



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial

**DISEÑO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR EN UNA TURBINA PARA AUMENTAR LA EFICIENCIA Y CALIDAD DE UNA EXTRUSORA EN EL PROCESO DE EXTRUSIÓN EN LA EMPRESA POLYTEC, S. A.**

**Javier Antonio Aguilar Estrada**

Asesorado por el Ing. Julio Oswaldo Rojas Argueta

Guatemala, agosto de 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR EN UNA TURBINA PARA AUMENTAR LA EFICIENCIA Y CALIDAD DE UNA EXTRUSORA EN EL PROCESO DE EXTRUSIÓN EN LA EMPRESA POLYTEC, S. A.**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**JAVIER ANTONIO AGUILAR ESTRADA**

ASESORADO POR EL ING. JULIO OSWALDO ROJAS ARGUETA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO MECÁNICO INDUSTRIAL**

GUATEMALA, AGOSTO DE 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

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

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Angel Roberto Sic García
EXAMINADOR	Ing. César Augusto Akú Castillo
EXAMINADOR	Ing. Hugo Leonel Alvarado de León
EXAMINADOR	Ing. Julio Oswaldo Rojas Argueta
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

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

**DISEÑO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR EN UNA TURBINA PARA AUMENTAR LA EFICIENCIA Y CALIDAD DE UNA EXTRUSORA EN EL PROCESO DE EXTRUSIÓN EN LA EMPRESA POLYTEC, S. A.**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial, con fecha 28 de julio de 2014.

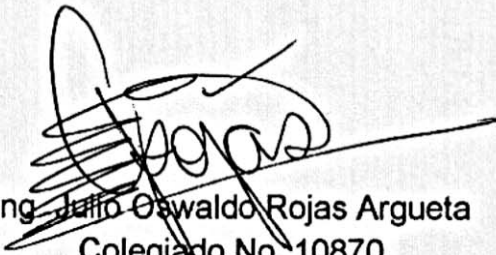
**Javier Antonio Aguilar Estrada**

Guatemala, 03 de febrero del 2016

Ingeniero  
Juan José Peralta Dardón  
Director  
Escuela de mecánica industrial  
Facultad de ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Atentamente me dirijo a usted para informarle que he asesorado el trabajo de tesis: **DISEÑO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR EN UNA TURBINA PARA AUMENTAR LA EFICIENCIA Y CALIDAD DE UNA EXTRUSORA EN EL PROCESO DE EXTRUSIÓN EN LA EMPRESA POLYTEC S.A**, realizado por el estudiante **Javier Antonio Aguilar Estrada** quien se identifica con carné No. **2009-15699**, previo a optar el título de Ingeniero Mecánico Industrial

Al respecto quiero indicarle que luego de efectuadas las revisiones y correcciones del caso, encuentro satisfactorio el trabajo, por lo que procedo aprobarlo y remitirlo a usted para su trámite correspondiente.

  
Ing. Julio Oswaldo Rojas Argueta  
Colegiado No. 10870  
Asesor

Julio O. Rojas Argueta  
Ingeniero Mecánico Industrial  
Colegiado 10,870



REF.REV.EMI.053.016

Como Catedrático Revisor del Trabajo de Graduación titulado **DISEÑO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR EN UNA TURBINA PARA AUMENTAR LA EFICIENCIA Y CALIDAD DE UNA EXTRUSORA EN EL PROCESO DE EXTRUSIÓN EN LA EMPRESA POLYTEC S. A.**, presentado por el estudiante universitario **Javier Antonio Aguilar Estrada**, apruebo el presente trabajo y recomiendo la autorización del mismo.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

Ing. Sergio Antonio Torres Méndez  
Catedrático Revisor de Trabajos de Graduación  
Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial



Guatemala, abril de 2016.

/mgp



REF.DIR.EMI.123.016

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el Visto Bueno del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística del trabajo de graduación titulado **DISEÑO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR EN UNA TURBINA PARA AUMENTAR LA EFICIENCIA Y CALIDAD DE UNA EXTRUSORA EN EL PROCESO DE EXTRUSIÓN EN LA EMPRESA POLYTEC, S. A.**, presentado por el estudiante universitario **Javier Antonio Aguilar Estrada**, aprueba el presente trabajo y solicita la autorización del mismo.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

Ing. Juan José Peralta Dardón  
**DIRECTOR**

**Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial**



Guatemala, julio de 2016.

/mgp

Universidad de San Carlos  
De Guatemala



Facultad de Ingeniería  
Decanato

Ref. DTG.352-2016

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial, al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR EN UNA TURBINA PARA AUMENTAR LA EFICIENCIA Y CALIDAD DE UNA EXTRUSORA EN EL PROCESO DE EXTRUSIÓN EN LA EMPRESA POLYTEC, S.A.**, presentado por el estudiante universitario: **Javier Antonio Aguilar Estrada**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano



Guatemala, agosto de 2016

/cc



## **ACTO QUE DEDICO A:**

### **Dios**

Por darme la sabiduría, conocimiento y la fuerza necesaria para continuar en cada etapa de la carrera y permitirme terminarla.

### **Mi madre**

Dilia Estrada, por siempre confiar en mí, darme su amor y apoyo incondicional, y sobre todo, por el arduo esfuerzo que ha realizado para asegurar mi educación, siendo esta la herencia más valiosa que puedo tener.

### **Mis hermanas**

Yeny Alejandra y Dilia Claudette Aguilar, por su apoyo, cariño y ser ejemplos a seguir en cada aspecto de la vida.

### **Mis sobrinos**

Estuardo, Natalia y Emma Monroy, por darle tanta felicidad a la familia.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

- Dios** Por darme la bendición de tener siempre a las personas correctas que me apoyaran durante la carrera y permitirme cumplir esta meta.
- Mi madre** Dilia Estrada, por darme el mejor ejemplo de esfuerzo, disciplina y dedicación que pude haber tenido durante toda mi vida.
- Gervi Sical** Por ser una importante influencia en mi carrera, y apoyarme durante todo el transcurso de la misma.
- Mi padre** Juan Aguilar, por ser una importante influencia en mi carrera.
- Lilian Barquero** Por la comprensión, amor incondicional y estar siempre apoyándome en los momentos difíciles.
- Familia** Ligia, Silvia y César Estrada, Irma García y Rodrigo Vidal, por el apoyo incondicional.
- Amigos** Christofer Aguilar, Miguel Estrada, Gabriela Juracán y Kevin Moya, por su apoyo y comprensión durante toda la carrera.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	IX
GLOSARIO .....	XI
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN.....	XIX
1. GENERALIDADES DE LA EMPRESA .....	1
1.1. Historia .....	1
1.2. Estructura del negocio.....	2
1.2.1. Industrial .....	2
1.2.2. Agroindustrial.....	4
1.2.3. Comercial.....	6
1.3. Valores .....	7
1.4. Misión .....	8
1.5. Visión.....	8
1.6. Política de calidad .....	9
1.7. Clientes.....	10
1.8. Procesos de producción .....	11
1.8.1. Proceso de extrusión .....	11
1.8.1.1. Diagrama de flujo del proceso .....	14
1.8.2. Proceso de impresión .....	17
1.8.3. Proceso de laminación .....	20
1.8.4. <i>Slitter</i> .....	21
1.8.5. Corte.....	22

