velocidad de giro del ventilador.

Tabla 4 Leyes de los ventiladores.

Leyes de los ventiladores		
Si varía...	Permanecen constantes	Se cumple
Diámetro hélice, $d$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidad</li> <li>• Densidad</li> <li>• Punto de funcionamiento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El caudal es proporcional al cubo de la relación de diámetro</li> <li>• La presión es proporcional al cuadrado de la relación de diámetro</li> <li>• La potencia absorbida es proporcional a la quinta potencia de la relación de diámetro.</li> </ul>
Velocidad de rotación, $n$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diámetro de la hélice</li> <li>• Densidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El caudal es proporcional a la relación de velocidades</li> <li>• La presión es proporcional al cuadrado de la relación de velocidades</li> <li>• La potencia absorbida es proporcional al cubo de la relación de velocidades</li> </ul>
Densidad del aire, $\rho$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Caudal</li> <li>• Velocidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La presión es proporcional a la relación de densidades</li> <li>• La potencia absorbida es proporcional a la relación de densidades</li> </ul>

Fuente: (Mott, 2006)



## **5. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **5.1. Materiales**

Los materiales empleados en el presente proyecto de tesis se describen a continuación:

- Computador
- Software de ingeniería
- Material bibliográfico
  - Libros
  - Revistas
  - Catálogos
  - Páginas Web
- Material de oficina

### **5.2. Métodos**

Se recolecto la información pertinente tanto del proceso de producción de la empresa “Café Indera” como la información técnica, que permita realizar el diseño de una máquina tostadora de café.

Luego de analizar la información recolectada, se decide diseñar una tostadora de café mediante flujo de aire caliente, por los beneficios que este presenta (Ver Anexo 1).

Al determinar que se empleará flujo de aire caliente para el proceso de tueste, es necesario caracterizar los parámetros operacionales relacionados a circulación de aire por conductos y ventiladores, que van a ser los sistemas que nos permitan dirigir e impulsar el aire dentro de nuestra máquina. Se consideró que el método de calentamiento de aire sea GLP (Ver Anexo 1).

Luego de haber recolectado y analizado la información, lo que resta por hacer es el diseño de la máquina tostadora de café que utilice flujo de aire caliente, la metodología propuesta para llevar a buen término este diseño es la siguiente:

- Recolectar información sobre los procesos y la capacidad de producción de la empresa, por medio de entrevistas al gerente propietario y visitas a las instalaciones de la empresa. (Ver Anexo 2 y 3)
- Determinar la capacidad requerida de la tostadora de café, analizando la información recolectada.
- Diseñar la tolva contenedora de café, teniendo en cuenta el volumen que ocupará el café tostado y el sistema de lecho fluidizado.
- Dimensionar el ventilador, partiendo de la velocidad del aire, obtenida de la caracterización del sistema de lecho fluidizado.
- Dimensionar los ductos de aire que conducirán el aire caliente.
- Seleccionar el quemador de GLP, partiendo del cálculo de la energía requerida para tostar el café.
- Diseñar el sistema de control.
- Dimensionar un contenedor de café para enfriamiento, teniendo en cuenta que el volumen del café aumenta luego de ser tostado.
- Seleccionar accesorios informativos.
- Realizar la esquematización técnica de prototipo propuesto, empleando software CAD.

## **6. RESULTADOS**

La empresa Café Indera tuesta semanalmente un total de 450 kg de café. Para el proceso de tostado utilizan máquinas tipo tambor, por medio de un motor y transmisión por bandas hace girar un contenedor con café, se aplica directamente calor a dicho contenedor mediante un quemador, tipo hornilla, al salir el café de la máquina, pasa por un proceso de soplado el cual elimina los residuos de cáscara y hollín, que se originan en el proceso de tostado (Ver Anexo 2).

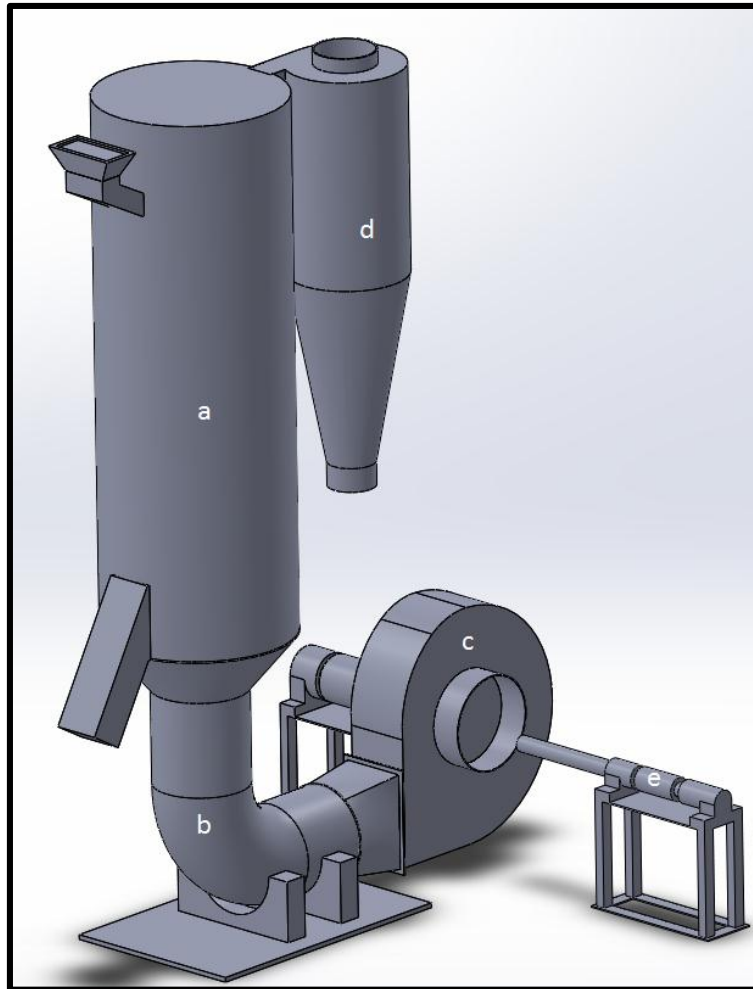
Teniendo en cuenta la producción semanal de la empresa Café Indera y luego de realizar un análisis de los elementos que tienen mayor influencia en los procesos de tostado, distribución y ventas de la empresa, se determinó que la máquina deberá tener una capacidad de 10 kg y no emplear transmisión por bandas. Por tanto, se pretende diseñar una máquina tostadora de café mediante flujo de aire caliente para una capacidad de 10 kg, que brinde mayores beneficios a la empresa.

A continuación, se describe paso a paso el dimensionamiento de cada uno de los componentes que conformarán dicha máquina.

### **6.1. Descripción de la máquina**

El café crudo debe ser calentado uniformemente y mantenerse en movimiento para asegurar que el calentamiento, los cambios de color de apariencia y las reacciones físico-químicas de los granos sean uniformes. El sistema lecho fluido permite que todo esto sea posible.

El flujo de aire, producido por un ventilador, mantiene en movimiento los granos de café dentro de una tolva diseñada para una capacidad de 10 kilogramos, la tolva estará conectada al ventilador por medio de un ducto de aire cilíndrico. Para el calentamiento del aire se ha considerado utilizar GLP por su alto poder calorífico, el cual va a ser consumido por un quemador industrial, la temperatura se regulará por medio del flujo de GLP al quemador. El procesado de los gases originados por el tueste se realizará por medio de un quemador de humos (ciclón). Un esquema general de la máquina se muestra en la Figura 17.



*Figura 17 Esquema general de la máquina. a) Tolva contenedora de café, b) Ductos de aire, c) Ventilador centrífugo, d) ciclón de lavado, e) Quemador de GLP.*

Fuente: El autor.

## **6.2. Diseño de la tolva**

Como se especificó en la metodología, para dimensionar la tolva se tomará en cuenta volumen que ocupará el café tostado y sistema de lecho fluidizado. La tolva constará de columna de fluidización, sección uniformadora y distribuidor.

### **Densidad del café tostado**

Al no contar con un valor específico de la densidad del café tostado, se la determinó experimentalmente en función del volumen y la masa de café disponibles.

Se llenó de café tostado un recipiente de capacidad 328, 43 ml, con ayuda de una balanza digital se determinó la masa de café (ver Figura 18 ). Los resultados obtenidos son:

### Volumen del recipiente

$$V_r = 0.0003284 \text{ m}^3$$

### Masa de café

$$m = 0.1 \text{ kg}$$

### Densidad del café tostado

$$\rho = \frac{m}{V_r}$$

$$\rho = 304.5 \text{ kg/m}^3$$



Figura 18 Cálculo de la densidad del café tostado.

Fuente: El autor.

### Volumen de café tostado

La razón de tomar en cuenta la densidad del café tostado, es que cada grado de café perderá masa y ganará volumen luego de ser tostado.

La capacidad de la máquina es 10 kg, por lo tanto, el volumen es:

$$V_{ct} = \frac{m}{\rho} = \frac{10 \text{ kg}}{304.5 \text{ kg/m}^3} = 0.0328 \text{ m}^3$$

### Volumen del lecho

Para caracterizar el fenómeno de fluidización, es necesario determinar el volumen del lecho.

Despejando de la Ecuación 4 y tomando un valor de  $\varepsilon_0 = 0.51$  (Ver Anexo 4), porque aún no se fluidiza el lecho, se determinó el volumen del lecho.

$$\text{Volumen del lecho} = \frac{V_{ct}}{1-\varepsilon_0}$$

$$\text{Volumen del lecho} = 0.067 \text{ m}^3$$

### **Columna de Fluidización**

Empleando la Ecuación 7 se calculó la altura del lecho. El diámetro de la columna de fluidización será 0.4 m y el volumen del lecho  $0.067 \text{ m}^3$ .

$$V = AL_1$$

$$V = \pi r^2 L_1$$

Reemplazando valores se obtiene:

$$L_1 = 0.533 \text{ m}$$

### **Altura de mínima fluidización**

Para calcular la altura de mínima fluidización se tomó los siguientes valores:

- $\varepsilon_0 = 0.51$
- $\varepsilon_{mf} = 0.63$  (Ver Anexo 4)
- $L_1 = 0.533 \text{ m}$ .

Reemplazando en la Ecuación 8 se obtiene:

$$L_{mf} = 0.705 \text{ m}$$

### **Velocidad de mínima Fluidización**

El estado inicial del café es seco, con una humedad promedio de 13%, la temperatura ambiente es de  $20^\circ\text{C}$ . Con los resultados obtenidos y los siguientes datos se calculó la velocidad mínima de fluidización.

- $\Phi = 0.67$  (Ver Anexo 4)
- $d_p = 0.0064 \text{ m}$  (Ver Anexo 4)
- $\rho_g = 1.204 \text{ kg/m}^3$  (Ver Anexo 6)
- $\mu = 1.81 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$  (Ver Anexo 6)
- $\rho_s = 680 \text{ kg/m}^3$  (Ver Anexo 5)
- $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

Reemplazando en la Ecuación 12:

$$u_{mf} = 2.784 \text{ m/s}$$

### **Velocidad terminal**

Para calcular la velocidad terminal es necesario conocer el valor del coeficiente de descarga y el número de Reynolds.

Usando la Ecuación 15 se calculó el número de Reynolds, cuyo valor es:

$$Re = 1175.473$$

Aplicando la correlación experimental de Kunii y Levenspiel (Ecuación 19), se determinó el valor del coeficiente de descarga.

$$C_D = 0.0222$$

Este resultado introducido en la Ecuación 18, dan directamente la velocidad terminal, cuyo valor es:

$$u_t = 46.3 \text{ m/s}$$

### **Parámetros de operación**

Para que el fenómeno de fluidización se desarrolle con normalidad es necesario calcular velocidad de operación, altura de operación y presión en el lecho.

La velocidad de operación puede tomar valores comprendidos entre 2.784 m/s ( $u_{mf}$ ) y 46.3 m/s ( $u_t$ ). Se decidió por una velocidad de operación igual a 8.352 m/s, equivalente a 3 veces la velocidad mínima de fluidización. (González, 2015).

Empleando la Ecuación 17, se determinó el valor de  $K$ .

$$K \frac{\varepsilon_{mf}^3}{1-\varepsilon_{mf}} = u_{mf}$$

$$K = \frac{(1-\varepsilon_{mf}) \cdot u_{mf}}{\varepsilon_{mf}^3}$$

$$K = 4.113$$

Para calcular la porosidad del lecho en operación, se reemplazó la velocidad de operación y el valor de  $K$  en la Ecuación 17, dando como resultado una ecuación de tercer grado.

$$K \frac{\varepsilon_{op}^3}{1-\varepsilon_{op}} = u_{op}$$

$$4.113\varepsilon_{op}^3 + 8.352\varepsilon_{op} - 8.352 = 0$$

$$\varepsilon_{op} = 0.77$$

Una vez determinado el valor de porosidad en operación se calculó la altura de operación empleando la Ecuación 8.

$$\frac{L_{mf}}{L_{op}} = \frac{(1-\varepsilon_{op})}{(1-\varepsilon_{mf})}$$

$$L_{op} = 1.13 \text{ m}$$

Reemplazando la altura de operación y porosidad en la Ecuación 9, se calculó la presión del lecho:

$$\Delta P_{lecho} = L_{op}(1 - \varepsilon_{op})[(\rho_s - \rho_g)g]$$

$$\Delta P_{lecho} = 1730.67 \text{ Pa}$$

### Sección Uniformadora

Es la parte encargada de distribuir el flujo de aire que proviene del ventilador a la columna de fluidización.

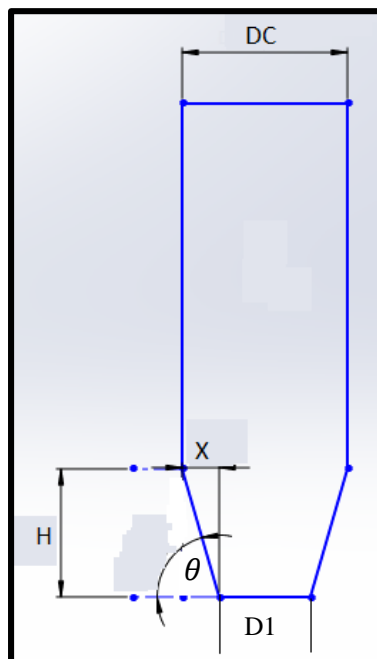


Figura 19 Sección uniformadora  
Fuente: El Autor



De acuerdo a la Figura 19 se cumple:

$$Dc = 2X + D1$$

$$\tan \theta = \frac{H}{X}$$

El ángulo  $\theta$  puede tomar valores entre 30 y 50 grados (Muyorama & L.S., 1985), se tomó un ángulo de 50 grados, dando los siguientes resultados:

$$X = \frac{0.4-0.2}{2} = 0.1 \text{ m}$$

$$H = \tan 50(0.1) = 0.12 \text{ m}$$

### **Distribuidor**

Se determinó la caída de presión necesaria a lo largo del distribuidor, utilizando un valor de  $r_p = 0.5$  (Pell, 1990).

De la Ecuación 20, se tiene:

$$\Delta P_{\text{distribuidor}} = 0.5(1730.67)$$

$$\Delta P_{\text{distribuidor}} = 865.335 \text{ Pa} = 88.24 \text{ kg/m}^2$$

La velocidad local en cada orificio se la calculó empleando la Ecuación 21, se consideró un espesor de la placa y diámetro de los orificios de 3mm.

Al cumplirse que  $\frac{t}{d_{or}} > 0.09$ , se determinó el coeficiente de arrastre con la Ecuación 22.

$$C_{dor} = 0.82 \left( \frac{t}{d_{or}} \right)^{0.13}$$

$$C_{dor} = 0.82 \left( \frac{3}{3} \right)^{0.13} = 0.82$$

$$u_{or} = C_{dor} \sqrt{\frac{2\Delta P_{\text{distribuidor}}}{\rho_g}}$$

$$u_{or} = 0.82 \left( \sqrt{\frac{2 \cdot 865.335}{1.204}} \right) = 31.1 \text{ m/s}$$

La relación  $u_0 / u_{or}$  debe ser menor a 10% (Kunii & Levenspiel, 1969), en este caso es 8.95% y representa el área libre en el distribuidor.

Reemplazando los datos obtenidos en la Ecuación 23, se determinó el número de orificios que deberá tener el distribuidor.

$$N_{or} = \frac{4 u_o}{\pi d_{or}^2 u_{or}}$$

$$N_{or} = \frac{4 \cdot 2.784}{\pi \cdot 0.003^2 \cdot 31.1} = 12664$$

Se adoptó una matriz de triángulo equilátero para distribuir los agujeros (Ver Figura 20), el espaciado entre centros orificios adyacentes se calculó de la siguiente forma:

$$\frac{N_{or}}{A} = \frac{2}{\sqrt{3} I_{or}^2}$$

Donde:

$I_{or}$  ; Espacio entre centros de orificios

$A$  ; Área del distribuidor

$$I_{or} = \sqrt{\frac{2(\pi \cdot 200^2)}{\sqrt{3} \cdot 12664}} = 3.4 \text{ mm}$$

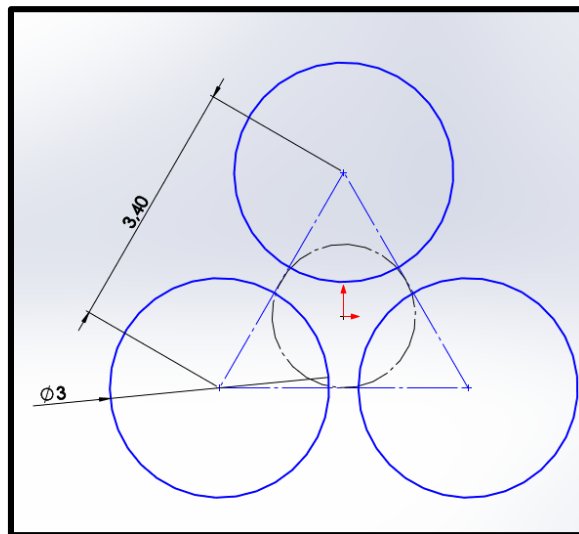


Figura 20 Distribución de Agujeros  
Fuente: El Autor

### Selección de Material de construcción

La tolva se construirá con acero inoxidable AISI 304, cumpliendo así la norma internacional FDA (Food and Drug Administration).

Para determinar el espesor del material se empleó software CAD para simular los esfuerzos soportados por la tolva. La columna de fluidización es la parte que soporta

mayores cargas térmicas y estáticas, por esta razón, se realizó el estudio a esta sección.

Se realizaron varias simulaciones variando el espesor del material. (Ver Anexo 7, 8 y 9). Los valores de desplazamiento y deformación unitaria son bajos, por esta razón, se determinó el espesor del acero teniendo en cuenta la resistencia última a la tracción cuyo valor es 579 MPa (84000 Psi) (Ver Anexo 10).

El espesor seleccionado es de 2mm, ya que, el esfuerzo de Von Mises, obtenido de la simulación, es 538 MPa (Ver Anexo 9, Figura 36) y la resistencia última a la tracción es mayor.

### **6.3. Diseño de los ductos de aire**

Los ductos de aire de la máquina se construirán con acero inoxidable AISI 304 ( $\epsilon = 0.015$ ), espesor 2mm, tendrán un diámetro de 200 mm. Un ducto horizontal de 0.5 m conectado a la descarga del ventilador, por medio de un acople rectangular-circular, y un ducto vertical de 0.4 m conectado a la tolva, encargados de dirigir el aire caliente.

Las pérdidas en el ducto serán tomadas en cuenta al momento de dimensionar y seleccionar el ventilador.

### **6.4. Dimensionamiento del ventilador**

Para el dimensionamiento del ventilador se utilizó el catálogo de ventiladores centrífugos para aplicaciones industriales CW de Soler & Palau®, la densidad del café Seco  $680 \text{ kg}/\text{m}^3$  (Ver Anexo 5) y velocidad de operación  $8.352 \text{ m/s}$ , calculada en el literal 6.2.

#### **Cálculo del caudal**

El caudal de aire que recorrerá el ducto, está en función del área transversal del mismo y de la velocidad de operación, tomando el valor de:

$$Q = \frac{v\pi D^2}{4}$$

$$Q = \frac{8.352\pi 0.2^2}{4} = 0.2623 = 944.28 \text{ m}^3/\text{h}$$

- **Cálculo de la presión total**

Para calcular la presión total, se empleó la ecuación de Bernoulli, tomando en cuenta las pérdidas en el ducto de aire, por lo tanto:

$$P_t = \Delta P_{\text{lecho}} + \frac{\rho g}{2} (u_{op}^2) + hf_p + hf_s + Z\rho g$$

Donde:

$hf_p$  : Pérdidas primarias en el ducto

$hf_s$  : Pérdidas secundarias en el ducto

$Z$  : Altura del ducto

Pérdidas en el ducto ( $hf_p$ ):

$$hf_p = f\rho g \frac{LQ^2}{\pi^2 g D^5}$$

$$Re = \frac{4Q}{\pi\gamma D}$$

$$\gamma = 1.51 \times 10^{-5} m^2/s \quad (\text{Ver Anexo 6})$$

$$Re = \frac{4(0.2623)}{\pi(1.51 \times 10^{-5})(0.2)} = 110586.3353$$

El Coeficiente de rugosidad del acero inoxidable es de:  $\varepsilon = 0.015cm$

$$f = \frac{0.25}{\left[\log\left(\frac{\varepsilon}{3.71D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}}\right)\right]^2}$$

$$f = \frac{0.25}{\left[\log\left(\frac{0.015}{3.71 \times 20} + \frac{5.74}{110586.3353^{0.9}}\right)\right]^2} = 0.0212$$

$$hf_p = 0.0212 \times 1.204 \left(\frac{0.9 \times 8 \times 0.2623^2}{\pi^2 \times 0.2^5}\right) = 4 Pa$$

Pérdidas por accesorios ( $hf_s$ ):

$$hf_s = k \frac{\rho}{2} v^2$$

Para unir el ducto horizontal con el vertical se empleó un codo de  $90^\circ$  ( $k = 0.22$ ), por tanto:

$$hf_s = 0.22 \cdot \frac{1.204}{2} \cdot 8.352^2 = 9.23 Pa$$

Reemplazando los valores calculados en la ecuación de Bernoulli, se tiene:

$$P_t = 1731 + \frac{1.204}{2} (8.352^2) + 4 + 9.23 + 0.4(9.81 \times 1.204)$$

$$P_t = 1791 \text{ Pa} = 182.75 \text{ mmca}$$

Usando el prontuario de ventilación de Soler & Palau® se determinó la presión dinámica, en función del caudal y el diámetro del ducto de aire, en este caso será de 4 mmca (Ver Anexo 11)

Para poder dimensionar el ventilador se necesita conocer la presión estática y el caudal de aire requerido.

La presión estática se calculó empleando la Ecuación 25:

$$P_e = P_t - P_d$$

$$P_e = 182.75 - 4 = 178.75 \text{ mmca}$$

Con los valores de caudal igual ha  $765 \text{ m}^3/\text{h}$  y presión estática igual a 178.75 mmca, se dimensionó el ventilador, empleando el catálogo de ventiladores centrífugos para aplicaciones industriales CW de Soler & Palau® (Ver Anexo 13), cuyas características son las siguientes:

- Modelo: CWTO-256
- Velocidad de giro: 4000 rpm
- Potencia absorbida: 0.75 BHP
- Nivel Sonoro db(A): 63 dB
- Eficiencia total: 71%
- Tipo de transmisión: Poleas y bandas
- Tipo de rotor (O): Curvo atrasado
- Aditamentos para soportar temperaturas de hasta 300°C.
  - Pintura térmica
  - Disco de enfriamiento

Las dimensiones de este ventilador se las puede ver en el Anexo 14.

Para ensamblar el ventilador con el ducto vertical se seleccionó un acople rectangular-circular, teniendo en cuenta las dimensiones del ducto de descarga del ventilador (Ver Anexo 15)

En el Anexo 16 se puede observar las dimensiones y número de taladros del acople seleccionado. Además, se incorporará malla de protección y brida de succión (Ver Anexos 20 y 21)

### **6.5.Dimensionamiento del sistema de calentamiento de aire**

Se necesita conocer la potencia calorífica, que permita llegar a una temperatura del aire dentro del ducto de 210 °C aproximadamente.

Primero se determinó la humedad relativa de la ciudad de Loja.

- La humedad relativa media anual de la ciudad de Loja es: 76%, (ver Anexo 17).

Utilizando la Ecuación 2 se calcula la humedad del café, la cual es:

$$M = 16.42 \%$$

El calor específico del grano de café se calcula utilizando la Ecuación 3:

$$C_{p \text{ café}} = 2.31 \text{ kJ/kgK} = 0.552 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$$

El calor total requerido para tostar el café crudo se lo calcula utilizando la Ecuación 1. Se pretende tostar 10 kg de café en 15 minutos, si no se toma en cuenta el tiempo de enfriamiento del café, se supone que en 1 hora se tostará 40 kg.

La humedad inicial del café seco es de 10-15%, lo que supone que el café posee cierta cantidad de agua aun estando seco, la humedad promedio del café que se emplea en la empresa es 13%. Este 13% de humedad equivale a 5.2 kg/h que es la cantidad de humedad que se debe eliminar para que el café se tueste.

Se consideró calor específico del agua  $1 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$ , calor latente de vapor  $500 \text{ kcal/kg}$ .

El calor específico del aire es  $1012 \text{ J/kgK}$  a 20 °C y una atmosfera de presión (Ver Anexo 18), su equivalente es  $0.242 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$ . El cálculo del calor total requerido se realizó para una temperatura de tueste de 210 °C y una temperatura ambiente de 20 °C.

En la Tabla 5, se resume el cálculo del calor total requerido, que es la adición del calor sensible del grano de café ( $Q_1$ ), calor sensible del agua contenida en el grano de café ( $Q_2$ ), calor sensible del vapor de agua ( $Q_3$ ) y calor latente del vapor de agua ( $Q_4$ ).

Tabla 5 Cálculo de calor total requerido para tostar 40kg de café en una hora.

	$\dot{m}(\text{kg}/\text{h})$	$C_p(\text{kcal}/\text{kg}^\circ\text{C})$	$\Delta T(^\circ\text{C})$	$Q(\text{kcal}/\text{h})$
$Q_1$	40	0.552	(210-20)	4195.2
$Q_2$	5.2	1	(100-20)	416
$Q_3$	5.2	0.242	(210-100)	138.424
		$L(\text{kcal}/\text{kg})$		
$Q_4$	5.2	500	-----	2600
$Q_T$				7349.624

Fuente: El Autor

El calor total requerido para tostar el café crudo es 7349.624 Kcal/h que equivale a 8.55 KW.

### 5.5.1 Dimensionamiento del quemador

Una vez determinada la cantidad de calor que se requiere para tostar 10 kg de café en un tiempo aproximado de 15 minutos, se procede a dimensionar el quemador.

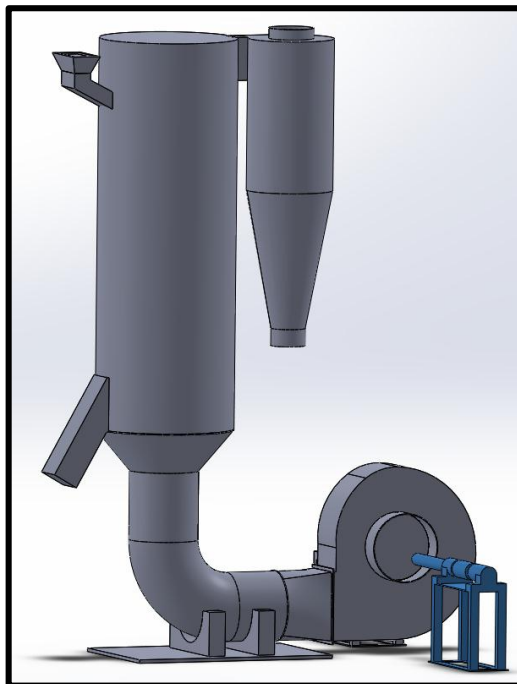
Se optó por un quemador tubular de GLP marca COFACO®, por las prestaciones que brinda:

- Pueden fabricarse con válvula solenoide de corte total y/o parcial, interruptor de seguridad a termocupla, control electrónico de llama con encendido automático, transformador de encendido, caja de control o conexiones de aluminio con salidas mediante prensa cables.
- Equipos esmaltados con pintura de polvo epoxi
- Funciona con gas natural o envasado
- Se puede obtener potencias de hasta 140000 Kcal/h
- Compuesto por tubo Venturi, asegura la correcta y constante proporción de gas y aire en cualquier potencia que se lo regule.

Las características del equipo seleccionado son las siguientes (Ver Anexo 19):

- Modelo: QTU25
- Potencia Mínima: 1000 Kcal/hora
- Potencia Máxima: 10000 Kcal/hora
- Combustible: GPL
- Filtro de gas
- Electroválvula (Válvula Solenoide)
- Piloto de alta retención con boquilla de acero inoxidable

El quemador se ubicará en la parte de la aspiración del ventilador (Ver Figura 21) esto permitirá que el café nunca haga contacto con la llama y absorba simplemente calor.



*Figura 21 Quemador de GPL COFACO®  
Fuente: El Autor.*

## **6.6.Sistema para el tratamiento de Humos**

Luego de la revisión de literatura, se decidió emplear un ciclón de lavado, puesto que, permiten la separación de partículas sólidas o líquidas que se encuentran suspendidas en un gas portador, al no poseer partes móviles son fáciles de dar mantenimiento y ocupan menor espacio que quemadores de humos o ductos de recirculación.



El tamaño de las partículas de cascarilla de café varía entre  $0.425 - 2.36mm$  (Roa, 2013) , por lo que no es necesario usar un ciclón de alta eficiencia. Se usará un ciclón convencional de entrada tangencial tipo switf. En la Figura 3 se muestran las principales dimensiones del ciclón de entrada tangencial y en la Tabla 2 se describen las características de dicho ciclón.

### 6.6.1. Dimensionamiento del ciclón

Para dimensionar el ciclón se empleó el método general (Safikhani & Shams, 2011), velocidad  $22 \text{ m/s}$ , caudal de  $0.2623 \text{ m}^3/\text{s}$ , por lo tanto el área transversal del ciclón será:

$$A = \frac{Q}{v}$$

$$A = 0.012m^2$$

El diámetro del ciclón es:

$$\text{Altura de entrada al ciclón: } a = 0.5 DC$$

$$\text{Ancho de entra al ciclón: } b = 0.25 DC$$

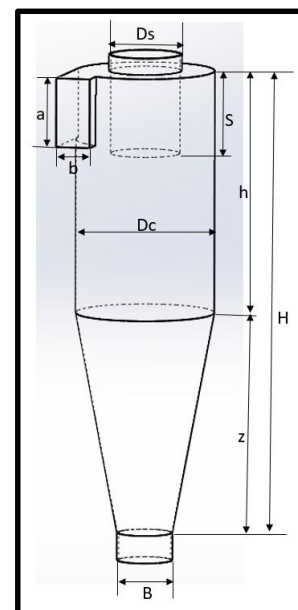
$$A = a \times b$$

$$0.012 = 0.5DC \times 0.25DC$$

$$DC = 0.3m$$

Usando la Tabla 2 se define las dimensiones principales del ciclón, en este caso serán:

- Altura de entrada al ciclón:  $a = 0.15m$
- Ancho de entrada al ciclón:  $b = 0.075m$
- Altura de salida del ciclón:  $s = 0.18m$
- Diámetro de salida:  $Ds = 0.15m$
- Altura parte cilíndrica:  $h = 0.525m$
- Altura parte cónica:  $z = 0.6m$
- Altura total del ciclón:  $H = 1.125m$
- Diámetro de salida de partículas:  $B = 0.12m$
- Factor de configuración:  $G = 381.79$



- Número de vórtices:  $N = 5.5$

### **6.7. Aislamiento térmico**

En general se trata de imponer una temperatura de protección, de forma que contactos involuntarios no produzcan lesiones, el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (Asociación Técnica Española de Climatización y refrigeración, 2007), impone que ninguna superficie expuesta a contactos accidentales pueda estar a más de 60°C.

Utilizando el catálogo de Fiberglas®.se seleccionó el espesor de aislamiento térmico.

La temperatura máxima que alcanzará el tostador es 230°C, para tener un factor de seguridad se dimensionó el aislamiento térmico para temperatura de 287°C, en función del diámetro de cada componente. El ducto de aire deberá tener un espesor de lana de vidrio de 63.5 mm y la columna de fluidización 76 mm, para obtener una temperatura de 43.9°C en el exterior (Ver Anexo 22).

El ciclón al tener un diámetro de 0.3 m tendrá que ser recubierto con 63.5 mm de lana de vidrio, al igual que los accesorios y conexiones de la máquina.

### **6.8. Selección de Bridas**

El ducto de aire va a estar conectado por medio de bridas a la tolva y al acople rectangular-circular de la descarga del ventilador. Teniendo en cuenta el espesor del aislamiento térmico y el diámetro del ducto, se definió el diámetro exterior, diámetro interior y agujeros pasantes, tomando los siguientes valores, diámetro exterior 450 mm, diámetro interior 204mm, 12 agujeros pasantes de diámetro 10,5mm.

Las bridas se construirán de acero inoxidable AISI 304, se empleará juntas L-443 para evitar fugas en las conexiones, por su resistencia a altas temperaturas y su capacidad de sellado. (Ver Anexo 23)

### **6.9. Sistema de control**

Para controlar la máquina, se decidió emplear un controlador electrónico de flama marca AMCE® VG310.

El equipo contra falla de flama AMCE®, está diseñado para controlar quemadores que empleen GLP en su combustión y utilizan varilla cantal como sensor (por medio de ionización del aire).

En la Figura 22 se muestra el diagrama de flujo del controlador de falla de flama:

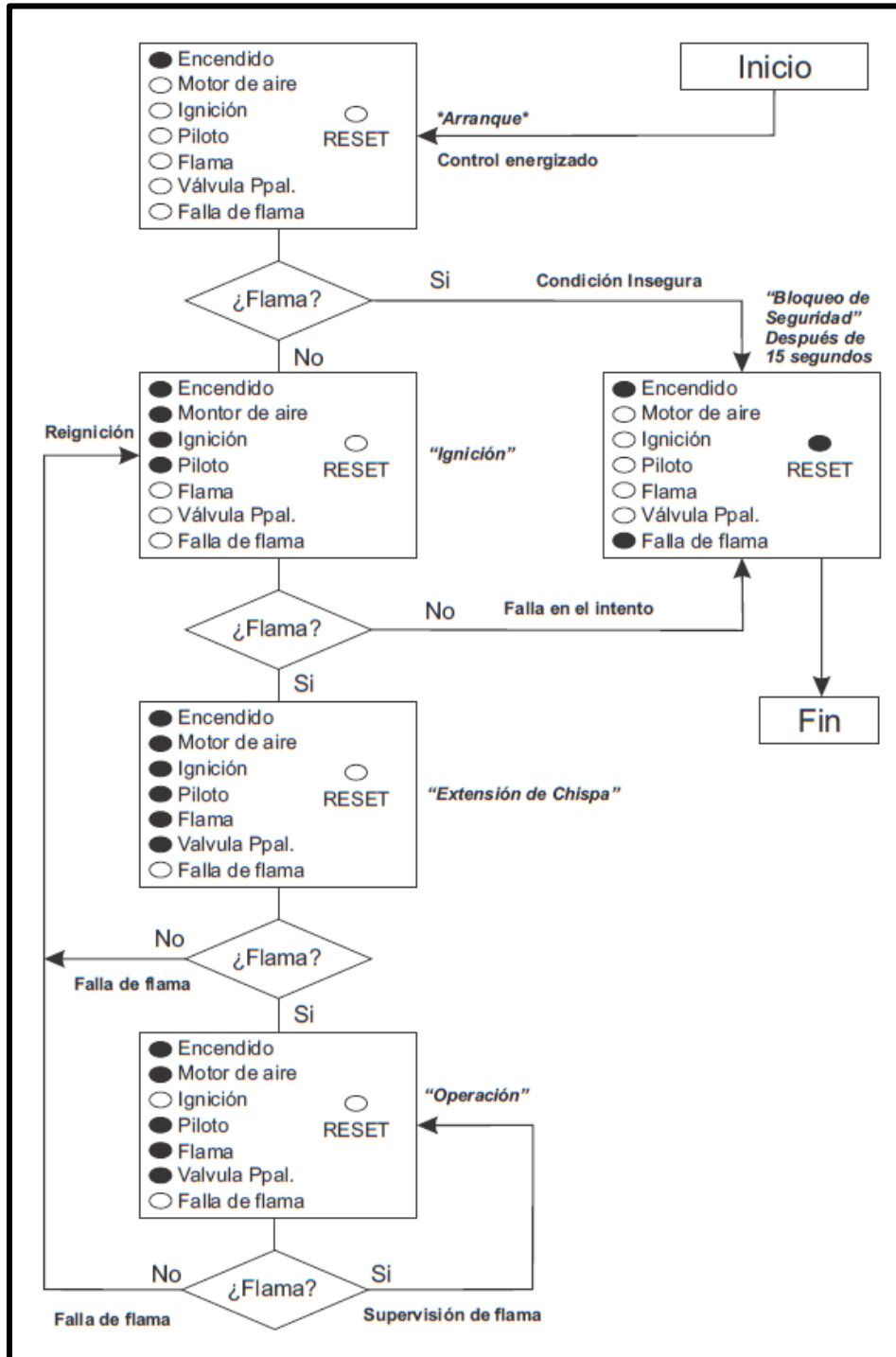


Figura 22 Diagrama de Flujo del controlador VG310 AMCE.  
Fuente: (AMCE, 2016)

En la Tabla 6 se muestra las características eléctricas de los terminales del controlador VG310, las cuales se tomó en cuenta para realizar el diagrama de control de la máquina, como se puede observar en el Anexo 24.

Tabla 6 Características eléctricas de los terminales.

Terminal	Descripción	Parámetros
1	Vivo alimentación eléctrica (L1)	120 VAC[+/-10%] 60 HZ
2	Neutro de alimentación eléctrica (L2)	Tierra
3	Salida hacia el arrancador del motor de aire	120 VAC 6 Amp máx.
4	Salida hacia el transformador de alto voltaje	120 VAC 3 Amp máx.
5	Salida hacia la válvula solenoide principal	120 VAC 3 Amp máx.
6	Salida hacia la válvula solenoide de piloto	120 VAC 3 Amp máx.
7	Conexión con la varilla cantal o fotocelda	Varilla cantal o fotocelda C7003, C7010, C7013, C7014.
8	Conexión con tierra del quemador o fotocelda	
9	Salida de alarma para dispositivo de alerta	120 VCA 2 Amp. Máx.
Chasis		Tierra Física

Fuente: (AMCE, 2016)

El controlador VG310, se alimenta de 110 VCA, se tendrá dos paradas de emergencia, una ubicada en el tablero eléctrico general y uno ubicado en la máquina, una botonera de encendido y una de apagado.