2.	SITUACIÓN ACTUAL DEL PROCESO DE EXTRUSIÓN.....	23
2.1.	Descripción del equipo.....	24
2.2.	Especificaciones técnicas de la maquinaria.....	28
2.3.	Procedimientos actuales de producción.....	30
2.4.	Materias primas.....	32
2.5.	Velocidades.....	34
2.6.	Temperaturas.....	36
2.7.	Calibres de películas.....	38
2.8.	Análisis del desempeño.....	38
2.8.1.	Estándares de calidad.....	39
2.9.	Eficiencias actuales.....	46
2.10.	Recolección de datos actuales.....	50
2.11.	Diagrama de árbol.....	53
3.	PROPUESTA PARA EL INCREMENTO DE EFICIENCIA Y CALIDAD.....	55
3.1.	Definición y análisis de la magnitud del problema.....	55
3.2.	Causas del problema.....	61
3.2.1.	Mano de obra.....	66
3.2.2.	Métodos.....	67
3.2.3.	Máquinas o equipos.....	68
3.2.4.	Material.....	70
3.2.5.	Mediciones.....	71
3.2.6.	Medio ambiente.....	72
3.3.	Establecimiento de las medidas remedio.....	75
3.4.	Diseño de un intercambiador de calor.....	78
3.4.1.	Materiales del intercambiador de calor.....	79
3.4.2.	Pasos para el diseño del intercambiador de calor...	82
3.4.3.	Balance de energía.....	83

3.4.4.	Temperaturas y calor específico del agua .....	85
3.4.5.	Energía del agua .....	87
3.4.6.	Temperaturas de aire .....	89
3.4.7.	Área del intercambiador de calor .....	96
3.4.8.	Cálculo de la efectividad del intercambiador de calor.....	100
3.5.	Costo de la propuesta.....	102
3.6.	Evaluación de la propuesta .....	108
3.6.1.	TMAR .....	110
3.6.2.	VPN .....	111
3.6.3.	TIR.....	114
3.7.	Comparación situación actual y propuesta .....	116
4.	IMPLEMENTACIÓN DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR.....	119
4.1.	Selección del intercambiador de calor .....	119
4.2.	Montaje del intercambiador de calor.....	120
4.2.1.	Análisis de elementos.....	120
4.2.2.	Soldadura en aluminio .....	128
4.2.3.	Selección de mangueras .....	134
4.2.4.	Tubería de agua .....	136
4.2.5.	Prueba de fugas del intercambiador de calor .....	140
4.3.	Instalación del intercambiador de calor .....	143
4.3.1.	Herramientas y materiales.....	144
4.3.2.	Procedimientos para el montaje .....	144
4.3.3.	Procedimiento de soldadura .....	145
4.3.4.	Acoplamiento de tuberías y mangueras .....	147
4.3.5.	Capacitación .....	151

5.	SEGUIMIENTO Y MEJORA CONTINUA .....	155
5.1.	Seguimiento .....	155
5.1.1.	Gráficos de control para las temperaturas.....	157
5.1.2.	Paretos de defectos en las películas .....	158
5.1.3.	Comparaciones de órdenes de producción .....	160
5.1.4.	Aplicación de intercambiador en otras extrusoras.	163
5.2.	Mantenimiento del intercambiador de calor.....	165
	CONCLUSIONES.....	169
	RECOMENDACIONES .....	171
	BIBLIOGRAFÍA.....	173
	APÉNDICES.....	175
	ANEXOS.....	179

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1.	Tipos de productos agroindustriales .....	5
2.	Bolsa <i>boutique</i> .....	6
3.	Clientes de Polytec .....	10
4.	Partes de una extrusora .....	13
5.	Diagrama de flujo del proceso de extrusión .....	15
6.	Proceso de impresión .....	19
7.	Identificación de bobinas en laminadora .....	21
8.	Identificación de bobinas en el proceso de <i>slitter</i> .....	22
9.	Partes de la extrusora 21, vista lateral derecha .....	25
10.	Partes de la extrusora 21, vista trasera .....	25
11.	Partes de la extrusora 21, vista frontal .....	26
12.	Forma de las resinas de polietileno .....	27
13.	Tacómetro utilizado para medir la velocidad lineal del embobinado.....	34
14.	Medidor de temperatura láser.....	37
15.	Máquina de calibre de espesores .....	41
16.	Estándares de calidad, 1 .....	43
17.	Límites de control .....	43
18.	Estándares de calidad prueba 2 .....	45
19.	Comportamiento de indicadores .....	52
20.	Diagrama de árbol extrusión.....	53
21.	Pareto de los defectos en películas de polietileno .....	58
22.	Pareto del defecto de calibre por extrusora .....	60
23.	Gráfico de medias.....	64

24.	Gráfico de desviaciones estándar .....	64
25.	Límites de especificación .....	65
26.	Burbuja corriendo de manera estable .....	71
27.	Diagrama causa-efecto, variación de calibre.....	75
28.	Partes de un intercambiador de calor.....	79
29.	Comparación de precios de aluminio y cobre.....	80
30.	Representación básica para un balance de energía .....	84
31.	Lectura de temperaturas .....	86
32.	Radio y motor de turbina de admisión de aire .....	97
33.	Características del intercambiador de calor .....	102
34.	Ducto de aire hacia el intercambiador de calor .....	103
35.	Estructura del intercambiador de calor.....	104
36.	Cono truncado.....	105
37.	Flujo de efectivo .....	112
38.	Tasa a la cual el VPN es cero .....	115
39.	Formación de tubo intercambiador de calor .....	121
40.	Corte de tubos a 60 cm .....	122
41.	Fabricación de aletas .....	126
42.	Cabecero.....	127
43.	Colocación cabecero.....	127
44.	Depósitos de agua .....	128
45.	Apilando tubos y aletas .....	129
46.	Tubería de agua Polytec .....	136
47.	Gráficos de control, prueba de estanqueidad.....	142
48.	Mangueras y ducto.....	150
49.	Diagrama de Gantt, actividades intercambiador de calor.....	153
50.	Formato de seguimiento intercambiador de calor .....	156
51.	Pareto de defectos de calibre por máquina, situación actual .....	159
52.	Pareto esperado al cabo de un mes de instalado el intercambiador .....	159