Como protección a las entradas del controlador se empleará fusibles de riel din de 2A, cada salida del controlador estará comandada por un contactor (Ver Anexo 24).

Al presionar el botón de encendido una luz piloto (verde) indicará la puesta en marcha de la máquina y enclavará la bobina K0, energizando el controlador de flama. Si no existe ninguna condición insegura el controlador se apagará una vez terminado el proceso de tostado, en caso contrario, se activará una alarma de falla y será necesario resetear el controlador y repetir el proceso.

El motor del ventilador de la máquina es trifásico, por lo que es necesario implementar al sistema de fuerza un variador de frecuencia, se decidió emplear un variador de frecuencia SINAMICS G110 de siemens, ideal para aplicaciones de 0.16 Hp a 4.02 Hp.

Adicionalmente esto, brindará la posibilidad de regular el caudal de aire del ventilador, lo que permitirá variar el tiempo de tostado y capacidad de la máquina.

En el Anexo 25 se puede observar el diagrama de fuerza de la máquina, como protección, ante corto circuitos y sobrecargas, se empleará fusibles de riel din de 0.5 A.

Para el correcto funcionamiento del controlador de falla de flama VG310, se debe colocar la varilla cantal en el quemador industrial como se muestra en la Figura 23.

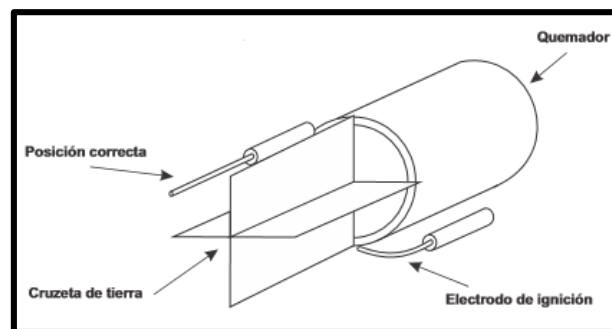


Figura 23 Instalación Correcta del sensor.

Fuente: (AMCE, 2016)

## 6.10. Selección de accesorios

Los accesorios que se implementarán a la máquina son mirilla, medidor de temperatura, tolva de alimentación, compuertas y ducto de descarga, los cuales se detallan a continuación.

### Selección de la mirilla

Se necesita observar el proceso de tueste del café para determinar la calidad y tono de tueste que se requiere. Se usará una mirilla Franko® tipo parche serie 6020, que soporta hasta 300 ° C, 3 pulgadas de diámetro y una presión de 10 bar. Ver Anexo 26.

### Selección del termómetro

Se usará un termómetro bimetálico marca WIKA® modelo S 5411 diámetro 80 mm con rangos de indicación de 0-300 °C. (Ver Anexo 27)

### **Tolva de alimentación y descarga.**

Para poder cargar la máquina se implementó una tolva de alimentación, cuya inclinación con respecto a la horizontal es 60°, soldada a una compuerta de dos posiciones de perfil cuadrado.

El ducto de descarga tiene una inclinación de 45°, soldado a una compuerta de dos posiciones diseñada para descargar por completo la máquina. Las medidas tanto de la tolva de alimentación como de descarga se especifican en los planos adjuntos.

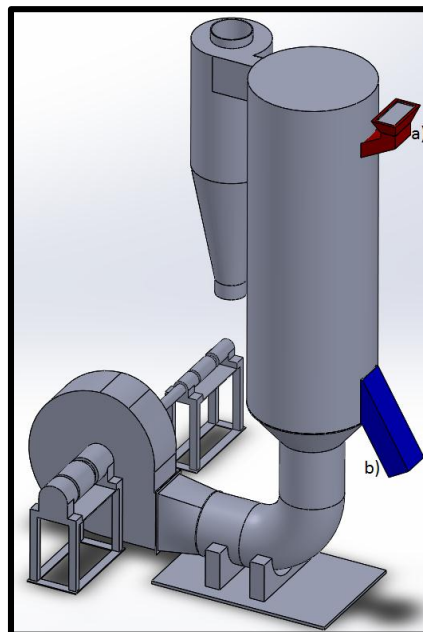


Figura 24 a) Tolva de alimentación b) Ducto de descarga  
Fuente: El Autor

## 7. DISCUSIÓN

La empresa “Café Indera” es una pequeña empresa cuya producción diaria es de 90 kg de café tostado, utiliza un método de tueste poco eficiente y su producto es de calidad media. Luego de analizar los distintos sistemas existentes y la información recolectada en la empresa, se decidió utilizar un sistema de lecho fluido por los beneficios que brinda. El sistema de lecho fluido es ideal para mejorar la calidad del producto tostado, pues crea un estado de flotación dentro de la tolva con lo que se puede obtener un tueste homogéneo y distintas tonalidades de café, gracias a la alta superficie de contacto que se crea.

Al no tener datos específicos de la densidad del café se la calculó experimentalmente con granos de café tostado obteniendo una densidad de  $304.5 \text{ kg/m}^3$ , lo que permite obtener el volumen aproximado del café al final del proceso de tueste. Con el valor obtenido del volumen que ocuparán 10 kg de café, luego de ser tostados se dimensionó la tolva y se caracterizó el sistema de lecho fluido, siendo  $0.067 \text{ m}^3$  el volumen del lecho,  $2.784 \text{ m/s}$  la velocidad mínima de fluidización,  $46.3 \text{ m/s}$  la velocidad terminal, 1.13 m la altura de operación de la columna de fluidización y 8.352 m/s la velocidad de operación. Las dimensiones de la sección uniformadora y el distribuidor se las determinó en función del diámetro de la columna de fluidización y la velocidad de operación.

Se acopló un ciclón, una tolva de alimentación y una de descarga de café a la columna de fluidización.

Los ductos de aire son de 200 mm de diámetro, 0.5 m de longitud el ducto horizontal y 0.4 el vertical, acoplados entre sí por un codo de 90°. Por medio de bridas, fabricadas en acero inoxidable AISI 304, se unen a la tolva y a la descarga del ventilador. Las pérdidas producidas por el ducto se las tomó en cuenta para el dimensionamiento del ventilador.

Para reducir el riesgo de accidentes y quemaduras se dimensionó el aislamiento térmico, obteniendo una temperatura externa de la máquina, tolerable al tacto, de 43.9°C.

Con el valor de velocidad de operación y el área transversal de la tolva se determinó el caudal de aire, que recorrerá los ductos, cuyo valor es  $0.2623 \text{ m}^3/\text{s}$ . Una vez conocido el valor de caudal es necesario determinar la presión estática la cual

permite seleccionar el ventilador. Luego de realizar los cálculos necesarios se obtiene un valor de presión estática de 178.75 mmca, del catálogo de ventiladores de Soler & Palau® se escoge un ventilador de 0.75 BHP modelo CWTO-256, el cual deberá poseer disco de enfriamiento y pintura térmica.

Para el cálculo del calor total requerido se tomó en cuenta que el proceso de tostado consta de tres fases, la primera fase seca la humedad del café, se pasa de la temperatura ambiente hasta llegar a una temperatura de 100 °C, la segunda fase origina la expansión de las celdillas del grano de café y adquiere el 60% de su volumen se pasa de los 100 °C a 210°C, la tercera fase permite obtener distintas tonalidades de tostado de café, se mantiene la temperatura en un rango de 210-230°C, por tanto, el calor requerido para tostar 40 kg de café en una hora es 8.55 kW (7349.624 Kcal/h).

Para calentar el aire se decidió utilizar un quemador industrial de GLP marca COFACO®, cuya capacidad mínima es 1000 Kcal/hora y máxima 10000 Kcal/hora, esto permitirá obtener distintas temperaturas, que se traduce en distintas tonalidades de tueste.

Para el procesado de los humos producto del tostado de café se diseñó un ciclón convencional de entrada tangencial, que además brindará la opción de limpiar el café de impurezas aumentando la calidad del producto final obtenido.

Teniendo en cuenta la norma internacional FDA y realizando simulaciones de esfuerzos estáticos y térmicos se determinó el material con el que deberá ser construida esta máquina. Se empleará acero inoxidable AISI 304 de espesor 2mm.

Para la parte de control de la máquina se implementó un controlador de falla de flama marca AMCE® modelo VG310, que permitirá manipular la máquina de manera fácil y segura.

Al ser trifásico el ventilador se usará un variador de frecuencia SINAMIC G110 de siemens, para poder arrancar el proceso de tostado, una ventaja de acoplar este variador de frecuencia es que brindará la opción de poder controlar la velocidad de tueste.

Los accesorios que se implementó permiten mejorar la experiencia y manejo de la máquina, la mirilla, por ejemplo permitirá observar el proceso de tueste, además determinar si el café ya está listo.



## 8. CONCLUSIONES

La presente investigación de grado, permitió calcular y diseñar un tostador de café que emplea flujo de aire caliente para el proceso de tostado, este método permite satisfacer los parámetros funcionales y requerimientos operacionales de la empresa “Café Indera”.

- A través del estudio y sistematización de los requerimientos operativos de la empresa “Café Indera” y de su producción diaria (90 kg) se ha logrado establecer la capacidad del tostador (10 kg) requerido para que la empresa pueda mejorar su producción y la calidad de su producto final.
- El sistema que brinda mejores beneficios para el proceso de tostado de café empleando flujo de aire caliente es el sistema de lecho fluido, los parámetros principales para dimensionar este sistema son: tipo de café, humedad del grano de café seco, cantidad y tiempo de tueste.
- Se ha logrado diseñar y/o seleccionar los componentes electromecánicos principales de la máquina: 1 ventilador CWTO-256 de 0.75 BHP de potencia y una eficiencia de 71%, 1 controlador de flama AMCE VG310, 1 variador de frecuencia SINAMIC G110 siemens, se empleará GLP como método de calentamiento del aire, por su elevado poder calorífico, los ductos y la tolva serán construidos de acero inoxidable AISI 304 de 2 mm de espesor.

## **9. RECOMENDACIONES**

- Agregar silenciador en la descarga y succión del ventilador, para reducir la cantidad de ruido emitida por el mismo.
- Analizar las ventajas de incorporar un sistema de recirculación de aire, para aumentar la eficiencia energética.
- Incorporar mecanismo de recambio del distribuidor, para facilitar el mantenimiento de la máquina y evitar fallas por fatiga en el distribuidor.

## **10.BIBLIOGRAFÍA**

### **Libros**

- Campo, E. (2013). *Tecnología del café*. Bogotá.
- Clift, R. (1986). *Hidrodinámica de lechos fluidizados*. Inglaterra: Ed. John Wiley and Sons.
- Ergun, S. (1952). *Fluid flow through packed columns*. Chem. Eng. Prog.
- Kunii, D., & Levenspiel, O. (1969). *Fluidization engineering*. New York: Robert E. Krieger Publishing Company.
- Mott, R. L. (2006). *Mecánica de fluidos*. México: PEARSON EDUCACIÓN.
- Mohsenin, N. (1970). *Physical properties of plant and animal materials*. New York: Science Publishers.
- Muyorama, K., & L.S., F. (1985). *Fundamentals of Gas Liquid Solid Fluidization*. AICHE Journal.
- Neuhaus Neotec. (2010). *Construcción de máquinas y plantas para la industria del café*. Hamburgo.
- Pell, M. (1990). *Handbook of Powder and Technology, Vol. 8 Gas Fluidization*. Estados Unidos: Ed. Elsevier.
- Riaño, E. (2013). *Tecnología del café*. Bogotá.
- Safikhani, H., & Shams. (2011). *Numerical simulation of square cyclones in small sizes*. Adv. Powder Tech.
- Soler & Palau. (2002). *Prontuario de ventilación*.

### **Tesis**

- González, M. (2015). *Diseño, construcción y puesta en marcha de un secador tipo Batch de Lecho Fluidizado para el laboratorio de Operaciones Unitarias*. Guayaquil.
- Petit, H., Pico, L., & Barbosa, M. (2013). *Influencia de la longitud del cono de un ciclón sobre las variables de flujo*. Buenos Aires.
- Roa. (2013). *Beneficio Ecológico del Café*. Bogotá: Cenicafe.
- Roa, M. (2003). *Potencialidad del café y sus residuos rurales como cultivo energético, en Colombia*. Cenicafé.

Sánchez, J., Anaya, I., Vizcarra, M., Gutiérrez, G., & Pineda, S. (2003). Propiedades Físicas e Hidrodinámicas de la Fluidización del Café Verde y Tostado . *ENCB-IPN*, 43-47.

Soriano, B. (2010). *Cálculo de las tolvas de almacenamiento*. Sevilla.

### **Revistas**

Especialista sectorial de café y elaborados - Dirección de Producción de Exportación. (2013). *Análisis Sectorial del Café*. Quito: PROECUADOR.

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2014). *Anuario Meteorológico*. Quito: INAMHI.

Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN-ISO 6669. (2013). *Café verde y café tostado.determinacion de la densidad aparente de los granos enteros por el método de caída libre*.

Solá, A. (2012). Un paseo por la historia del tueste del café. *Sabor de Café*.

Solà, A. (2014). Tostado y Molido del café. *Sabor de Café*.

UTN-FRBA. (2010). *Hidráulica Gral. y Aplicada*.

### **Catálogos**

COFACO®™. (2017). *Quemadoires tubulares a gas*. Lima.

Escobar, R., Arestegui, M., Moreno, A., & Sanchez, L. (2013). *Catálogo de maquinaria para procesamiento de café*. Lima: Itala SAC.

Fiberglas®. (2008). *Aislamiento para Tuberías*. México.

Franko. (2014). *Catálogo de productos*. México.

Inoxpres. (2012). *Acero inoxidable para instalaciones*.

LAMONS ®. (2012). *Manual de Juntas*. Houston.

PROBAT. (2010). *Manual de aplicaciones en la industria del café*. Germany.

PROBAT®. (2010). Tostadoras de Laboratorio. *Catálogo de Tostadoras PROBAT*.

Soler & Palau. (2012). *Ventiladores Centrífugos Aplicaciones Industriales*. Puebla: México C.P.

WIKA. (2011). *Instrumentación de temperatura mecánica*. Barcelona: Sabadell.

### **Documentación digital y en línea**

AMCE. (15 de Noviembre de 2016). *AMCE controles de flama*. Obtenido de <http://www.amcecontrolesdeflame.com.mx/descargas/VG310.pdf>

- Café La Nacional. (12 de Enero de 2017). *Café La Nacional*. Obtenido de Café La Nacional: <http://www.cafelanacional.com/nosotros/proceso-de-produccion-del-cafe/>
- Centro Científico Tecnológico Bahía Blanca. (20 de Enero de 2017). *bahiablanca-conicet*. Obtenido de <http://www.criba.edu.ar/cinetica/solidos/Capitulo5.pdf>
- Delgadillo Vargas, J. (25 de Febrero de 2017). *UPCOMMONS*. Obtenido de <http://hdl.handle.net/2099.1/20607>
- Guarneros, G. (25 de Enero de 2017). *Catarina*. Obtenido de [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lim/guarneros\\_m\\_g/capitulo3.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/guarneros_m_g/capitulo3.pdf)
- Londoño, C. E. (25 de Octubre de 2016). <http://www.scielo.org.co>. Obtenido de Diseño óptimo de ciclones: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1692-33242006000200011#eq24](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-33242006000200011#eq24)
- NESCO. (27 de 03 de 2017). *NESCO* . Obtenido de NESCO Web Site: <http://www.nesco.com>
- Patiño, J. (15 de Enero de 2017). *Catarina*. Obtenido de [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lim/patino\\_s\\_jl/capitulo3.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/patino_s_jl/capitulo3.pdf)
- PROBAT. (18 de Mayo de 2016). *PROBAT.COM*. Obtenido de Probat Neptune: <http://www.probat.com>
- Wesco. (25 de Marzo de 2017). Obtenido de Wesco Acero Inoxidable: <http://www.wesco.com.co>

## 11.ANEXOS

### ANEXO 1: Hoja de criterios de selección de método de calentamiento y movimiento de café.

Las variables que influyen en el proceso de tostado de café son: temperatura, tiempo de tueste, método de calentamiento y mecanismos de movimiento del café. Para determinar cuáles serán los componentes apropiados a emplear en el diseño del tostador de café, se consideró como variables principales, el método de calentamiento de la máquina y el mecanismo encargado de mantener en constante movimiento el café.

Tabla 7 Selección de Método de calentamiento y movimiento de café

MÉTODO DE CALENTAMIENTO	MOVIMIENTO DEL CAFÉ
GLP	Contenedor móvil
Resistencia eléctrica	Contenedor con agitador
Quemador a diésel	Neumático

- Solución 1: Emplear GLP como método de calentamiento y aire para mantener en movimiento el café.
- Solución 2: Emplear Resistencias eléctricas como método de calentamiento y aire para mantener en movimiento el café.

Los criterios que se tomaron en cuenta para determinar las soluciones antes expuestas, fueron los siguientes:

Muy buena: 4

Buena: 3

Regular: 2

Mala: 1

Tabla 8 Criterios de selección del método de calentamiento

	MÉTODO DE CALENTAMIENTO		
	GLP	Resistencia para aire forzado	Quemador a Diesel
Poder calorífico	4	2	3
Costo de operación	3	2	3
Costo de equipos	3	1	1
Recomendado para usar en alimentos	4	4	1
Montaje	4	3	4
Uso continuo	4	4	3
Riesgo de accidentes	2	4	1
Dimensiones	4	2	2
Asequibilidad	4	4	4
<b>TOTAL</b>	<b>32</b>	<b>26</b>	<b>22</b>

Fuente: El Autor

Tabla 9 Criterios de selección de método de movimiento del café

Movimiento del café			
	Neumático	Contenedor Móvil	Contenedor con agitador
Movimiento Constante	4	4	4
Superficie de contacto	4	2	2
Transferencia de calor	4	2	2
Temperatura Homogénea	4	3	3
Operaciones de mantenimiento	3	2	4
Dimensiones	2	4	4
Arranque	3	4	4
Costo	3	4	4
Capacidad	3	4	2
Calidad de tostado	4	3	3
Tiempo de tostado	4	3	2
<b>TOTAL</b>	<b>38</b>	<b>35</b>	<b>34</b>

Fuente: El Autor

**Nota:** Para el movimiento neumático se consideró un sistema de lecho fluidizado, el contenedor móvil hace referencia al mecanismo que se emplea actualmente en la empresa “Café Indera” (Ver Anexo 3), el contenedor con agitador se refiere a una tostadora comercial marca ROSTER-NESCO (Ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).



Figura 25 Tostador de café Roster-Nesco  
Fuente: (NESCO, 2017)

**Conclusión:**

Se optó por la solución 1, por las siguientes razones, el GLP obtuvo un puntaje de 32 como método de calentamiento pues la inversión inicial es baja, el GLP en la actualidad es de fácil acceso y bajo costo, posee un alto poder calorífico, los quemadores de GLP son menos costosos en comparación con las resistencias eléctricas y su geometría permite ubicarlos con facilidad dentro del diseño conceptual del tostador.


El sistema neumático obtuvo un puntaje de 38, ya que, el aire permite mantener en constante movimiento al café, creando un estado de flotación, obteniendo temperaturas homogéneas de tueste y alta superficie de contacto, que se traducen en un tostado uniforme y excelente transferencia de calor.



## ANEXO 2: Encuesta al gerente-propietario de la empresa "Café Indera"

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA**

Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables



Encuesta al gerente propietario de la empresa "Café Indera", Sr. Manuel Romero, sobre procesos y capacidad de producción de la empresa.

1. ¿Qué mercado ocupa actualmente la empresa "Café Indera"?

La empresa cuenta con un único local de distribución y ventas ubicado en la ciudad de Loja, en las calles 18 de noviembre entre José Antonio Egiguran y 10 de Agosto.