53. Planos del Departamento de Extrusión .....	164
--	-----

## TABLAS

I. Tipos de bolsas creadas por Polytec .....	3
II. Resumen de actividades del proceso de extrusión .....	17
III. Especificaciones técnicas de la extrusora 21 .....	29
IV. Especificaciones técnicas del material a extruir .....	29
V. Especificaciones accesorios extrusora 21 .....	29
VI. Densidades del polietileno .....	31
VII. Temperatura elemento mecánicos .....	36
VIII. Muestras para prueba de calidad 1 .....	42
IX. Muestras para prueba de calidad 2 .....	45
X. Tiempos muertos .....	48
XI. Eficiencias extrusora, junio 2014 .....	49
XII. Registro de datos en extrusora 21 .....	50
XIII. Comportamiento de indicadores .....	52
XIV. Defectos en las películas de polietileno año 2014 .....	56
XV. Pareto según cantidad recurrente de defecto por calibre .....	59
XVI. Muestras para gráficos de control .....	61
XVII. Comportamiento temperatura y velocidad .....	73
XVIII. Soluciones a causas encontradas en Ishikawa .....	76
XIX. Características de materiales intercambiadores de calor .....	81
XX. Pasos para el diseño de un intercambiador de calor .....	82
XXI. Temperatura de anillo y salida de turbina .....	91
XXII. Interpretación del valor de coeficiente de correlación .....	93
XXIII. Datos para la elaboración de una ecuación para pronosticar la temperatura de salida del aire .....	96
XXIV. Características del intercambiador de calor .....	101

XXV.	Suministros, costos directos y servicios.....	108
XXVI.	Ganancia propuesta contra ganancia actual.....	110
XXVII.	VPN a una TMAR de 7,44 % .....	113
XXVIII.	Tasa interna de rentabilidad .....	114
XXIX.	Comparación de la situación actual y la propuesta.....	117
XXX.	Tiempos de penetración en aluminio .....	124
XXXI.	Selección del alambre a utilizar .....	132
XXXII.	Características del flujo.....	138
XXXIII.	Rugosidad en materiales .....	139
XXXIV.	Ejemplo de gráficos de control para la prueba de estanqueidad. ....	141
XXXV.	Características de coquilla.....	149
XXXVI.	Valores del costo de producción.....	161
XXXVII.	Comparación de costos entre situación actual y propuesta.....	162
XXXVIII.	Grado de dureza del agua .....	166

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>A<sub>t</sub></b>	Área transversal
<b>C<sub>p</sub></b>	Calor específico
<b>cm</b>	Centímetro
<b>ρ</b>	Densidad
<b>Q</b>	Energía
<b>mf</b>	Flujo másico
<b>C</b>	Grados Celsius
<b>m</b>	Metro
<b>m<sup>2</sup></b>	Metro cuadrado
<b>m<sup>3</sup></b>	Metro cúbico
<b>mm</b>	Milímetro
<b>Re</b>	Número de Reynolds
<b>PET</b>	Poliéster
<b>PE</b>	Polietileno
<b>PP</b>	Polipropileno
<b>rpm</b>	Revoluciones por minuto
<b>T</b>	Temperatura
<b>v</b>	Velocidad
<b>w</b>	Velocidad angular de la turbina
<b>V</b>	Volumen



## GLOSARIO

<b>Aletas</b>	Elemento mecánico que forma parte del intercambiador de calor, cuyo propósito es proveer superficie adicional para intercambiar energía de manera eficiente.
<b>Anillo de enfriamiento</b>	Encargado de llevar el material plastificado a un estado sólido y estabilizar la burbuja en diámetro.
<b>Anilox</b>	Elemento encargado de aportar el volumen de tinta indicado para una impresión deseada.
<b>Bobina</b>	Película de polietileno enrollada sobre una base circular de cartón.
<b>Bobina hija</b>	Bobina de menor ancho a la madre, resultado del proceso de <i>slitter</i> .
<b>Bobina madre</b>	Bobina de polímeros de mayor ancho.
<b>Calibre</b>	Característica física de las películas de polietileno que brinda diferentes propiedades.
<b>Canasta</b>	Elemento mecánico de la extrusora encargado de darle una guía a la burbuja de polietileno.

<b>Dosificación</b>	Establecer las proporciones adecuadas de resinas para brindar las propiedades deseadas.
<b>Extrusión</b>	Proceso por el cual se plastifica el polietileno para darle forma tubular y elaborar películas o films de polímeros.
<b>Intercambiador de calor</b>	Dispositivo cuya función es transferir calor entre dos medios.
<b>Laminación</b>	Proceso por el cual se unen dos películas por medio de un adhesivo.
<b><i>Masterbatch</i></b>	Conjunto de aditivos que modifican las propiedades de las películas de polietileno.
<b>Migración</b>	Acción generada entre los aditivos y el sustrato por la incompatibilidad de los mismos.
<b>Panal</b>	Parte del intercambiador de calor conformada por tubos y aletas.
<b><i>Pantone</i></b>	Sistema cuya función es la igualación de color en tintas.
<b>Polietileno</b>	Polímero que se obtiene de la polimerización del etileno, es uno de los plásticos mas utilizados para la fabricación de envases plásticos desechables debido a su bajo costo y peso.

<b>Polímeros</b>	Unión de varias moléculas de monómeros de carbono e hidrogeno.
<b>Resina</b>	Poliétileno en forma granular, dichos gránulos se obtienen de los gases que se capturan al refinar el petróleo a altas temperaturas y presiones.
<b><i>Slitter</i></b>	Proceso de redimensionado de bobinas.
<b><i>Solventless</i></b>	La cantidad de solvente a utilizar para laminación de películas es mínima.
<b>Tornillo extrusor</b>	Elemento mecánico de la extrusora, encargado de plastificar la resina por medio de temperaturas.
<b>Tubos</b>	Lugar por donde fluye el líquido refrigerante o el agua y el calor es transferido a las paredes del intercambiador y a las aletas.
<b>Turbina</b>	Elemento mecánico de la extrusora formada por aspas encargado de enviar aire al anillo de enfriamiento.





## RESUMEN

Conforme las empresas van creciendo, de la mano incrementa la tecnología de las máquinas y las exigencias de los clientes, por lo que las máquinas antiguas son capaces de brindar los resultados deseados a bajas velocidades afectando los *lead times* de producción. Para delimitar el problema se realiza un análisis de Pareto con base en la información que posee el Departamento de Calidad, de esta forma se busca abarcar el defecto más recurrente y en qué máquina se presenta.

Encontrado el defecto y la máquina bajo la cual se trabajará, se realiza un diagrama de Ishikawa, con el fin de encontrar la causa raíz del defecto, tomando en cuenta las emes que presentan variaciones en los procesos y así determinar las medidas que contrarrestarán dichas variaciones. Las causas pueden ser varias y se selecciona la que mejor resultados brinde. Para el defecto de calibre, se determinó que la causa raíz de la variación y las velocidades bajas es la temperatura a la cual llega el aire al anillo de enfriamiento y la solución que mejor resultados brinda es la implementación de un sistema de enfriamiento.

Con base en la mejor solución encontrada, se realiza el diseño de un intercambiador de calor, utilizando la ecuación de balance de energía y las características actuales de los equipos y de planta. Mediante la aplicación de herramientas como VPN y TIR, se determina que la implementación de un intercambiador de calor genera ganancias por arriba de la tasa mínima esperada por la empresa y es lo suficientemente rentable para recuperar la inversión en poco tiempo. Para garantizar la calidad en las películas se detalla

el procedimiento y factores a tomar en cuenta a la hora de realizar un mantenimiento en el equipo.

# OBJETIVOS

## General

Diseñar y seleccionar un intercambiador de calor para incrementar la eficiencia y calidad en una de las extrusoras de película tubular, tomando en cuenta las condiciones de la máquina y del ambiente.