2. ¿Cuál es la producción diaria de café tostado?

Se tuesta un aproximado de 90kg diario

3. ¿Qué tipo de café se emplea como materia prima?

Se emplea café arábigo lavado, que tiene una humedad promedio de 13%

4. ¿Cuántas personas son las encargadas de tostar el café?

Tres operarios se encargan de manipular las máquinas, que se usan para el proceso de tostado.

5. ¿Qué tipo de máquinas se emplea para el proceso de tostado?

Se emplea máquinas rotacionales tipo tambor, que poseen un quemador de gas.

6. Describa el proceso de tostado de café que se ejecuta en su empresa.

Se carga las máquinas con 25 libras aproximadamente, el café se ubica al costado del tambor de la máquina, se acciona el motor que por medio de bandas y poleas hace rotar el tambor, se enciende manualmente el quemador, que es el encargado de calentar las paredes del tambor. Luego de 20-25 minutos se toma una muestra para verificar el estado en que se encuentra el café, si la tonalidad es marrón el café está listo. Luego se descarga la máquina y el café pasa a un proceso de soplado para enfriarse y eliminar el hollín producido por el proceso de tostado.

7. ¿Tiene conocimiento de las máquinas tostadoras de café que existen en la actualidad?

Sí, existen empresas que distribuyen máquinas automáticas para cada uno de los procesos por los que pasa el café hasta convertirse en un producto final de venta al público.

8. ¿Ha considerado mejorar los procesos de producción de la empresa "Café Indera"?

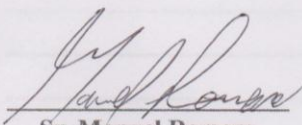
Se está considerando invertir en máquinas automáticas distribuidas por la empresa alemana PROBAT para mejorar los procesos de producción correspondientes al tostado y empaquetado del café.

9. ¿Qué inconvenientes presentan las máquinas tostadoras utilizadas por su empresa?

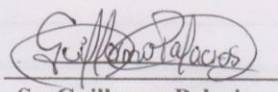
Las bandas de distribución se las cambia regularmente, las máquinas luego de cada tanda de tostado deben ser desocupadas por completo para limpiarlas, para verificar la totalidad del tostado es necesario detener las máquinas.

10. ¿Qué procesos considera que debe cambiar para mejorar la calidad del producto final?

El proceso de tueste se debería mejorar pues de esto depende el aroma y totalidad del producto final.



Sr. Manuel Romero  
Gerente Propietario



Sr. Guillermo Palacios  
Entrevistador



**ANEXO 3: Fotografías de las instalaciones donde se lleva a cabo el proceso de tostado de la empresa “Café Indera”.**



*Figura 26 Tostador de café 1.*  
Fuente: El Autor



*Figura 27 Tostador de café 2.*  
Fuente: El Autor



*Figura 28*Tostador de café 3  
Fuente: El Autor



*Figura 29*Proceso de soplado  
Fuente: El Autor

## ANEXO 4: Características físicas y parámetros hidrodinámicos del café verde

Tabla 10 Características Físicas del Café

Características físicas	Media	Desviación estándar
Largo X $10^{-3}$ (m)	9.6	$\pm 0.7$
Ancho X $10^{-3}$ (m)	7.1	$\pm 0.5$
Altura X $10^{-3}$ (m)	4.0	$\pm 0.5$
Peso unitario X $10^3$ (kg)	0.16	$\pm 0.002$
Volumen medio unitario X $10^4$ (m <sup>3</sup> )	1.3	$\pm 0.03$
Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> )	1222.0	$\pm 0.04$
Parámetros hidrodinámicos		
Densidad empacada (kg/m <sup>3</sup> )	640.12	$\pm 10.61$
Esfericidad	0.67	$\pm 0.04$
Diámetro equivalente X $10^{-3}$ (m)	6.4	$\pm 0.005$
Porosidad del lecho empacado	0.51	$\pm 0.009$
Porosidad en condiciones de mínima fluidización	0.63	$\pm 0.01$
Velocidad mínima de fluidización teórica a 26°C (m/s)	2.10	$\pm 0.07$
Velocidad mínima de fluidización teórica a 220°C (m/s)	2.70	$\pm 0.08$
Velocidad mínima de fluidización experimental a 26°C (m/s)	2.0	$\pm 0.15$

Fuente: (Sánchez, Anaya, Vizcarra, Gutiérrez, & Pineda, 2003)

## ANEXO 5: Densidad del Café Seco

Tabla 11 Densidad de varios materiales

MATERIAL	CONDICIÓN FÍSICA	PESO PROMEDIO POR VOLÚMEN	
		lb/pe <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>
Semilla de algodón	Granulada	35-40	560-640
Almidón	Pulverizado	30-40	480-640
Bórax	Pulverizado	50-70	800-1120
Carbón	Granular	50-60	800-960
Ceniza volátil (limpia)	Pulverizada	35-45	560-720
Madera triturada	Fibrosa	15-30	240-480
Corcho molido	Pulverizado	5-15	80-240
Cuarzo molido	Pulverizado	110	1760
Grafito	Pulverizado	40	640
Granos de café	Granular	40-45	640-720
Granos de maíz	Granular	45	720
Jabón en escamas	Granular	10-20	160-320
Linaza	Granular	45	720

Fuente: (Soler & Palau, 2012)

## ANEXO 6: Propiedades Físicas del Aire

Tabla 12 Propiedades físicas del aire

### PROPIEDADES FÍSICAS DEL AIRE a presión atmosférica

Temperatura	Densidad	Viscosidad dinámica	Viscosidad cinemática	Velocidad del sonido
	$\rho$	$\mu$	$\nu$	$c$
°C	kg/m <sup>3</sup>	N.s/m <sup>2</sup> 10 <sup>-5</sup>	m <sup>2</sup> /s 10 <sup>-5</sup>	m/s
-30	1,452	1,56	1,08	312
-20	1,394	1,61	1,16	319
-10	1,342	1,67	1,24	325
0	1,292	1,72	1,33	331
10	1,247	1,76	1,42	337
20	1,204	1,81	1,51	343
30	1,164	1,86	1,60	349
40	1,127	1,91	1,69	355
50	1,092	1,95	1,79	360
60	1,060	2,00	1,89	366
70	1,030	2,05	1,99	371
80	1,000	2,09	2,09	377
90	0,973	2,13	2,19	382
100	0,946	2,17	2,30	387
200	0,746	2,57	3,45	436
300	0,616	2,93	4,75	480

Fuente: (UTN-FRBA, 2010)



**ANEXO 7: Simulación de esfuerzo estático y térmico de columna de fluidización.  
Espesor 3mm.**

Para realizar la simulación se consideró la presión del lecho 1730.67 Pa. La temperatura máxima de tueste varía entre 200-230°C, la simulación se realizó para el caso extremo con temperatura 230°C.

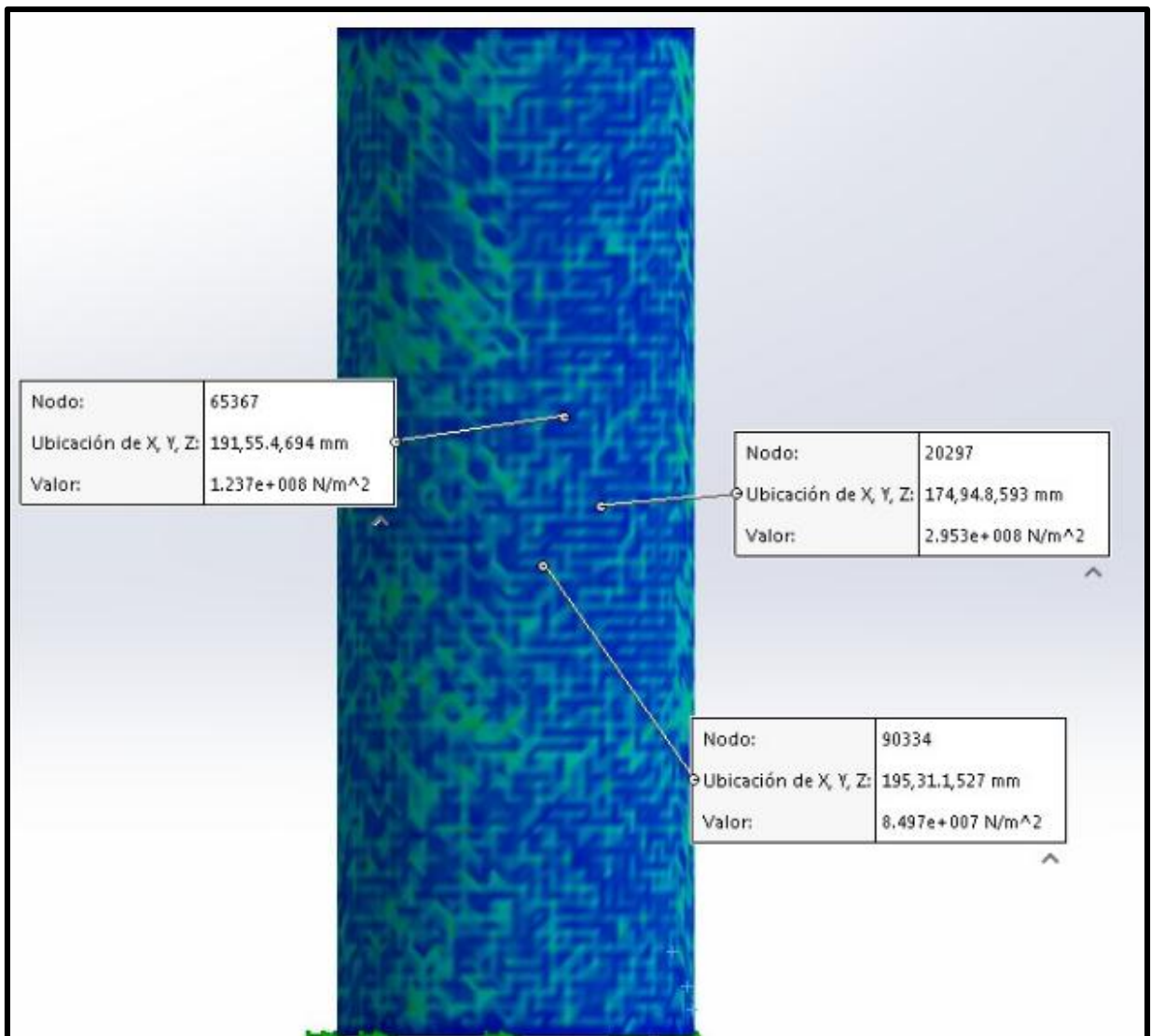


Figura 30 Esfuerzo de Von Mises. Espesor 3mm  
Fuente: El Autor

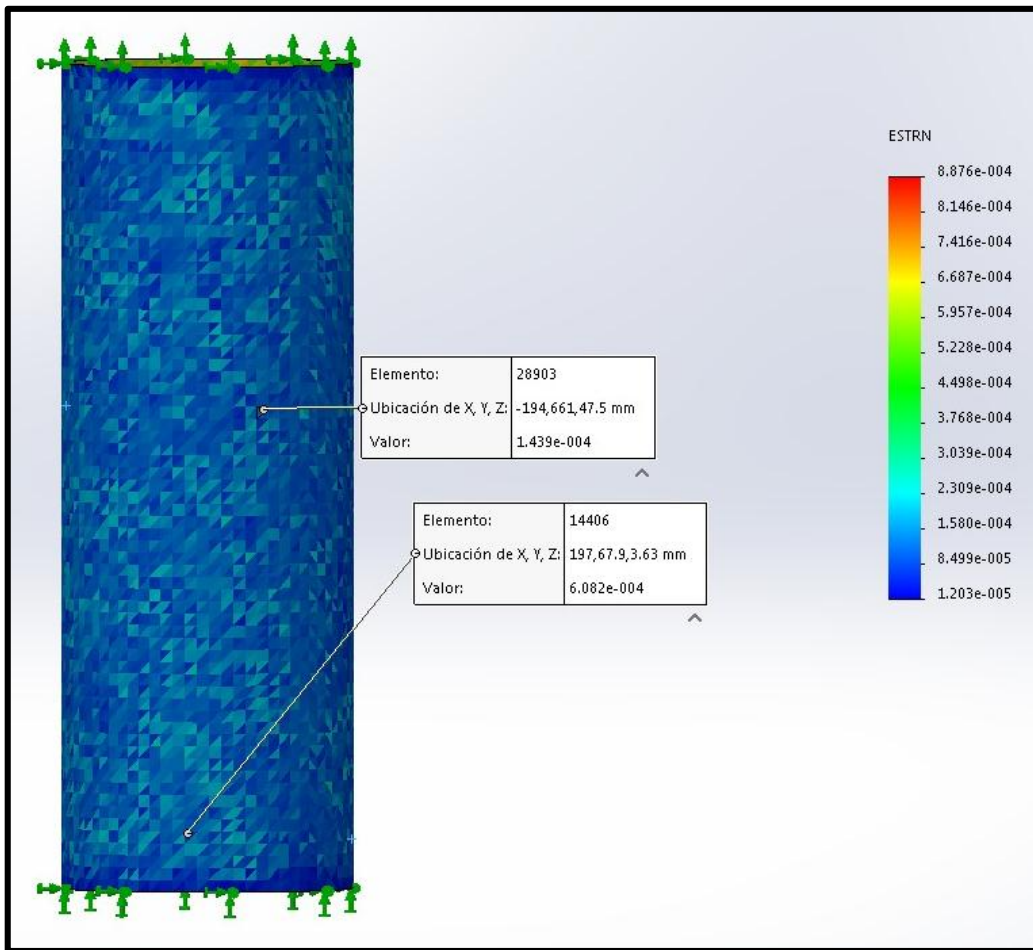


Figura 31 Deformación Unitaria. Espesor 3mm  
Fuente: El Autor

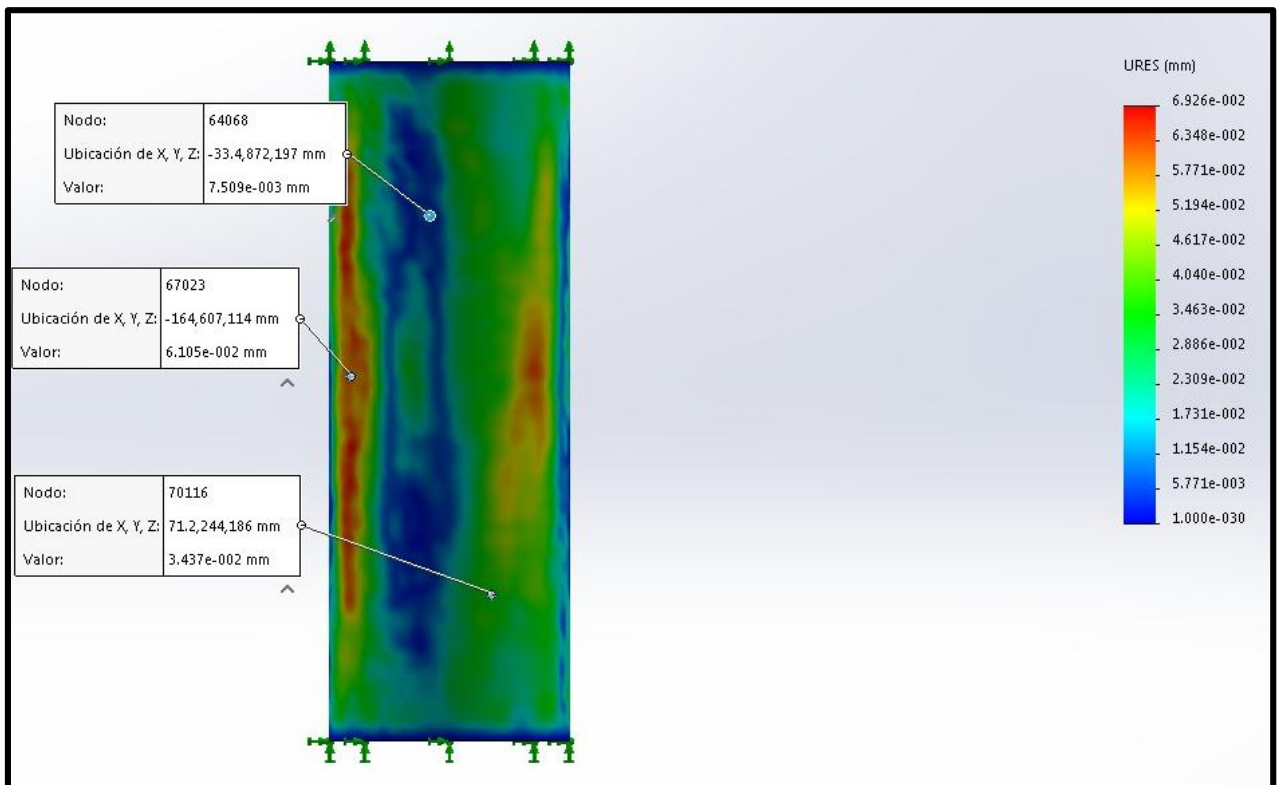


Figura 32 Desplazamiento. Espesor 3mm  
Fuente: El Autor

## ANEXO 8: Simulación de esfuerzo estático y térmico de columna de fluidización. Espesor 1.5mm.

Para realizar la simulación se consideró la presión del lecho 1730.67 Pa. La temperatura máxima de tueste varía entre 200-230°C, la simulación se realizó para el caso extremo con temperatura 230°C.