## Específicos

1. Detallar el diseño apropiado de un intercambiador de calor en una extrusora mediante cálculos de balances de energía, tomando en cuenta las temperaturas de entrada y salida, dimensiones del lugar, las necesidades de producción y los recursos financieros de la empresa.
2. Determinar la necesidad de un sistema de enfriamiento en el proceso de extrusión, por medio de la recolección de muestras y utilización de herramientas de calidad, considerando variables como eficiencias, temperaturas, defectos y velocidades.
3. Incrementar la calidad y eficiencia en la extrusora 21 en un 33 % por medio del diseño de un sistema de enfriamiento, considerando las necesidades de producción y de calidad.
4. Evaluar la viabilidad de la propuesta por medio de herramientas de evaluación financieras como VPN y TIR, considerando la inversión inicial y los flujos de efectivo de la propuesta.

5. Definir los procedimientos adecuados para el montaje y mantenimiento del intercambiador de calor, tomando en cuenta la seguridad industrial y las condiciones del ambiente.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, las empresas luchan por ser más competitivas implementando nuevos métodos y tecnologías para incrementar su productividad, buscando abarcar más mercado mediante la entrega de pedidos en tiempos más cortos y de mejor calidad que la competencia. Para lograr esto no basta con la tecnología que poseen las empresas, se debe recurrir a métodos que logren aumentar la eficiencia de los procesos, tal es el caso de la empresa Polytec, la cual se dedica a la producción de empaque flexible.

Para lograr un empaque flexible, el polietileno debe pasar por diferentes procesos. Sin embargo, el presente trabajo de investigación únicamente abarca el proceso de extrusión, el cual es el proceso donde se dosifica, mezcla y plastifica el polietileno para la creación de bolsas y bobinas, dicho proceso se describirá en el capítulo uno.

En el segundo capítulo se detallan los problemas que se presentan en el Departamento de Extrusión, siendo el principal la temperatura del anillo de enfriamiento. Esto da como resultado defectos de apariencia y variaciones de calibre durante la producción y en el producto terminado. Junto con esto se presentan problemas de emisión de gases a la atmósfera, inestabilidad en la burbuja de polietileno y el más crítico, que es la reducción de la velocidad en las máquinas, provocando producciones lentas y afectando los *lead times* de fabricación.

En el tercer capítulo se especifica todo el análisis de la propuesta para incrementar la eficiencia y calidad, en donde se definirá la magnitud del

problema mediante gráficos de control y de Pareto. De la misma forma, se determina la causa raíz mediante un gráfico de Ishikawa, tomando en cuenta los factores que provocan variaciones en los procesos de producción, con el fin de establecer medidas remedio para dicha causa y realizar una selección con base en las necesidades de la empresa.

También se detallan todos los pasos necesario para el diseño del intercambiador de calor y se definen los valores necesarios de las variables críticas del intercambiador de calor con base en las necesidades de producción y de calidad. De la mano se desarrolla una evaluación financiera de la propuesta, mediante el uso del VPN y la TIR, determinando la rentabilidad de la propuesta.

Determinados todos los factores de importancia para el diseño del intercambiador de calor, en el cuarto capítulo se desarrollan todas las actividades para la selección e implementación del mismo. Se detallan los puntos específicos a tomar en cuenta, desde su fabricación hasta su montaje, siendo estos los puntos fundamentales que prolongarán la vida del intercambiador de calor y evitarán fallos durante la operación del mismo.

En el quinto capítulo se establecen los registros necesarios que se deben llevar para verificar el comportamiento del intercambiador de calor mediante cartas de control. De la misma forma, se determinan las actividades que debe realizar el Departamento de Ingeniería, con el fin de comparar la situación actual con la propuesta y validar la disminución en costos unitarios. También se establecen los procedimientos a seguir para el mantenimiento del intercambiador de calor.

# **1. GENERALIDADES DE LA EMPRESA**

Polímeros y tecnología, S. A. (Polytec) es una empresa dedicada a la producción de empaque flexible. Tiene una capacidad de 1 850 toneladas al mes y una capacidad instalada de 2 700 toneladas al mes de polietileno, polipropileno y poliéster. De estas toneladas, 750 son impresas, contando con más de 22 tipos de bolsas. La empresa emplea un total de 500 trabajadores, teniendo para sus procesos 4 naves industriales, lo cual es posible gracias a la tecnología que Polytec maneja en cada proceso.

## **1.1. Historia**

Polytec se crea en 1989, con el fin de brindar al mercado la producción de empaque flexible con alta tecnología en maquinaria y materiales, brindando productos con una filosofía de compromiso con el cliente. Con el fin de abarcar mercado, Polytec crea una empresa hermana para satisfacer la demanda internacional, llamada Polytec International, al mismo tiempo adquiere las empresas Geoplast y Lacoplast. Geoplast era una de las empresas de producción de empaque flexible y Lacoplast una de las empresas con más prestigio y capacidad (600 toneladas mensuales), dedicada a envases de plástico soplado. Estas 3 empresas dieron origen a Grupo Polytec.

## **1.2. Estructura del negocio**

La estructura de Polytec está compuesta por el sector industrial, agroindustrial y comercial. Cada uno de estos sectores se detallan a continuación.

### **1.2.1. Industrial**

Polytec se especializa en la producción de empaques flexibles laminados de 2 y 3 capas, utilizando adhesivos sin solvente para empaques de alto desempeño en llenadoras automáticas, más adelante se explicará el proceso de laminación. Polytec también realiza coextrusiones de 3 capas, impresiones de hasta 8 colores, termoencogibles impresos y sin impresión, bolsas tipo *doypack*, *flow pack* y *pouches*. Para tener una idea más clara de los productos mencionados, estos se muestran en la tabla I.



Tabla I. Tipos de bolsas creadas por Polytec

TIPO	IMAGEN
Bolsa <i>doypack</i>	
Bolsa <i>flow pack</i>	
Bolsas <i>pouches</i>	
Termoencogibles	

Fuente: elaboración propia.

### 1.2.2. Agroindustrial

Polytec trabaja con agricultores ofreciéndoles productos para el cuidado del cultivo. Entre los productos que Polytec distribuye se encuentran los siguientes:

- Mangueras y accesorios para riego por goteo: productos de primera calidad para optimizar el riego por goteo de los cultivos, economizando agua.
- Películas de invernadero.
- Trampas para insectos, amarillas y verdes.
- Películas y bolsas hidropónicas, forrajeras y ensilaje, coextruidas en blanco-negro
- Bolsas para almácigo.
- Bolsas para empaque de banano, melón, frutas y hortalizas con y sin impresión, perforadas y lisas.
- Techos tomateros.
- *Mulch*: películas de polietileno con propiedades para aumentar la fertilidad de la tierra.

En la figura 1 se aprecian los productos descritos anteriormente.

Figura 1. **Tipos de productos agroindustriales**



Fuente: *Polytec*. <http://polytec.com.gt/wp-content/uploads/2012/07/collage-agricola-fondo-negro1.png>. Consulta: julio de 2014.