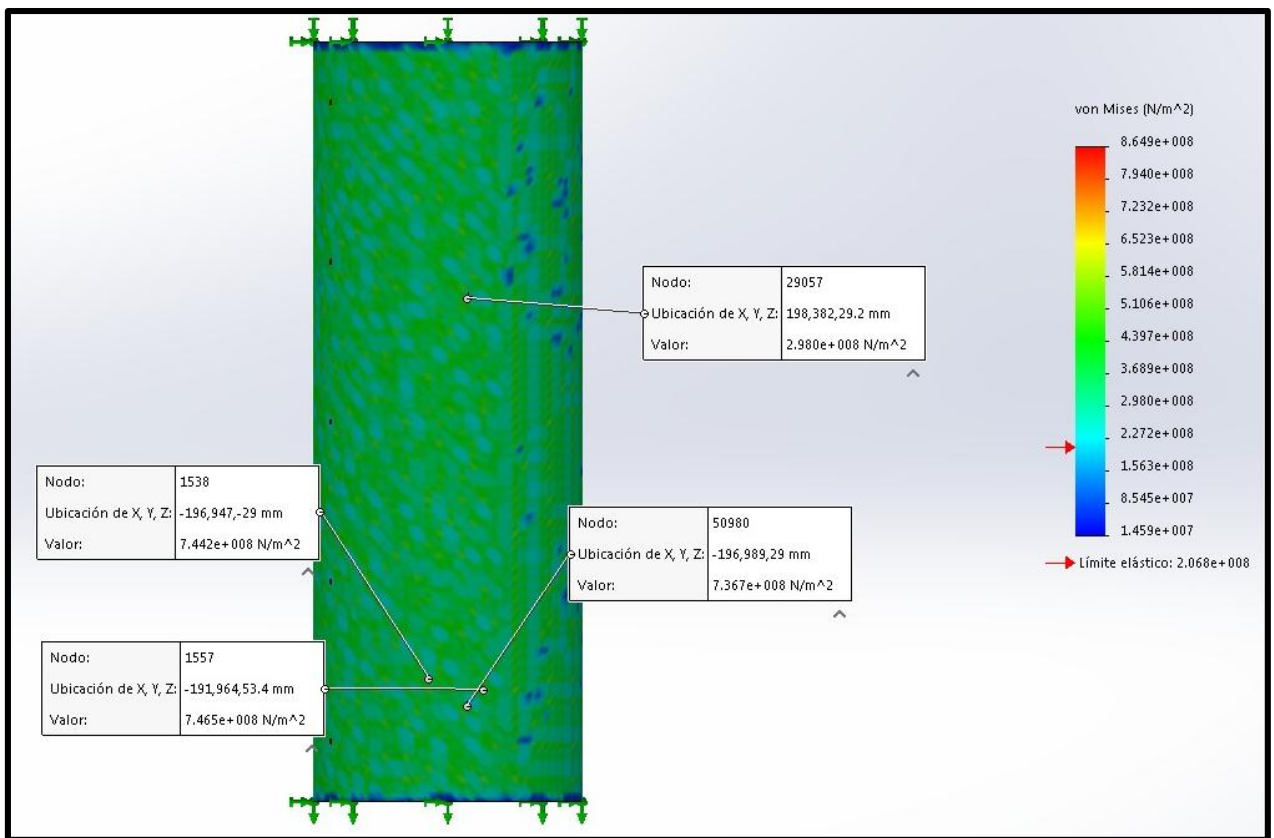


Figura 33 Esfuerzo de Von Mises Espesor 1.5mm  
Fuente: El Autor

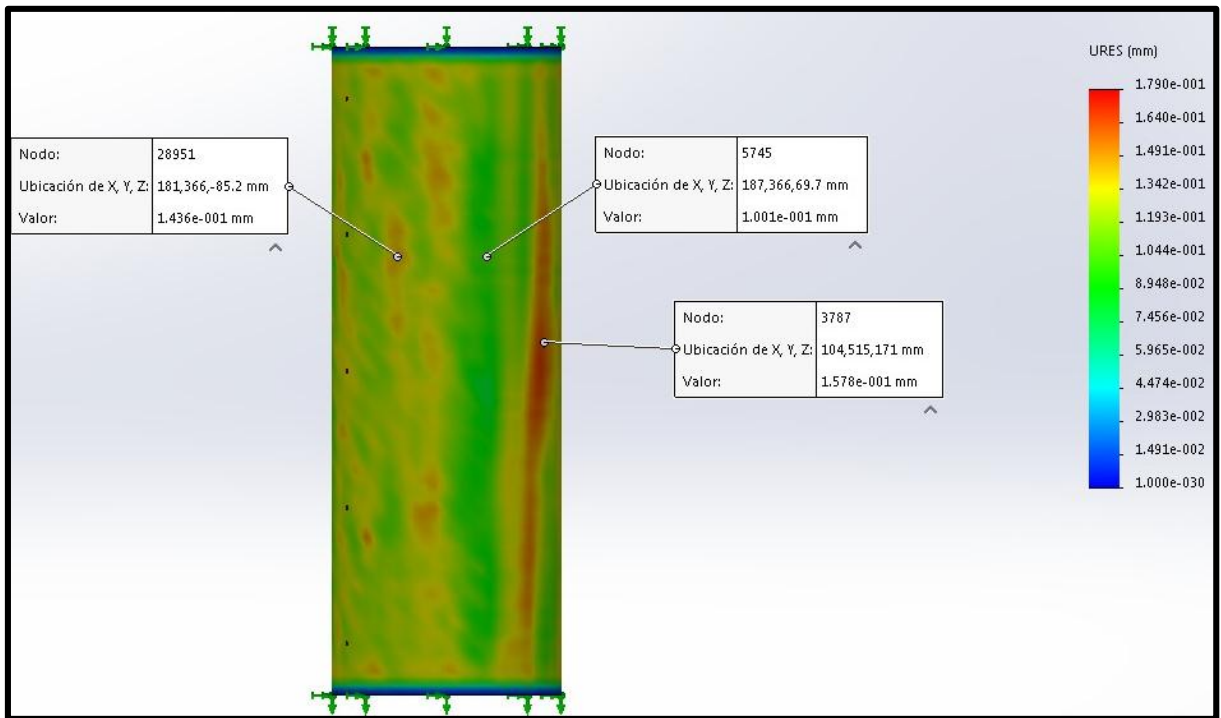


Figura 34 Desplazamiento. Espesor 1.5mm  
Fuente: El Autor

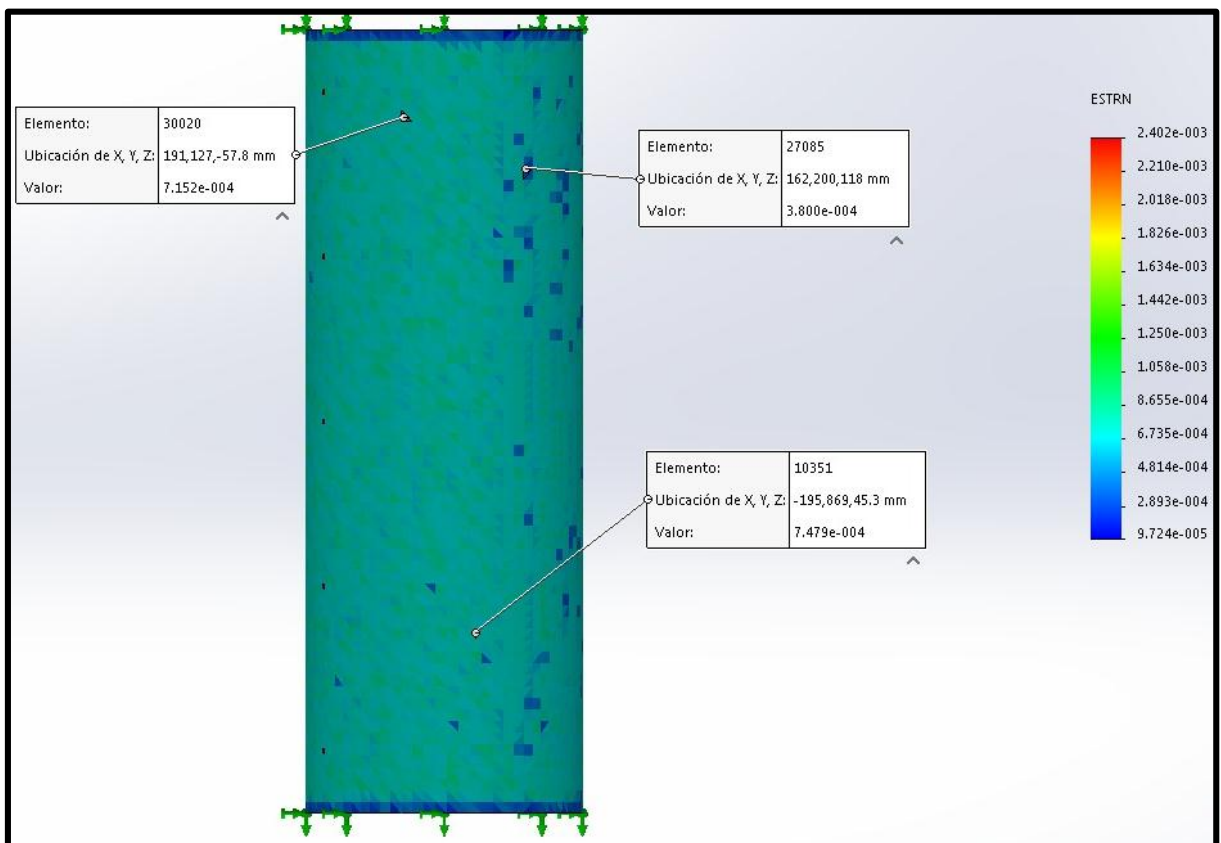


Figura 35 Deformación Unitaria. Espesor 1.5mm  
Fuente: El Autor

## ANEXO 9: Simulación de esfuerzo estático y térmico de columna de fluidización. Espesor 2mm.

Para realizar la simulación se consideró la presión del lecho 1730.67 Pa. La temperatura máxima de tueste varía entre 200-230°C, la simulación se realizó para el caso extremo con temperatura 230°C.

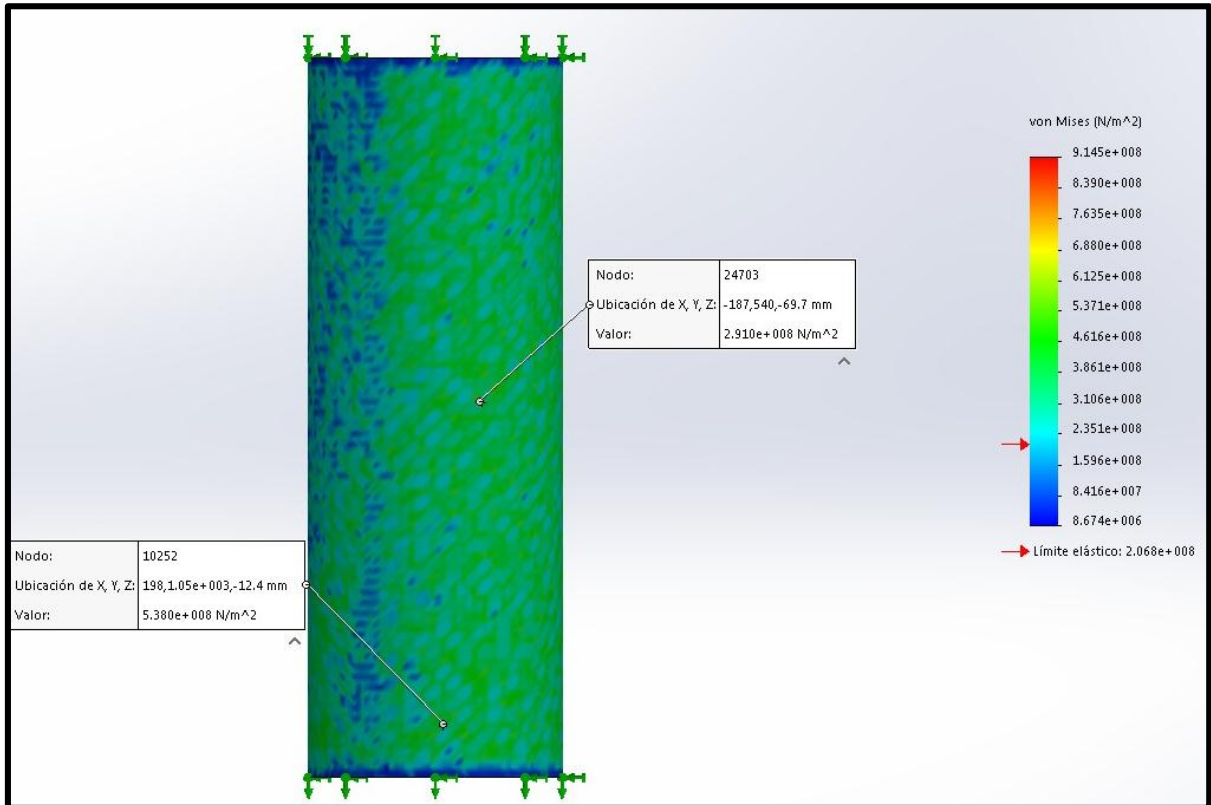


Figura 36 Esfuerzo de Von Mises. Espesor 2mm  
Fuente: El Autor



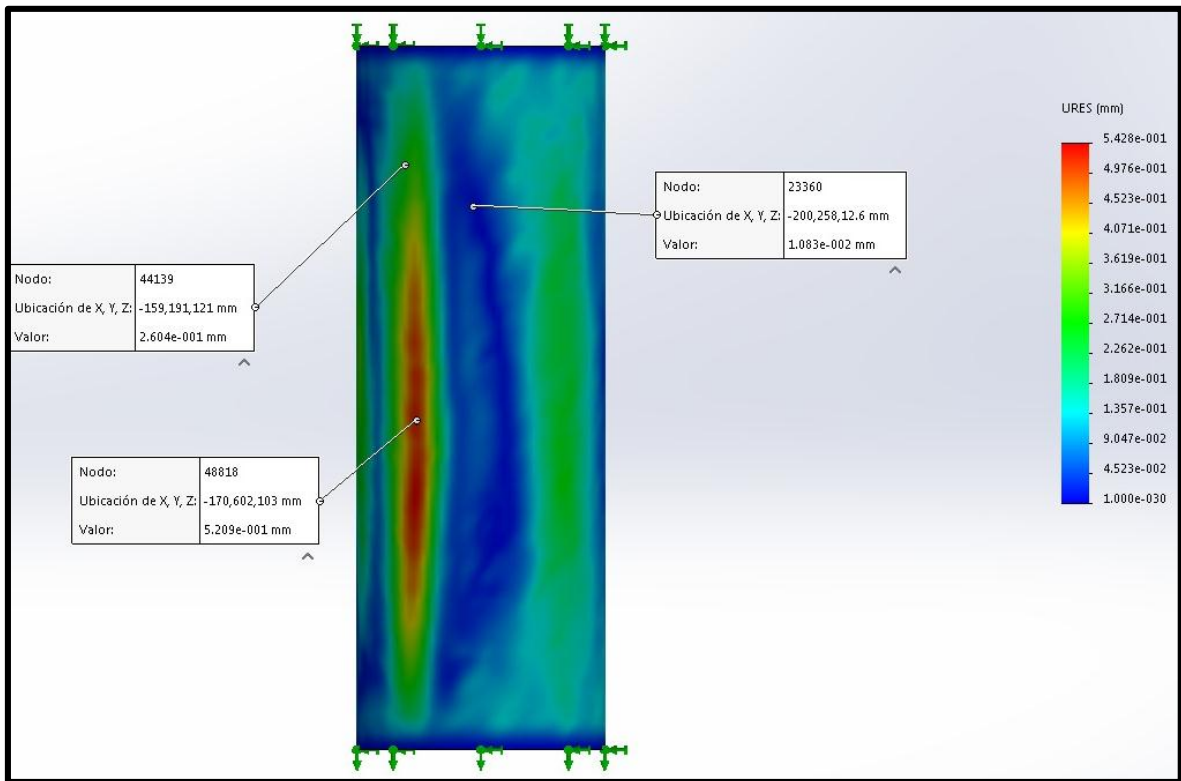


Figura 37 Desplazamiento. Espesor 2mm  
Fuente: El Autor

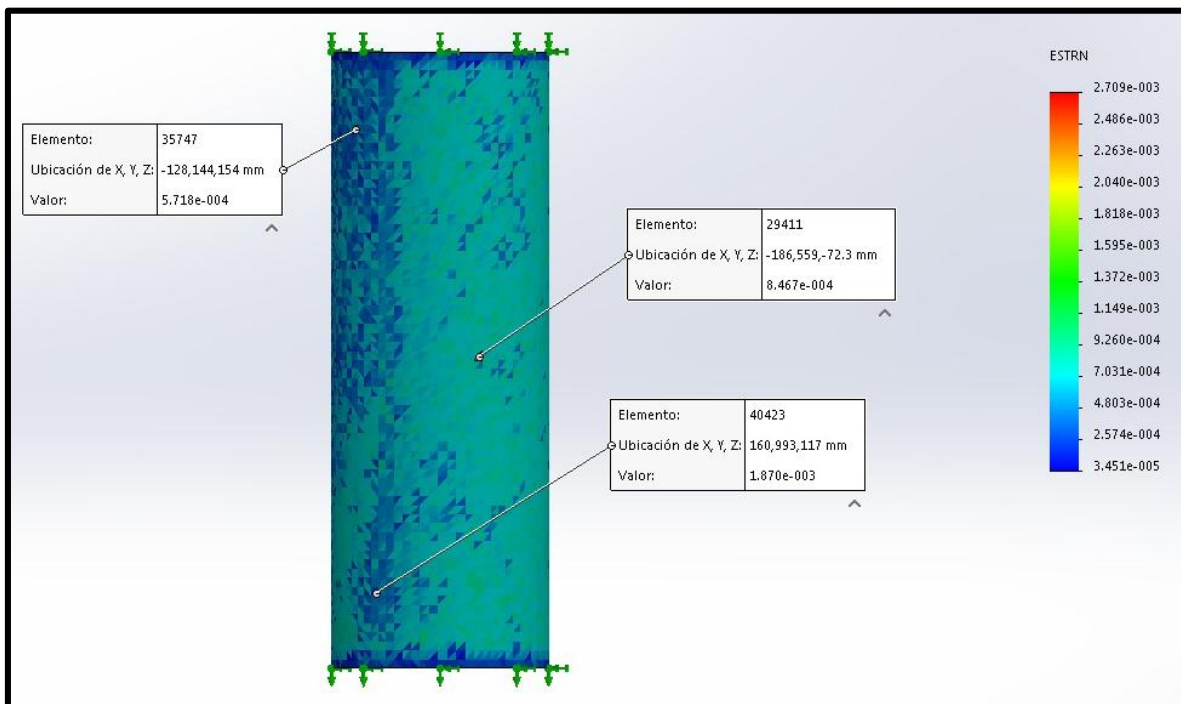


Figura 38 Deformación Unitaria. Espesor 2mm  
Fuente: El Autor

## ANEXO 10: Propiedades Físicas y Mecánicas del Acero Inoxidable

Tabla 13 Propiedades Físicas y Mecánicas del Acero Inoxidable

TIPO DE ACERO		301	302	303 MX	303 Se	304	304L	305	308	309	309S	310	310S	316	316L	317	317L	321	347	348		
ANÁLISIS - % VALOR QUÍMICO MÁXIMO EXCEPTO DONDE MUESTRA EL MÍNIMO	Cromo	16-18	17-19	17-19	17-19	18-20	18-20	17-19	19-21	22-24	22-24	24-26	24-26	16-18	16-18	18-20	18-20	17-19	17-19	17-19		
	Níquel	6-8	8-10	8-10	8-10	8-10.5	8-10	10.5-13	10-12	12-15	12-15	19-22	19-22	10-14	10-14	11-15	11-15	9-12	9-13	9-13		
	Carbono	.15	.15	.15	.15	.08	.03	.12	.08	.20	.08	.25	.08	.08	.08	.03	.08	.03	.08	.08	.08	
	Manganeso	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	
	Silicio	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.5	1.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	
	Fósforo	.045	.045	.20	.20	.045	.045	.045	.045	.045	.045	.045	.045	.045	.045	.045	.045	.045	.045	.045	.045	.045
	Azufre	.030	.030	.15 Min	.060	.030	.030	.030	.030	.030	.030	.030	.030	.030	.030	.030	.030	.030	.030	.030	.030	.030
	Otros	--	--	--	.15 Min Se	--	--	--	--	--	--	--	--	--	Mo 2-3	Mo 2-3	Mo 3-4	Mo 3-4	Ti 5XC Min	Cb+Ta 10XC Min	Ta+Cb 10XC Min	Co .20 Max
PROPIEDADES MECÁNICAS (TEMPLADO):	Esfuerzo de fluencia psi (0,2% Compensación)	40.000	40.000	35.000	35.000	35.000	33.000	38.000	35.000	45.000	45.000	45.000	45.000	42.000	39.000	40.000	40.000	35.000	40.000	40.000		
	Esfuerzo último psi	110.000	90.000	90.000	90.000	84.000	81.000	81.000	85.000	95.000	95.000	95.000	95.000	84.000	81.000	90.000	90.000	90.000	95.000	95.000		
	Elongación % en 2" (100mm)	60	50	50	50	55	55	55	50	45	45	45	45	50	50	45	45	45	45	45	45	
	Dureza: Brinell BHN	170	163	160	160	149	149	149	150	170	170	170	170	149	149	163	163	160	160	160		
	Rockwell B	85	85	84	84	80	80	80	80	85	85	85	85	80	80	85	85	84	85	85		
	Impacto Izod. Ft. - lbs	110	110	80	80	110	110	110	110	110	110	110	90	90	110	110	110	110	110	110		
PROPIEDAD ELECTRICAS	Creep - 1% flujo en 10.000 hrs	18.000	17.000	--	--	17.300	17.300	17.200	17.000	15.900	15.900	17.500	17.500	24.500	24.500	24.000	24.000	18.000	19.300	19.300		
	Módulo elasticidad en tensión psi x 10 <sup>6</sup>	28	28	28	28	28	28	28	28	29	29	29	29	28	28	28	28	28	28	28		
RESISTENCIA TERMICA	Resistividad eléctrica en microhm a 68 ° F	72	72	72	72	72	72	72	72	78	78	78	78	74	74	74	74	72	73	73		
	Permeabilidad magnética a 200H	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.01	1.02	1.02	1.02	1.01	1.01	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02		
EXPANSION TERMICA	Max. temperatura de operac. - servicio intermitente* F	1500	1500	1400	1400	1600	1600	1500	1700	1850	1850	1900	1900	1600	1600	1600	1600	1600	1550	1550	1550	
	Servicio continuo* F	1650	1650	1650	1650	1700	1700	1650	1800	1950	1950	2050	2050	1700	1700	1700	1700	1650	1650	1650		
CONDUCTIVIDAD TERMICA	(ln./ln.°F x 10 ) 32 - 212 °F	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	8.3	8.3	8.0	8.0	8.9	8.9	8.9	8.9	9.3	9.3	9.3		
	32 - 1200 ° F	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4	10.0	10.0	9.7	9.7	10.1	10.1	10.3	10.3	10.7	10.6	10.6		
CONDUCTIVIDAD TERMICA	(B.T.U./Ft. /Hr.° F/ft.) y 212 °F	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	8.8	8.0	8.0	8.0	8.0	9.4	9.4	9.4	9.4	9.3	9.3	9.3		
	932 ° F	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4	12.5	10.8	10.8	10.8	10.8	12.4	12.4	12.4	12.4	12.8	12.8	12.8		