### 1.2.3. Comercial

En esta línea Polytec ofrece toda clase de bolsas, películas y materiales de empaque para el comercio, con y sin impresión, como bolsas para *boutique*, empaque para regalos y bolsas de basura. La figura 2 muestra esta línea.

Figura 2. **Bolsa *boutique***



Fuente: *Mercado libre*. [http://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-451364002-bolsa-ecologica-para-boutique-troquelada-\\_JM](http://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-451364002-bolsa-ecologica-para-boutique-troquelada-_JM). Consulta: julio de 2014.

### 1.3. Valores

Son herramientas que guían a los colaboradores a cumplir las metas de producción y objetivos estratégicos, mediante la solidez y rigidez en la toma de decisiones de cada uno de los trabajadores de Polytec. Los valores de Polytec se han creado para establecer compromisos fiables y éticos entre sus trabajadores, accionistas y clientes.

Con el paso del tiempo los valores deben ir orientados al cliente y nuevas tecnologías, a modo de emplear la filosofía de mejora continua a partir de la combinación del recurso humano y tecnológico. Es por esto que Polytec define sus valores de la siguiente manera:

- Estamos centrados en el cliente: Nos comprometemos con su éxito, mediante una atención personalizada, tanto en la definición de necesidades como en la innovación en la propuesta de soluciones y en el seguimiento completo de nuestro desempeño.
- Siempre damos la cara: Siempre asumiremos nuestra responsabilidad, plantearemos con certeza nuestros pensamientos y tomaremos la acción que garantice el beneficio mutuo. Además de hacerlo internamente, rendiremos cuentas de nuestras acciones ante los clientes, empleados, proveedores, la comunidad, el país y los accionistas.
- Nunca nos damos por satisfechos: Estamos comprometidos con la excelencia. No debemos ni queremos conformarnos con el éxito actual. Apenas alcanzamos una meta, ya estamos buscando un reto nuevo.
- Nos preocupamos genuinamente por nuestra gente: Las personas son antes que todo. Nos sentimos valorados y respetados en nuestro trabajo y generamos un ambiente que nos permite desempeñarlo con pasión.

- Lo que hacemos lo hacemos con integridad: Somos consecuentes en el cumplimiento de estos valores: nuestra actitud de vida y nuestra forma de ser implican el compromiso, la honradez y el apego a la verdad.<sup>1</sup>

#### **1.4. Misión**

Es una de las estrategias que indican la personalidad, el ámbito y razón de ser de la empresa. En la misión se establecen las funciones básicas a realizar por la empresa, para satisfacer al cliente y lograr cumplir la visión.

Existen dos tipos de misión, como las amplias y las estrechas. Las misiones amplias tienden abarcar demasiadas actividades sin dejar clara la razón de ser de la empresa dando confusiones, a diferencia de la misión estrecha que delimita las actividades y las enfoca en una sola dirección evitando confusiones. Por esto Polytec ha creado un tipo de misión estrecha, la misión es la siguiente:

“Generar valor para nuestros clientes, trabajadores y accionistas a través de la creación de soluciones competitivas en empaque”.<sup>2</sup>

#### **1.5. Visión**

Es hacia donde desea llegar la empresa, es establecida por la persona encargada de dirigir la empresa, fomentando el compromiso e iniciativa. En el caso de Polytec, fue creada por los dueños de las 3 empresas adquiridas.

---

<sup>1</sup> Valores proporcionados por Polytec.

<sup>2</sup> Misión proporcionada por Polytec.

Una vez establecida la visión, todas las decisiones y actividades que se realicen se desarrollarán según esta. La visión debe ser concreta y acertada, orientada a la economía, producción y administración. La visión de Polytec es la siguiente:

“Ser la empresa de referencia en empaques y materiales flexibles en Centro América, México y El Caribe”<sup>3</sup>.

Como se puede notar la visión de Polytec es concreta y acertada, estableciendo ser la referencia para varios países, indicando un liderazgo delimitado y bien definido.

## **1.6. Política de calidad**

Como parte de todo sistema de gestión de calidad, lo primero que se debe establecer es la política, desarrollada por el Departamento de Calidad junto con la alta dirección de Polytec. Esta se detalla a continuación.

- Estamos comprometidos a satisfacer las necesidades y requerimientos de nuestros clientes, a través de la mejora continua de nuestros productos, procesos y servicios.
- Valoramos y capacitamos a nuestros recursos humanos y buscamos desarrollar relaciones a largo plazo con clientes y proveedores.
- Aceptamos el compromiso de establecer y mantener un sistema de calidad<sup>4</sup>

---

<sup>3</sup> Visión proporcionada por Polytec.

<sup>4</sup> Política de calidad proporcionada por Polytec.

## 1.7. Clientes

Los procesos, procedimientos e índices de calidad del producto terminado que Polytec maneja, han permitido tener clientes como: Grupo Alza, Alimentos Regia, Olmeca, Pepsi Cola, Procter & Gamble, Frito-Lay, Expro, S. A., INA, S. A., Coca Cola, Colgate Palmolive, Café Miramar, Café Quetzal, Guatemalan Candies, Del Monte Fresh Produce Co. La figura 3 muestra a algunos de ellos.

Figura 3. Clientes de Polytec



Fuente: Polytec. <http://polytec.com.gt/clientes/>. Consulta: julio de 2014.



## **1.8. Procesos de producción**

Para la producción de empaque flexible se crean rutas de producción. Dichas rutas contienen los procesos de producción por los cuales pasa un producto y pueden cambiar según las necesidades del cliente. Los procesos de producción en los cuales puede pasar un producto son extrusión, impresión, laminación, *slitter* y corte. A continuación se describirá brevemente cada uno de ellos.

### **1.8.1. Proceso de extrusión**

Es la primera fase para la creación de empaque flexible de polietileno. Una vez que el cliente solicita a ventas un empaque con ciertas características y propiedades, se transfieren los requerimientos del cliente al Departamento de Investigación y Desarrollo, el cual está encargado de realizar la formulación que debe llevar la película de polietileno, a modo de satisfacer las necesidades del cliente.