Fuente: (Wesco, 2017)

ANEXO 12: Presión Dinámica

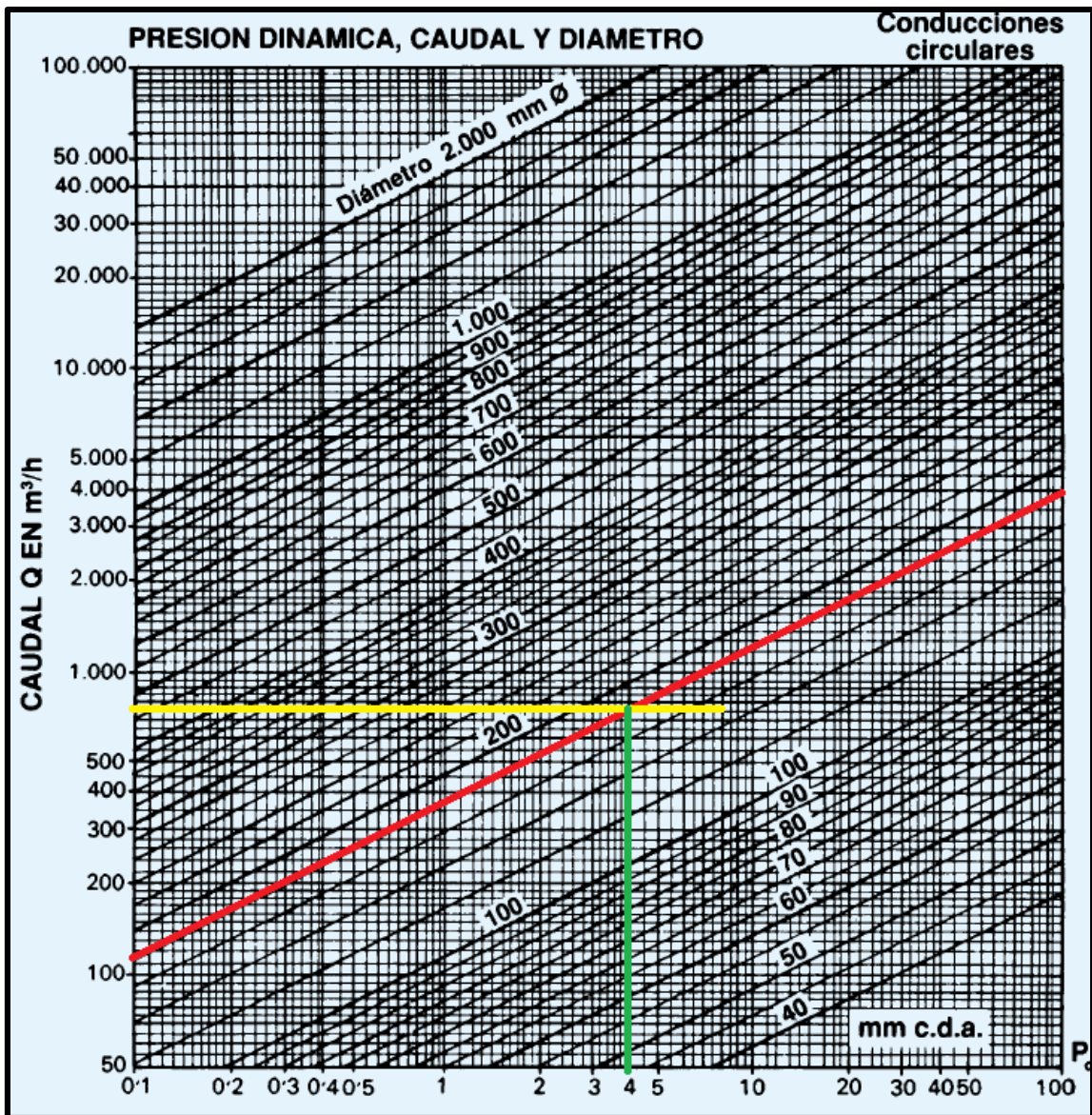


Figura 39 Presión dinámica en el ducto de aire  
Fuente: El Autor



**ANEXO 13: Selección del ventilador**

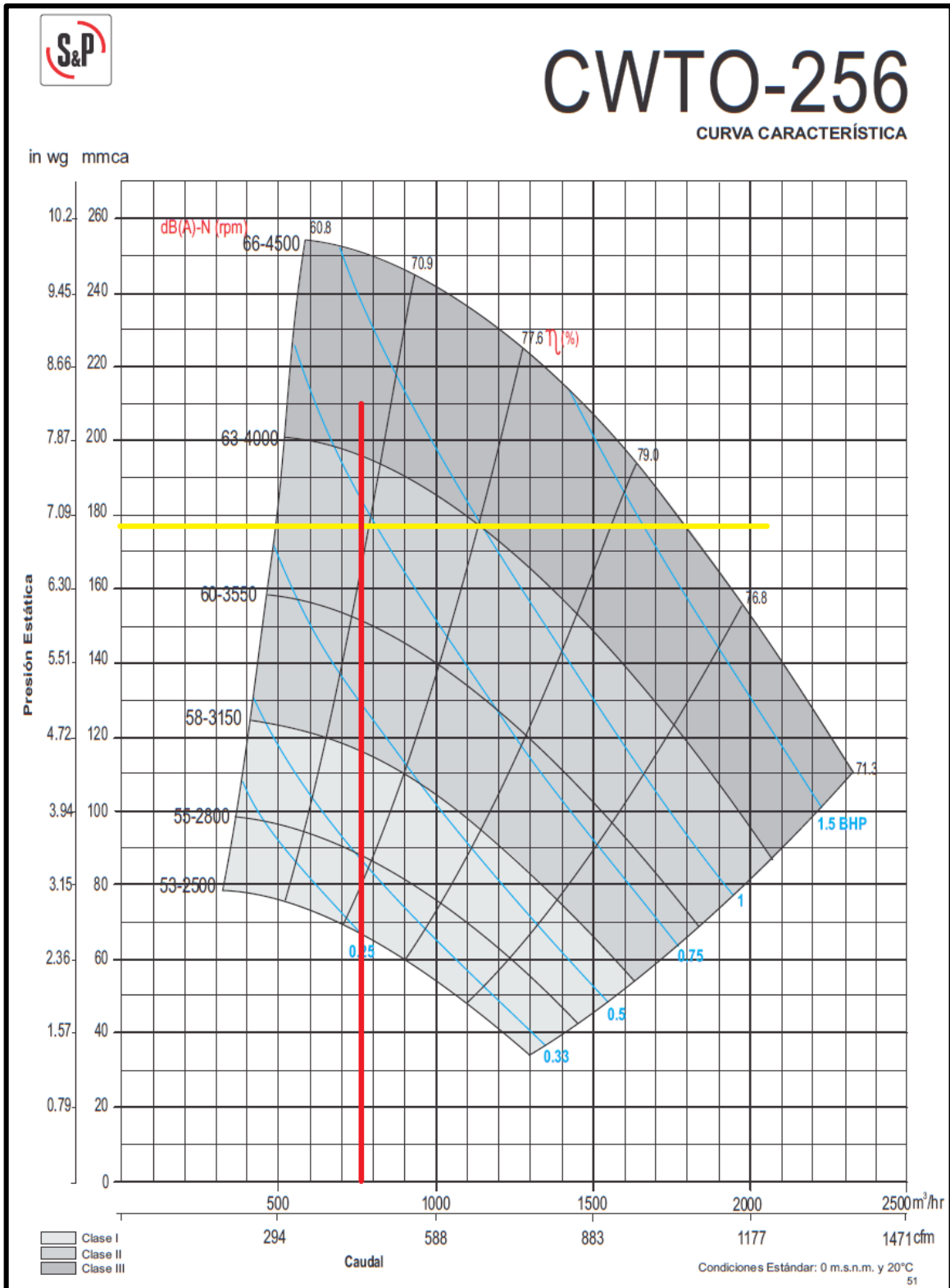


Figura 40 Selección de ventilador

Fuente: El Autor

# ANEXO 14: Dimensiones del ventilador

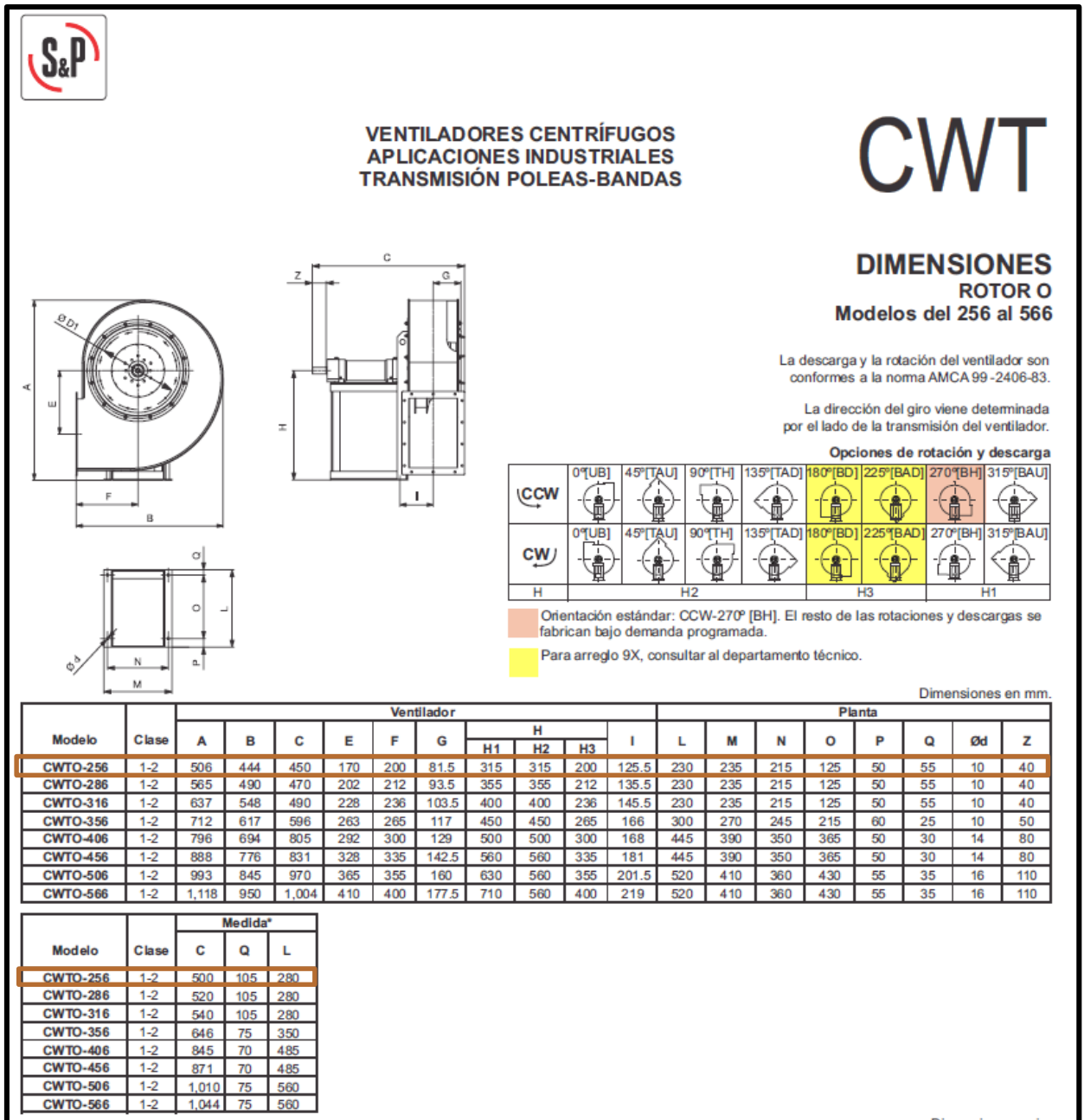


Figura 41 Dimensiones Ventiladores CWTO Rotor O  
Fuente: (Soler & Palau, 2012)

## ANEXO 15: Dimensiones del ducto de descarga del ventilador

Tabla 14 Dimensiones de aspiración y descarga del ventilador

VENTILADORES CENTRÍFUGOS  
APLICACIONES INDUSTRIALES

CW

### ACCESORIOS DE MONTAJE

Ventilador		Accesorios	
		Aspiración	Descarga
Serie	Tamaño	MPS / BDD / BAS / CFS / SAS = Ø	AR-C / BAD / CFD / SAD = mm
CWTE	406	Ø 250	250 x 180
CWTE	456	Ø 280	280 x 200
CWTE	506	Ø 315	315 x 224
CWTE	566	Ø 355	355 x 250
CWTE	636	Ø 400	400 x 280
CWTE	716	Ø 450	450 x 315
CWTE	806	Ø 500	500 x 355
CWTE	906	Ø 560	560 x 400
CWTE	1006	Ø 630	630 x 450
CWTE	1126	Ø 710	710 x 500
CWTE	1256	Ø 800	800 x 560
CWTE	1406	Ø 900	900 x 630
CWTE	1606	Ø 1000	1000 x 710
CWTO	256	Ø 200	200 x 140
CWTO	286	Ø 225	224 x 160
CWTO	316	Ø 250	250 x 180

Fuente: (Soler & Palau, 2012)

ANEXO 16: Dimensiones de acople rectangular-circular

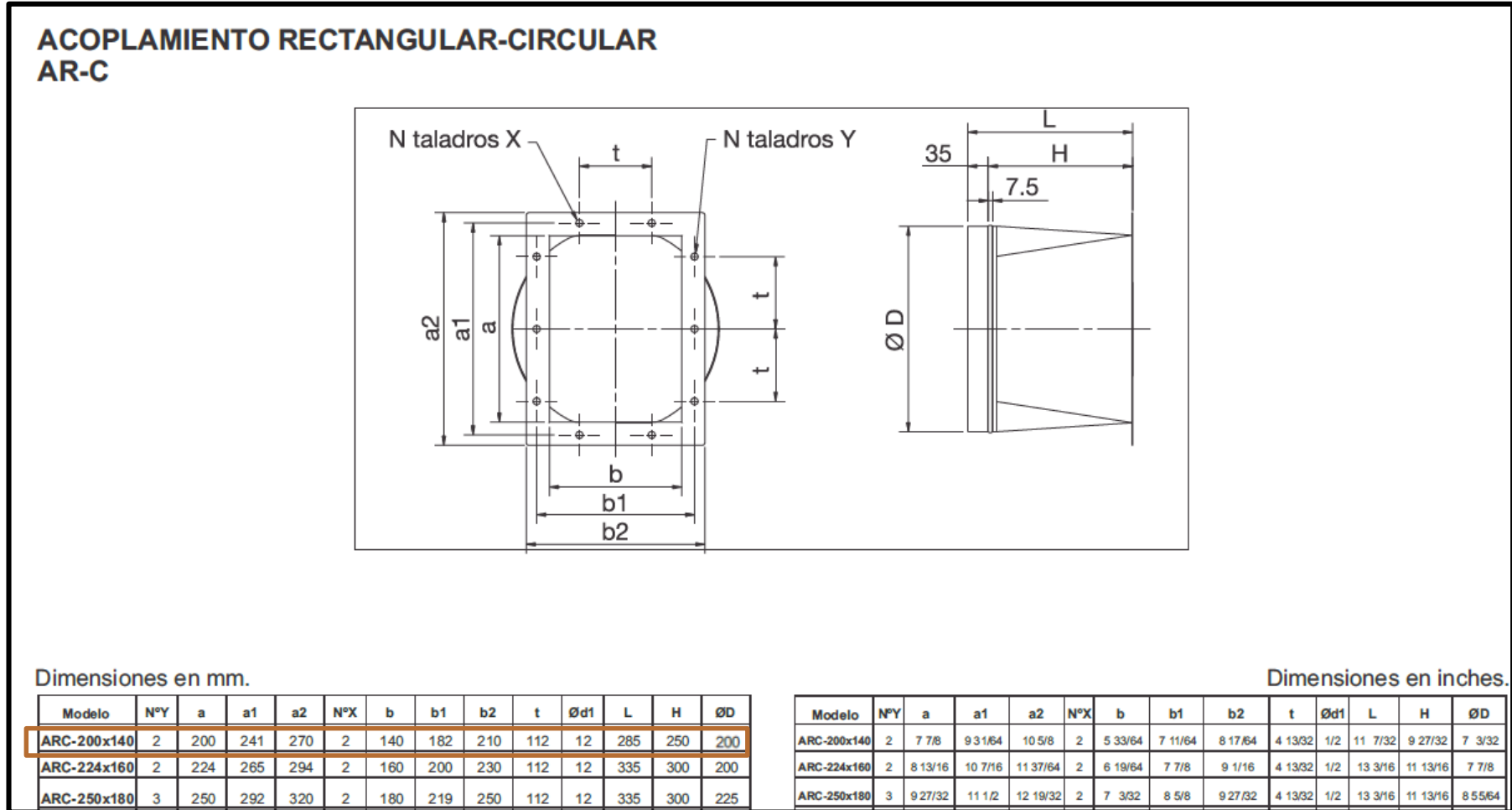


Figura 42 Dimensiones de acople rectangular-circular  
Fuente: (Soler & Palau, 2012)