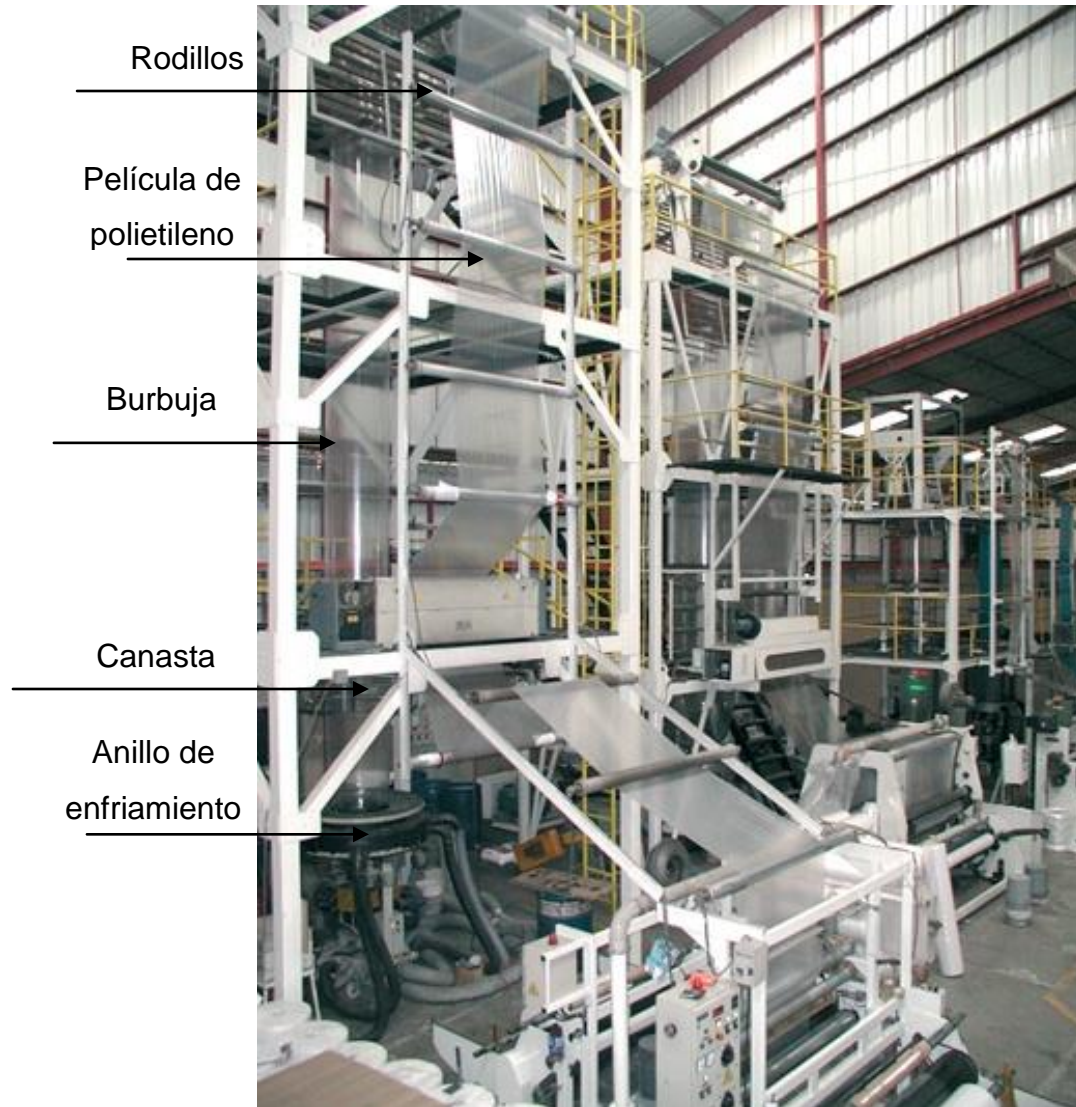
Si el cliente desea que la película de polietileno lleve impresión en alguna de las caras, a esta película se le debe realizar un baño de electrones en una de las caras, con el fin de que la tinta a utilizar sea absorbida por el polietileno, tal es el caso de las bolsas Wal-Mart que han sido tratadas únicamente en una cara. Para esto se deben añadir ciertos porcentajes de aditivos, los cuales son formulados por el Departamento de Investigación y Desarrollo.

Una vez establecida la fórmula, se deben reunir todas las materias primas para la extrusión, como la resina de polietileno, pigmentos y *masterbatch*. Al tener las materias primas necesarias, estas pasan al dosificador de la extrusora, el cual es el encargado de ingresar la cantidad de materias primas según los porcentajes establecidos por Investigación y Desarrollo. Hecho esto, las materias primas se combinan en un mezclador, para posteriormente ser enviadas al anillo extrusor.

En el anillo extrusor es en donde se calienta el polietileno a temperaturas de alrededor de 150 °C y se plastifica el polietileno. Muchas personas tienen la idea errónea de que el polietileno se funde en esta etapa, lo cual no es cierto, ya que en un estado fundido no se podría controlar la película, debido al estado líquido en el que saldría.

Una vez plastificado el polietileno, este pasa a un anillo de enfriamiento, el cual es el encargado de soplar aire frío al polietileno, de tal forma que se crea una burbuja, la cual es guiada por una estructura metálica llamada canasta. Una vez pasada por la canasta, pasa por rodillos en los cuales se une la burbuja, a modo de formar la película y enfriarla. Luego, la película desciende por medio de rodillos de tal forma que se embobina en un centro de cartón y se crea la bobina de polietileno. Para identificar de una mejor manera las partes de la extrusora se presenta la figura 4.

Figura 4. Partes de una extrusora



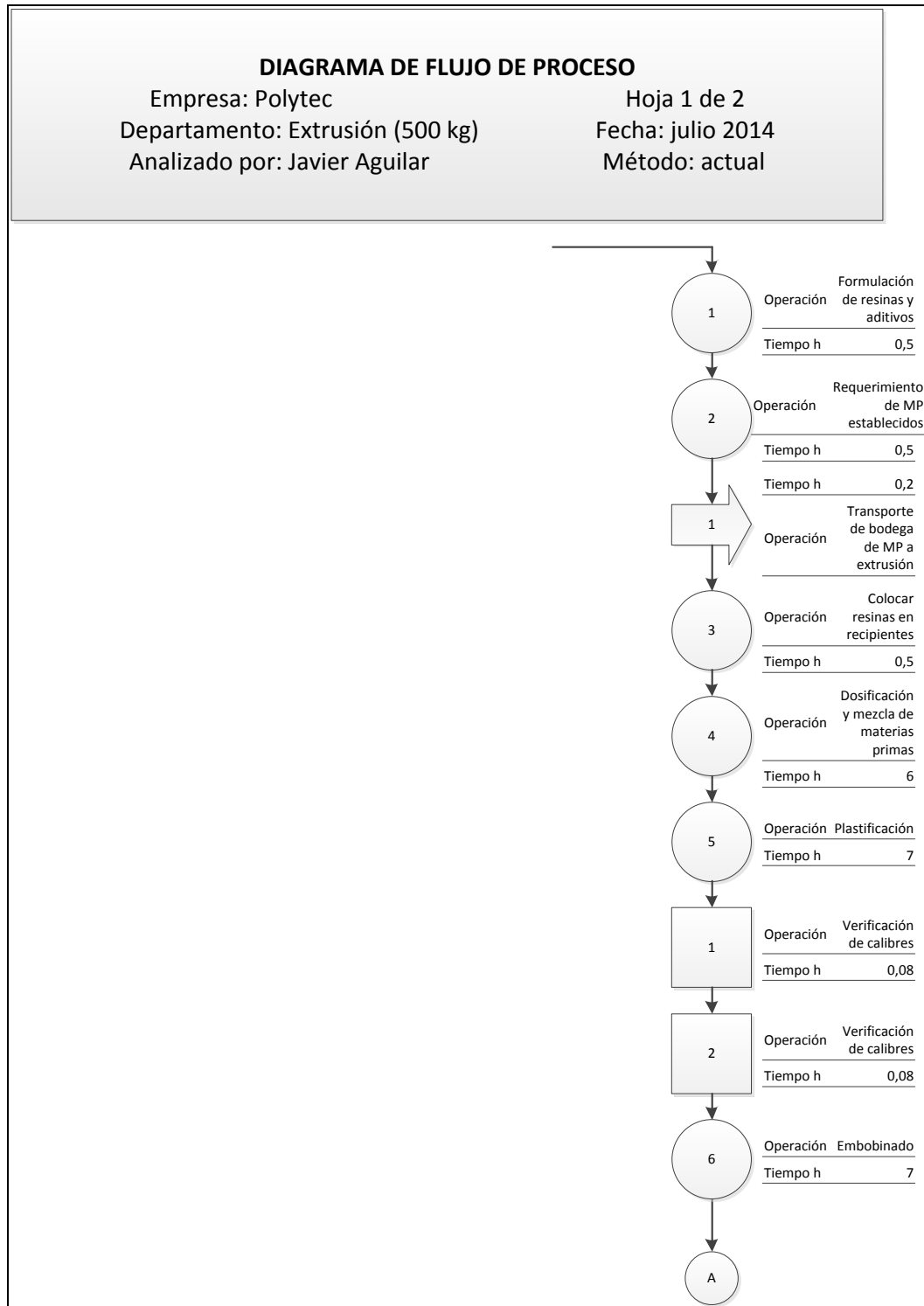
Fuente: *Polytec*. <http://polytec.com.gt/extrusion-laminacion-y-slitte/>. Consulta: julio de 2014.

### **1.8.1.1. Diagrama de flujo del proceso**

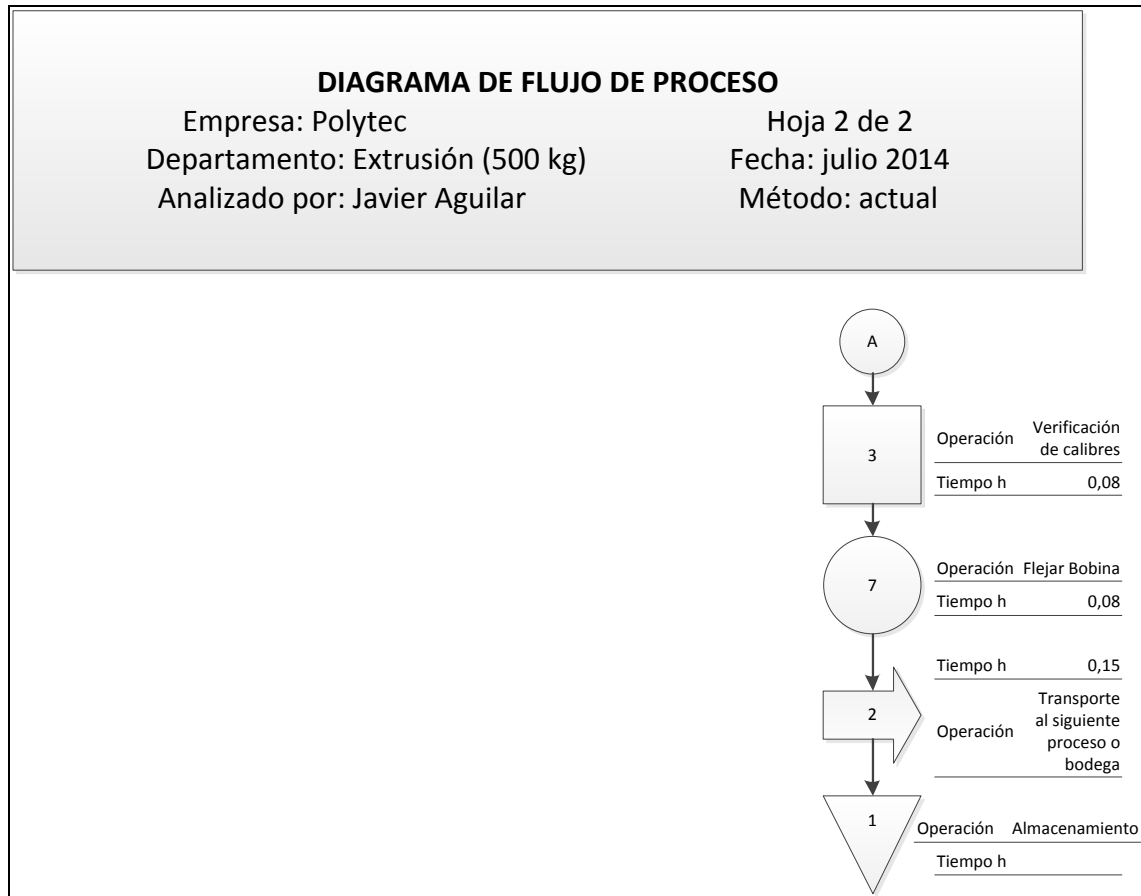
Es una herramienta importante para identificar tiempos de transporte y operaciones que no agregan valor a los productos, a manera de reducirlos o eliminarlos. Realizar un diagrama de flujo para los procesos también ayuda a dar una idea más clara acerca de los pasos para la elaboración de productos.

A continuación se presenta el diagrama de flujo del proceso de extrusión para una orden de 500 kg. El tiempo de dosificación, mezcla y embobinado dependerá de la cantidad de kilos a producir y de la velocidad de la extrusora. Para este diagrama se eligió una velocidad de 25 kg/h, este valor se obtuvo al tomar la lectura de la velocidad lineal del embobinado y el rendimiento de la película de polietileno.

Figura 5. Diagrama de flujo del proceso de extrusión



Continuación de la figura 5.



Fuente: elaboración propia, empleando Visio.

Tabla II. **Resumen de actividades del proceso de extrusión**

RESUMEN			
SÍMBOLO	ACTIVIDAD	CANTIDAD	DURACIÓN (HRS)
	OPERACIÓN	7	21,58
	TRANSPORTE	3	0,35
	INSPECCIÓN	2	0,24
<b>TOTAL</b>		<b>12</b>	<b>22,17</b>

Fuente: elaboración propia.

### 1.8.2. Proceso de impresión

Esta es la segunda etapa por la cual pasa un producto, según las necesidades del cliente, ya que se puede dar el caso en donde el producto pase a otro proceso como *slitter*. Es el proceso en donde la película de polietileno es impresa, este es un proceso importante para el cliente, debido a que es en donde se coloca el diseño, logo o promoción de la empresa.

El cliente solicita determinados tonos de colores y el Departamento de Calidad tiene los mínimos, máximos y estándares de colores para cada plano que el cliente solicita. Impresión es el proceso más complejo de la ruta de un producto y debido a que el presente trabajo de investigación es en torno al proceso de extrusión, únicamente se dará una breve descripción acerca del proceso de impresión.

Para el desarrollo de la imagen que llevará el empaque existe un departamento llamado Preprensa, es el encargado de realizar los diseños que el cliente pide mediante software avanzado. También está encargado de colocar qué colores debe llevar el plano y en qué porcentaje. Por lo general, para identificar, los colores se hacen por *pantones* y su respectivo código.