## ANEXO 17: Humedad relativa en la ciudad de Loja

Tabla 15 Humedad Relativa de la ciudad de Loja

M0033		LA ARGELIA-LOJA											INAMHI						
MES	HELIOFANIA (Horas)	TEMPERATURA DEL AIRE A LA SOMBRA (°C)						HUMEDAD RELATIVA (%)				PUNTO DE ROCIO (°C)	TENSION DE VAPOR (hPa)	PRECIPITACION(mm)			Número de días con precipitación		
		ABSOLUTAS		M E D I A S		Mensual	Máxima día	Mínima día	Media	Máxima día	Mínima día			Suma Mensual	Máxima en 24hrs	día			
ENERO	133.6	24.4	18		21.8							11.8	16.1				98	1	36
FEBRERO	103.8	25.8	5	10.2	19	22.0	12.3	16.3	98	10	39	20	80	12.4	14.4	205.3	28.6	7	21
MARZO	141.2			7.0	16	22.5	11.8	16.4	96	15	44	5	78	12.0	14.1	131.4	29.7	20	20
ABRIL	118.9	25.0	11	10.2	19	22.4	12.3	16.6	98	14	46	11	79	12.6	14.6	154.5	23.2	14	26
MAYO	126.8			4.8	19	21.1	11.8	15.9	100	28	32	19	76	11.4	13.6	87.1	25.5	26	22
JUNIO	135.3	31.6	5	8.6	1	21.5	12.2	16.1	96	1	47	29	77	11.8	13.9	56.1	11.0	3	21
JULIO	101.0					19.2	12.1	15.2	96	3	47	29	77	11.0	13.2	101.0	21.6	11	24
AGOSTO	178.6	24.2	19	8.6	19	20.6	12.6	16.2	95	19	38	13	69	10.4	12.7	54.7	10.8	1	15
SEPTIEMBRE	123.6	25.2	23			20.5	12.7	16.1	99	18	47	8	74	11.1	13.3	89.8	28.9	1	18
OCTUBRE	170.3	25.7	11	4.7	21	22.9	10.7	16.4					73	10.8	13.2	80.9	30.2	3	14
NOVIEMBRE	135.9	26.0	26	4.1	21	23.1	11.2	16.5	96	21	29	21	76	11.5	13.7	155.9	35.7	12	15
DICIEMBRE	106.0	25.0	11	10.8	3	21.6	12.8	16.4	99	22	43	2	79	12.4	14.4	163.7	26.7	19	26
VALOR ANUAL	1575.0					21.6	12.0	16.2					76	11.6	13.7	1338.6	35.7		

Fuente: (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, 2014)

## ANEXO 18: Calor específico del aire

Tabla 16 Calor específico de varios materiales

Material	J/(kg·K)	Material	J/(kg·K)
Aceite vegetal	2000	Hielo (-10 °C a 0 °C)	2093
Agua (0 °C a 100 °C)	4186	Hierro/Acero	452
Aire	1012	Hormigón	880
Alcohol etílico	2460	Latón	380
Alcohol metílico	2549	Litio	3560
Aluminio	897	Madera	420
Amoniaco (líquido)	4700	Magnesio	1023
Arena	290	Mármol	858
Asfalto	920	Mercurio	138
Azufre	730	Metano (275 K)	2191
Benceno	1750	Níquel	440
Calcio	650	Nitrógeno	1040
Cinc	390	Oro	129
Cobre	387	Oxígeno	918
Diamante	509	Plata	236
Dióxido de carbono (gas)	839	Plomo	128
Estaño	210	Potasio	750
Etilen glicol	2200	Sodio	1230
Gasolina	2220	Tejido humano	3500
Grafito	710	Tierra (típica)	1046
Granito	790	Vapor de agua (100 °C)	2009
Helio (gas)	5300	Vidrio (típico)	837
Hidrógeno (gas)	14267		

Fuente: (UTN-FRBA, 2010)

## ANEXO 19: Quemador de GLP

Tabla 17 Modelos, potencias y medidas de Quemadores COFACO

Tabla de modelos, potencias y medidas

Modelos	Potencias (*) [Kcal/hora]		Dimensiones [mm.]									
	G.L.P.	G.N.	ØC [BSP]	E	H	LA	LD	MA	MD	T	X	ØT
QTU25 aaaaaP a Bd13 / V000 a-aaaa	10.000	22.000	13	49	47	252	248	277	272	367	392	34
QTU25 aaaaaP a Bd13 / VM00 a-aaaa	10.000	22.000	13	49	47	252	248	277	272	489	514	34
QTU25 aaaaaP a Bd13 / V00S a-aaaa	10.000	22.000	13	49	47	252	248	277	272	489	514	34
QTU25 aaaaaP a Bd13 / VM0S a-aaaa	10.000	22.000	13	49	47	252	248	277	272	591	616	34
QTU25 aaaaaP a Bd13 / TM00 a-aaaa	10.000	22.000	13	49	47	252	248	277	272	447	472	34
QTU25 aaaaaP a Bd13 / TM0S a-aaaa	10.000	22.000	13	49	47	252	248	277	272	549	574	34
QTU32 aaaaaP a Bd13 / V000 a-aaaa	20.000	45.000	13	65	51	291	309	316	333	367	392	42
QTU32 aaaaaP a Bd13 / VM00 a-aaaa	20.000	45.000	13	65	51	291	309	316	333	489	514	42
QTU32 aaaaaP a Bd13 / V00S a-aaaa	20.000	45.000	13	65	51	291	309	316	333	591	616	42
QTU32 aaaaaP a Bd13 / VM0S a-aaaa	20.000	45.000	13	65	51	291	309	316	333	447	472	42
QTU32 aaaaaP a Bd13 / TM00 a-aaaa	20.000	45.000	13	65	51	291	309	316	333	549	574	42
QTU32 aaaaaP a Bd13 / TM0S a-aaaa	20.000	45.000	13	65	51	291	309	316	333	447	472	42
QTU38 aaaaaP a Bd13 / V000 a-aaaa	26.000	58.000	13	67	55	341	341	366	365	367	392	49
QTU38 aaaaaP a Bd13 / VM00 a-aaaa	26.000	58.000	13	67	55	341	341	366	365	489	514	49
QTU38 aaaaaP a Bd13 / V00S a-aaaa	26.000	58.000	13	67	55	341	341	366	365	489	514	49
QTU38 aaaaaP a Bd13 / VM0S a-aaaa	26.000	58.000	13	67	55	341	341	366	365	591	616	49
QTU38 aaaaaP a Bd13 / TM00 a-aaaa	26.000	58.000	13	67	55	341	341	366	365	447	472	49
QTU38 aaaaaP a Bd13 / TM0S a-aaaa	26.000	58.000	13	67	55	341	341	366	365	549	574	49
QTU51 aaaaaP a Bd19 / V000 a-aaaa	35.000	80.000	19	75	60	380	412	416	447	377	407	60
QTU51 aaaaaP a Bd19 / VM00 a-aaaa	35.000	80.000	19	75	60	380	412	416	447	503	533	60
QTU51 aaaaaP a Bd19 / V00S a-aaaa	35.000	80.000	19	75	60	380	412	416	447	503	533	60
QTU51 aaaaaP a Bd19 / VM0S a-aaaa	35.000	80.000	19	75	60	380	412	416	447	609	639	60
QTU51 aaaaaP a Bd19 / TM00 a-aaaa	35.000	80.000	19	75	60	380	412	416	447	456	486	60
QTU51 aaaaaP a Bd19 / TM0S a-aaaa	35.000	80.000	19	75	60	380	412	416	447	562	592	60
QTU63 aaaaaP a Bd25 / TM00 a-aaaa	70.000	150.000	25	102	65	515	570	564	615	494	529	70
QTU63 aaaaaP a Bd25 / TM0S a-aaaa	70.000	150.000	25	102	65	515	570	564	615	628	663	70

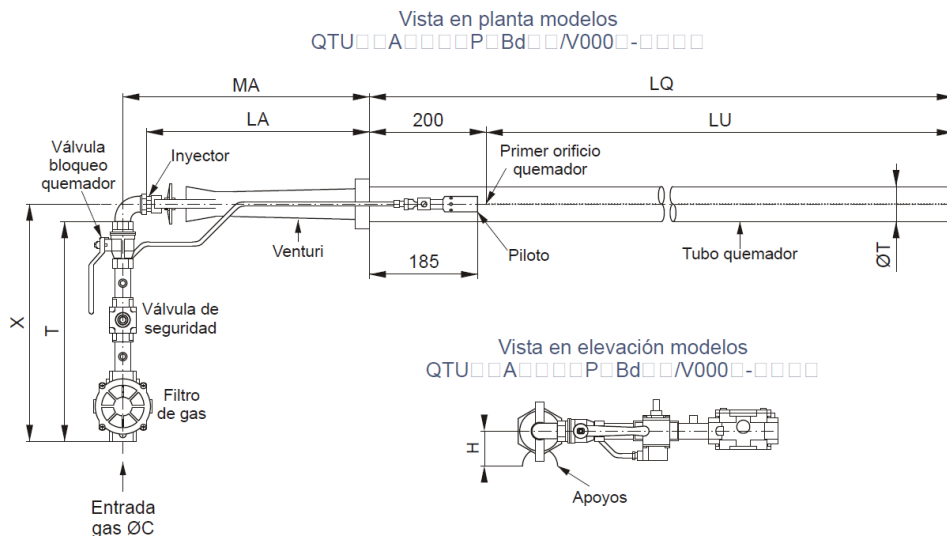
Baja presión: 200 mm.c.a en gas natural ó 280 mm.c.a en gas envasado.

Media presión: 1600 mm.c.a en gas natural y envasado.

LU: Largo de llama útil

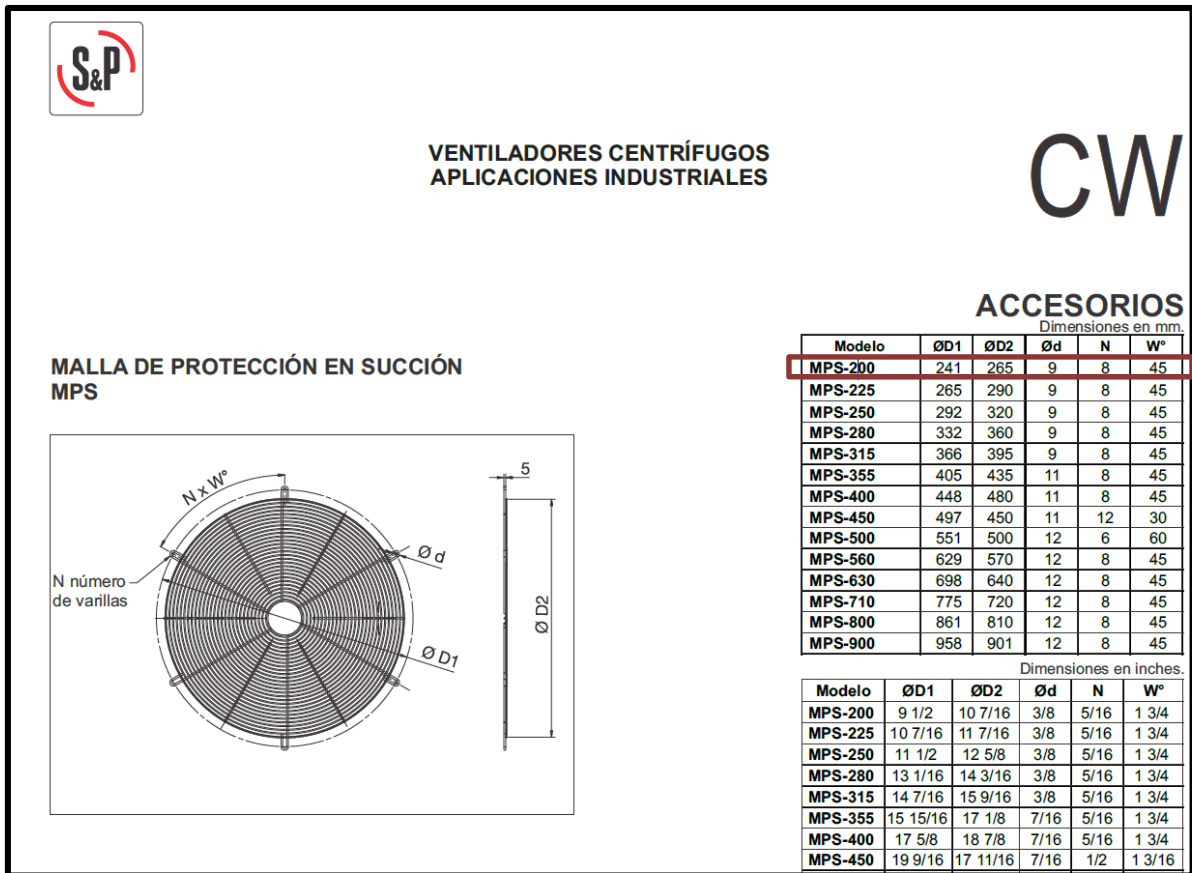
LQ: Largo del tubo del quemador (máximo: 6385 mm)

(\*) Las potencias indicadas corresponden a las máximas alcanzadas por cada modelo



Fuente: (COFACO®™, 2017)

## ANEXO 20: Malla de protección en succión



**MALLA DE PROTECCIÓN EN SUCCIÓN  
MPS**



Figura 43 Selección de malla de protección en succión  
Fuente: (Soler & Palau, 2012)



## ANEXO 21: Brida de Succión

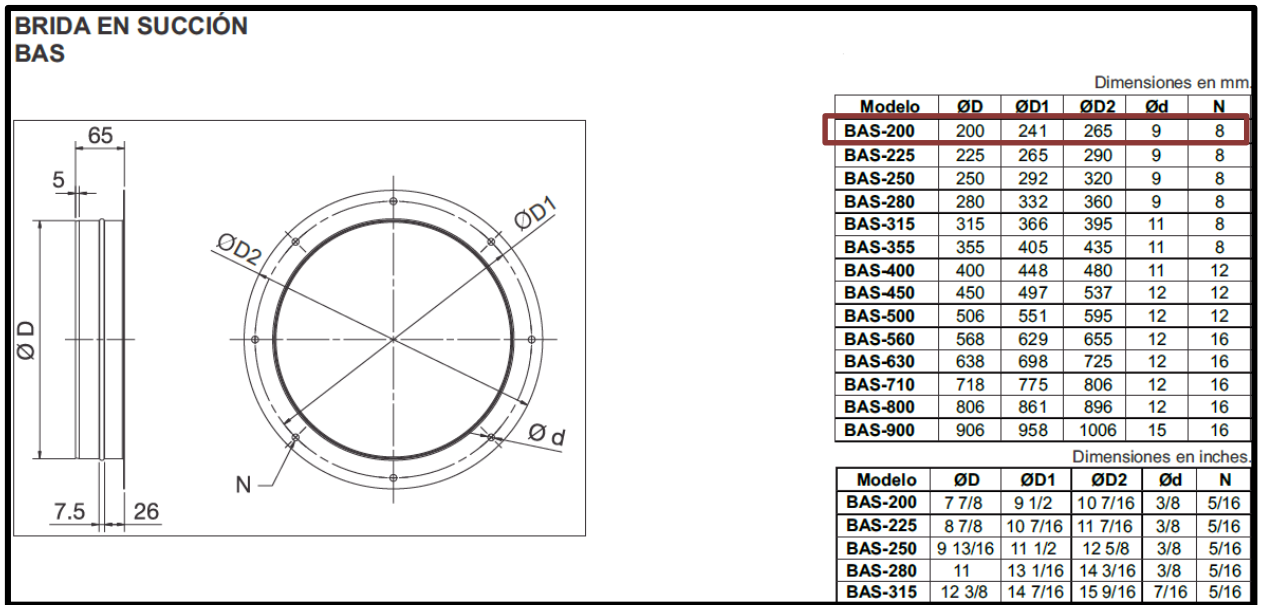


Figura 44 Selección de brida de succión  
Fuente: (Soler & Palau, 2012)

## ANEXO 22: Aislamiento Térmico

Tabla 18 Aislamiento para Tubерías calientes

TEMP. OPERACION		HASTA 65°C (150°F)						HASTA 121°C (250°F)						HASTA 177°C (350°F)						HASTA 232°C (450°F)					
DIAMETRO NOMINAL DEL TUBO		E.S.		P.C.		T.S.		E.S.		P.C.		T.S.		E.S.		P.C.		T.S.		E.S.		P.C.		T.S.	
pulg.	mm	pulg.	mm	Вт/м.к	W/m	°C	°F	pulg.	mm	Вт/м.к	W/m	°C	°F	pulg.	mm	Вт/м.к	W/m	°C	°F	pulg.	mm	Вт/м.к	W/m	°C	°F
1/2	12.7	1	25.4	7.44	7.15	28.7	83.6	1	25.4	20.0	19.23	33.8	92.9	1	25.4	36.2	34.80	40	104.0	1 1/2	38.0	45.9	44.13	38.9	102.0
3/4	19.1	1	25.4	8.95	8.60	29.4	84.9	1	25.4	24.2	23.27	35.4	95.8	1	25.4	43.7	42.01	42.2	108.0	1 1/2	38.0	53.3	51.24	41.1	106.0
1	25.4	1	25.4	9.28	8.92	28.8	83.9	1	25.4	25.0	24.03	34.2	93.5	1 1/2	38.0	45.2	43.45	40.6	105.0	2	50.8	49.7	47.78	36.4	97.5
1 1/2	38.0	1	25.4	12.1	11.63	29.3	84.8	1	25.4	32.5	31.24	35.3	95.6	1 1/2	38.0	46.5	44.70	36.8	98.2	2	50.8	57.6	55.37	36.2	97.2
2	51.0	1	25.4	14.1	13.56	29.5	85.1	1	25.4	38.2	36.72	35.8	96.5	1 1/2	38.0	53.0	50.95	37.1	98.7	2	50.8	70.2	67.49	38.3	101.0
3	76.0	1	25.4	19.1	18.36	29.9	85.9	1	25.4	51.6	49.61	36.8	98.2	1 1/2	38.0	70.3	67.58	38.3	101.0	2	50.8	91.6	88.06	40.0	104.0
4	102.0	1	25.4	22.9	22.02	30.3	86.5	1	25.4	62.1	59.70	37.0	98.6	2	50.8	69.7	67.01	35.7	96.2	2	50.8	109.3	105.08	40.5	105.0
6	152.0	1	25.4	33.9	32.59	30.6	87.1	1 1/2	38.0	66.6	64.03	34.3	93.8	2	50.8	94.4	90.75	36.6	97.8	2	50.8	148.0	142.28	42.2	108.0
8	203.0	1	25.4	42.3	40.67	30.7	87.3	1 1/2	38.0	80.4	77.29	34.3	93.8	2	50.8	116.0	111.52	37	98.6	2 1/2	63.5	149.0	143.24	38.9	102.0
10	254.0	1	25.4	54.6	52.49	31.2	88.2	1 1/2	38.0	94.2	90.56	34.2	93.6	2	50.8	137.0	131.71	37.1	98.7	2 1/2	63.5	181.0	174.01	39.4	103.0
12	304.0	1 1/2	38.0	40.6	39.03	28.9	84.0	1 1/2	38.0	109.0	104.79	34.4	93.9	2	50.8	158.0	151.90	37.3	99.1	2 1/2	63.5	208.0	199.96	40.0	104.0
14	356.0	1 1/2	38.0	46.8	44.99	29.2	84.6	2	50.8	99.0	95.18	32.8	91.0	2 1/2	63.5	149.0	143.24	35.6	96.1	2 1/2	63.5	233.0	224.00	40.6	105.0
16	406.0	1 1/2	38.0	52.8	50.76	29.3	84.7	2	50.8	110.0	105.75	32.9	91.2	2 1/2	63.5	167.0	160.55	35.8	96.4	3	76.0	225.0	216.31	38.3	101.0
18	457.0	1 1/2	38.0	58.8	56.53	29.1	84.4	2	50.8	124.0	119.21	33.0	91.4	2 1/2	63.5	185.0	177.85	35.9	96.7	3	76.0	249.0	239.38	38.9	102.0
20	508.0	1 1/2	38.0	64.9	62.39	29.3	84.8	2	50.8	136.0	130.75	33.1	91.5	2 1/2	63.5	203.0	195.16	36.1	96.9	3	76.0	273.0	262.45	38.9	102.0
24	610.0	1 1/2	38.0	76.9	73.93	29.4	84.9	2	50.8	161.0	154.78	33.2	91.7	2 1/2	63.5	239.0	229.77	36.2	97.2	3	76.0	320.0	307.64	38.9	102.0
26	660.0	1 1/2	38.0	81.0	77.87	29.3	84.8	2	50.8	170.4	163.82	33.1	91.5	2 1/2	63.5	254.7	244.86	36.2	97.1	3	76.0	340.0	326.87	38.9	102.0
28	711.0	1 1/2	38.0	86.9	83.54	29.3	84.8	2	50.8	182.5	175.45	33.1	91.6	2 1/2	63.5	271.5	261.01	36.2	97.2	3	76.0	364.0	349.94	38.9	102.0
30	762.0	2	50.8	73.6	70.76	28.4	83.2	2 1/2	63.5	163.0	156.70	31.8	89.2	3	76.0	250.0	240.34	34.7	94.4	3 1/2	89.0	342.0	328.79	37.4	99.4

TEMP. OPERACION		HASTA 287°C (550°F)						HASTA 343°C (650°F)						HASTA 399°C (750°F)						HASTA 454°C (850°F)					
DIAMETRO NOMINAL DEL TUBO		E.S.		P.C.		T.S.		E.S.		P.C.		T.S.		E.S.		P.C.		T.S.		E.S.		P.C.		T.S.	
pulg.	mm	pulg.	mm	Вт/м.к	W/m	°C	°F	pulg.	mm	Вт/м.к	W/m	°C	°F	pulg.	mm	Вт/м.к	W/m	°C	°F	pulg.	mm	Вт/м.к	W/m	°C	°F
1/2	12.7	2	50.8	67.0	64.41	44.4	112.0	2	50.8	82.2	79.02	44.4	112.0	2	50.8	110.0	105.75	50	122.0	2 1/2	63.5	126.0	121.13	47.2	117.0
3/4	19.1	2	50.8	77.7	74.70	47.2	117.0	2	50.8	93.6	89.98	46.7	116.0	2	50.8	126.0	121.13	52.8	127.0	2 1/2	63.5	140.0	134.59	49.4	121.0
1	25.4	2	50.8	72.5	69.70	44.1	106.0	2	50.8	100.7	96.81	46.1	115.0	2 1/2	63.5	122.0	117.29	46.7	116.0	3	76.0	147.0	141.32	47.8	118.0
1 1/2	38.0	2	50.8	83.9	80.66	40.6	105.0	2	50.8	116.6	112.10	45.6	114.0	2 1/2	63.5	142.0	136.51	46.7	116.0	3	76.0	171.0	164.39	48.3	119.0
2	51.0	2	50.8	102.0	98.06	43.3	110.0	2 1/2	63.5	142.1	136.61	49.4	121.0	2 1/2	63.5	169.0	162.47	50.6	123.0	3	76.0	201.0	193.23	51.7	125.0
3	76.0	2	50.8	134.0	128.82	45.6	114.0	2 1/2	63.5	161.5	155.26	47.2	117.0	3	76.0	194.0	186.51	48.3	119.0	3 1/2	89.0	230.0	221.11	50.0	122.0
4	102.0	2	50.8	159.4	153.24	46.7	116.0	2 1/2	63.5	191.1	183.72	48.3	119.0	3	76.0	225.0	216.31	49.4	121.0	3 1/2	89.0	268.0	257.65	51.1	124.0
6	152.0	2 1/2	63.5	184.0	176.89	43.9	111.0	3	76.0	224.4	215.73	46.1	115.0	3	76.0	302.0	290.33	52.2	126.0	3 1/2	89.0	346.0	332.63	53.3	128.0
8	203.0	2 1/2	63.5	217.0	208.62	43.9	111.0	3	76.0	164.7	158.34	46.1	115.0	3 1/2	89.0	319.0	306.68	66.7	120.0	4	102.0	382.0	367.24	51.1	124.0
10	254.0	2 1/2	63.5	264.0	253.80	45.0	113.0	3	76.0	319.5	307.16	47.8	118.0	3 1/2	89.0	383.0	368.20	50	122.0	4	102.0	454.0	436.46	52.8	127.0
12	304.0	2 1/2	63.5	304.0	292.26	45.6	114.0	3	76.0	366.6	352.44	48.3	119.0	3 1/2	89.0	438.0	421.08	50.6	123.0	4	102.0	518.0	497.99	53.3	128.0
14	356.0	3	76.0	293.0	281.68	43.3	110.0	3	76.0	406.8	391.08	49.4	121.0	3 1/2	89.0	483.0	464.34	51.7	125.0	4	102.0	555.0	533.56	53.9	129.0
16	406.0	3	76.0	328.0	315.33	43.9	111.0	3 1/2	89.0	401.1	385.60	46.1	115.0	4	102.0	472.0	453.77	48.3	119.0	4 1/2	114.3	578.0	555.67	52.2	126.0
18	457.0	3	76.0	362.0	348.02	43.9	111.0	3 1/2	89.0	443.0	425.89	46.7	116.0	4	102.0	520.0	499.91	48.9	120.0	4 1/2	114.3	636.0	611.43	52.8	127.0
20	508.0	3 1/2	89.0	349.0	335.52	41.7	107.0	3 1/2	89.0	484.7	465.98	47.2	117.0	4	102.0	568.0	546.06	48.9	120.0	4 1/2	114.3	694.0	667.19	53.3	128.0
24	610.0	3 1/2	89.0	409.0	393.20	41.7	107.0	4	102.0	494.4	475.30	44.4	112.0	4	102.0	664.0	638.35	50.6	122.0	4 1/2	114.3	810.0	778.71	53.9	129.0
26	660.0	3 1/2	89.0	434.0	417.23	41.7	107.0	4	102.0	538.9	518.08	42.8	109.0	4	102.0	724.0	696.03	50.6	123.0	4 1/2	114.3	858.0	824.85	53.9	129.0
28	711.0	3 1/2	89.0	464.0	446.07	42.2	108.0	4	102.0	575.1	552.88	45.0	113.0	4	102.0	773.0	743.14	50.6	123.0	4 1/2	114.3	915.0	879.65	53.9	129.0
30	762.0	4	102.0	432.0	415.31	40.0	104.0	4 1/2	114.3	559.0	537.40	43.3	110.0	4 1/2	114.3	751.0	721.99	48.3	119.0	5	127.0	897.0	862.35	51.7	125.0

Fuente: (Fiberglas®, 2008)

## ANEXO 23: Selección de Junta

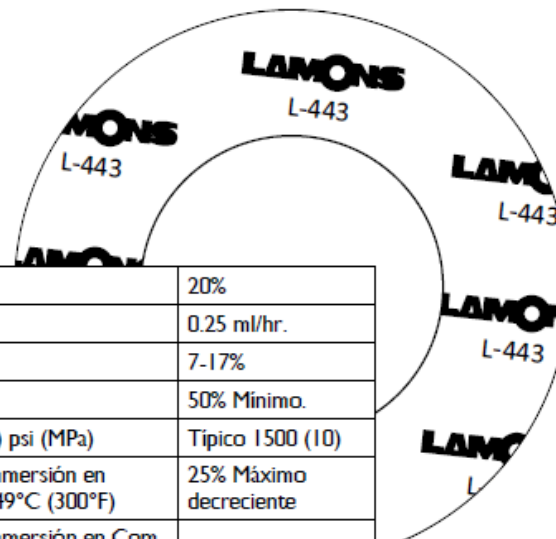
Tabla 19 Características de Junta L-443 marca LAMONS®

### L-443

Es un material de fibra comprimida con una estructura de refuerzo consistente en fibras de vidrio y aramida. Presenta una excelente resistencia al vapor de agua, debido a la adición de fibra de vidrio. Se utiliza el nitrilo como aglomerante para conseguir la resiliencia y la resistencia química adicional.

#### Aplicaciones y características:

- Se puede aplicar a una amplia variedad de medios, incluyendo vapor, productos químicos en general, petróleo y sus derivados.
- Posee excelente minimización a la fluencia y buenas propiedades mecánicas.



Deslizamiento de relajación	ASTM F-38B (1/32")	20%
Capacidad de sellado	ASTM F-37A (1/32")	0.25 ml/hr.
Compresibilidad	ASTM F-36j	7-17%
Recuperación	ASTM F-36j	50% Mínimo.
Resistencia a la tracción	ASTM F-152 (grano cruzado) psi (MPa)	Típico 1500 (10)
Cambio en la tracción	ASTM F-152 después de la inmersión en ASTM Aceite #3 @ 5 hrs./149°C (300°F)	25% Máximo decreciente
Aumento de peso	ASTM F-146 después de la inmersión en Combustible B @ 5 hrs./23°C (73°F)	15% Máximo
Aumento de espesor	ASTM F-146 después de la inmersión en	
	ASTM Aceite 1, 5 hrs./149°C (300°F)	0-5%
	ASTM Aceite 3, 5 hrs./149°C (300°F)	0-5%
	ASTM Combustible A, 5 hrs./23°C (73°F)	0-5%
	ASTM Combustible B, 5 hrs./23°C (73°F)	0-7%
Línea estándar	ASTM F-104	F712132B3E21M5
Cloruros solubles	Método FSA (Típico)	200 ppm
Densidad	1.6 g/cc (100 lbs/ft³)	
Color	Blanco / Verde	
Rango de temperatura	-40°C a 260°C (-78°F a 500°F)	

Fuente: (LAMONS ®, 2012)

**ANEXO 24: Diagrama de Control**

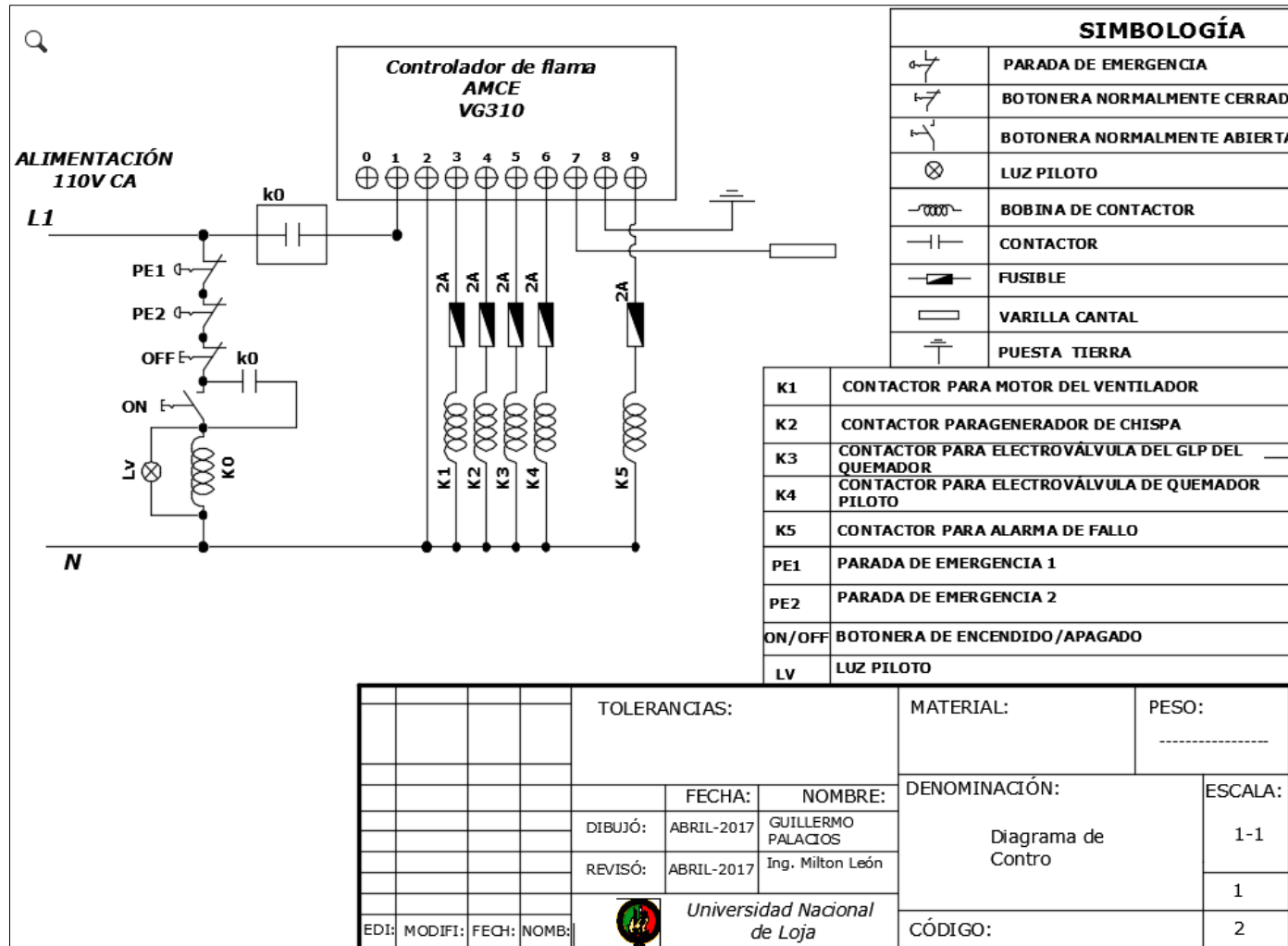


Figura 45 Diagrama de control  
Fuente: El Autor

**ANEXO 25: Diagrama de Fuerza**

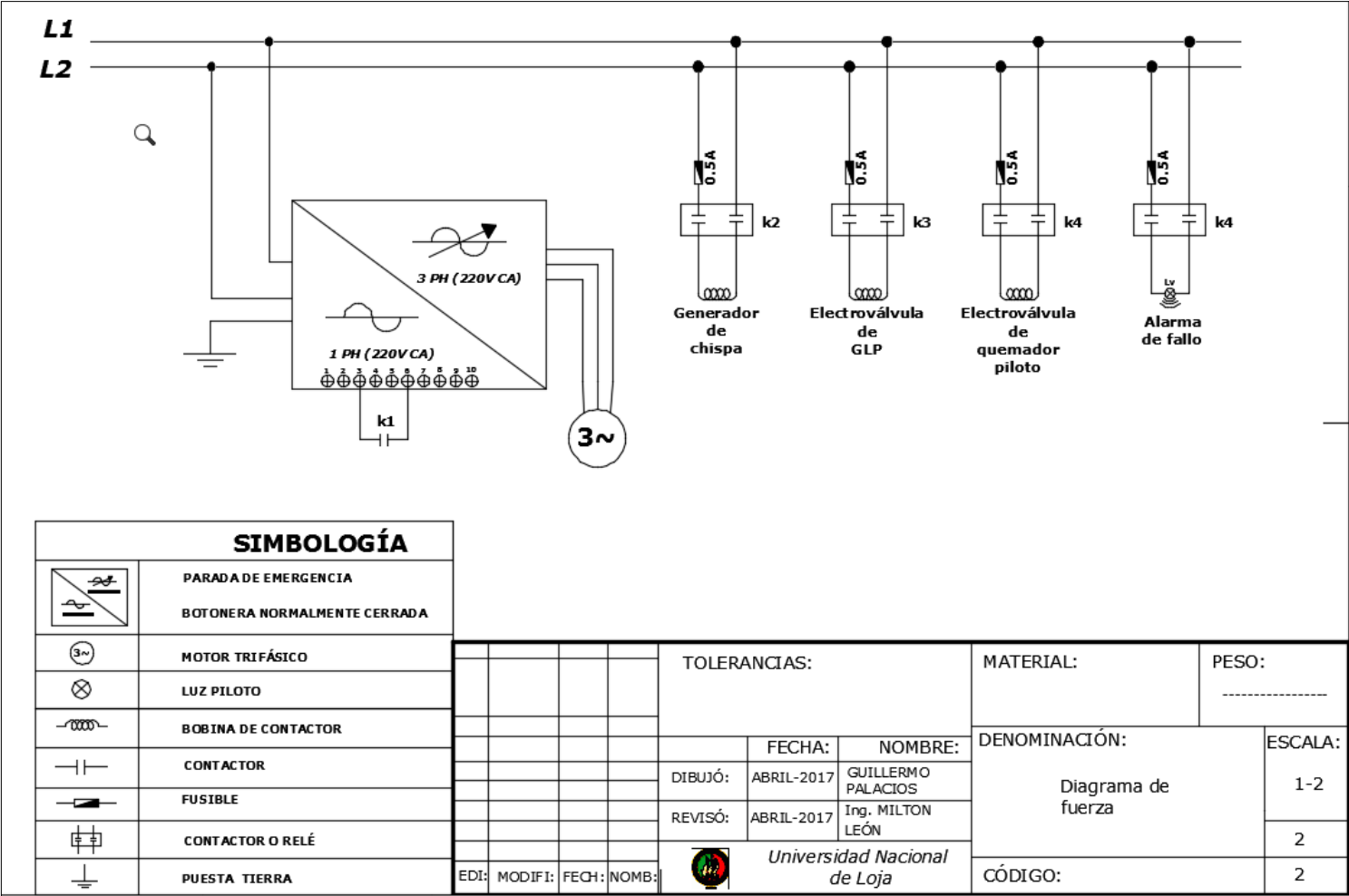


Figura 46 Diagrama de Fuerza  
Fuente: El Autor

## ANEXO 26: Selección de mirilla

### SERIE 6020

#### Mirilla tipo Parche

Permite observar el interior del contenedor. Como accesorios puede incluir:  
Lámpara de Halógeno, limpiacristal, protección de acrílico.



#### Datos Técnicos

- Temperatura: 300° C.
- Presión: 10 bar.
- Medidas: 1", 2", 3", 4", 6", 8".
- Materiales: Acero al carbón, SS 304 y 316.
- Cristales: Borosilicato, fluorosilicato.
- Accesorios: Luminaria, limpiacristal.

Figura 47 Mirilla tipo parche Franko® Serie 6020  
Fuente: (Franko, 2014)

## ANEXO 27: Selección de Termómetro

Modelos									
Modelo	DN	Versión							
A5400	63	Conexión dorsal (axial)							
A5401	80								
A5402	100								
A5403	160								
R5440	63	Conexión inferior (radial)							
R5441	80								
R5442	100								
R5443	160								
S5410	63	Conexión dorsal, giratoria y orientable							
S5411	80								
S5412	100								
S5413	160								

DN	Dimensiones en mm							Peso en kg	
	b	b <sub>1</sub> <sup>1)</sup>	b <sub>2</sub>	Ø D	Ø d	Ø d <sub>4</sub>	F <sup>1)</sup>	R	U
63	20	35	38	68	8 <sup>2)</sup>	26	47	0,20	0,30
80	20	35	38	77	8 <sup>2)</sup>	26	56	0,25	0,35
100	22	37	40	107	8 <sup>2)</sup>	26	66	0,35	0,45
160	25	40	43	161	8 <sup>2)</sup>	26	96	0,50	0,60

Rango de indicación en °C	Rango de medición en °C <sup>1)</sup>	Subdivisiones en °C	Límite de error ±°C
-30 ... +50	-20 ... +40	1	1
-20 ... +60	-10 ... +50	1	1
0 ... 60	10 ... 50	1	1
0 ... 80	10 ... 70	1	1
0 ... 100	10 ... 90	1	1
0 ... 120	10 ... 110	2	2
0 ... 160	20 ... 140	2	2
0 ... 200	20 ... 180	2	2
0 ... 250	30 ... 220	5	2,5
0 ... 300	30 ... 270	5	5
0 ... 400	50 ... 350	5	5



Figura 48 Termómetro marca WIKA®  
Fuente: (WIKA, 2011)