Realizado esto, existe otro departamento que es el de Montaje, el cual es el encargado de alistar las mangas, *anilox* y sellos que la imagen necesita. Los *anilox* son rodillos que tienen contacto directo con otro rodillo que se encuentra en una bandeja de tinta. El *anilox* es el encargado de aportar el volumen de tinta indicado para una impresión deseada. Los sellos son la imagen diseñada por Preprensa grabada en fotopolímeros, estos van alrededor de una manga o rodillo, el cual es mojado por el *anilox* y los diferentes colores necesarios, la fusión de los tres es colocada sobre la película de polietileno.

Para que la imagen no se deteriore al volverla a embobinar, a la película de polietileno se le da un recorrido de un punto a otro, alrededor de 7 metros entre puntos. Esto es para que la tinta logre secar y que el solvente que lleva pueda evaporarse para que no quede nada sobre la película, ya que con un poco de solvente que quede atrapado sobre la película pueden producirse daños en el alimento a empacar.

Esto se debe a que el solvente no es compatible con el polietileno y al momento en que el solvente migra, lo hace hacia el alimento empacado, resultando en daños al producto y al consumidor final. Actualmente, también existen tintas a base de agua, el único inconveniente de esto es la mala calidad de la imagen en la impresión.

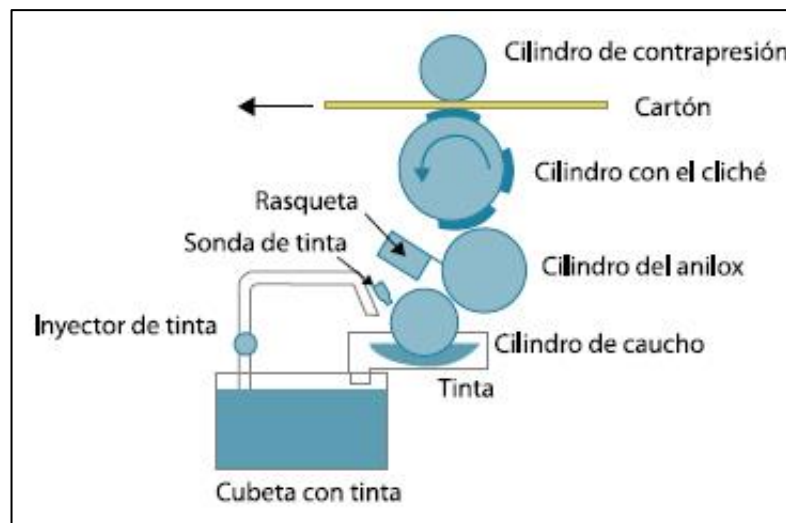


Los diseños pueden necesitar desde 2 colores de tinta, hasta 8 colores de tinta, dependiendo de la combinación de colores, si se necesitan 2 colores, únicamente se utilizarán dos sellos, lo mismo para el diseño de 8 tintas.

Por lo general, una impresión común debe llevar ciertos colores, los cuales son negro, magenta, cian, amarillo y azul, con la combinación de estos se pueden realizar distintos tipos de tonalidades.

Actualmente, Polytec cuenta con 11 impresoras, de las cuales 6 son de 8 colores y el resto son de 6 colores, de tambor central. A continuación se muestra en la figura 5 una impresora flexográfica.

Figura 6. **Proceso de impresión**



Fuente: *Corrugando*. [http://www.corrugando.com/edicion19/foto\\_025.jpg](http://www.corrugando.com/edicion19/foto_025.jpg). Consulta: julio de 2014.

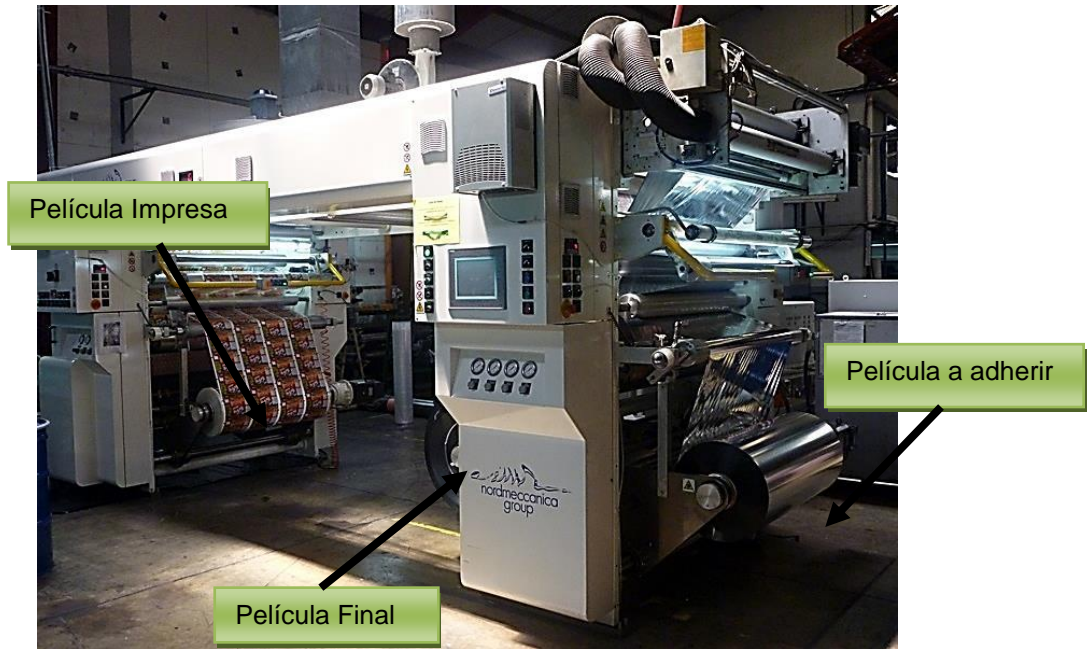
### 1.8.3. Proceso de laminación

La función principal de este proceso es la adhesión de dos películas, ya sea de polietileno (PE), polipropileno (PP) o poliéster (PET). Las laminadoras usadas en Polytec son de tipo *solventless*, lo cual quiere decir que la cantidad de solvente a utilizar es mínima, y lo poco que se utiliza se evapora en el camino hacia el contacto de la otra película.

La principal razón por la cual se laminan las bobinas es por el producto a empacar (*snacks*, galletas, dulces), debido a que necesitan barreras contra la luz, temperatura y humedad. Por lo tanto al adherir dos películas, de cualquier tipo de combinación de los polímeros mencionados anteriormente, se brindan propiedades que evitan que la tinta del polietileno impreso migre hacia el producto, cuando este ya esté empacado.

El solvente y el adhesivo migran hacia afuera una vez laminadas las películas, gracias a la unión de las dos capas de polietileno, a esta migración se le llama etapa de curado. Algunas de las propiedades que brinda laminar los productos son: sellabilidad, barreras al oxígeno, agua o protección al producto o a tintas utilizadas. La figura 5 muestra una de las laminadoras de Polytec.

Figura 7. **Identificación de bobinas en laminadora**

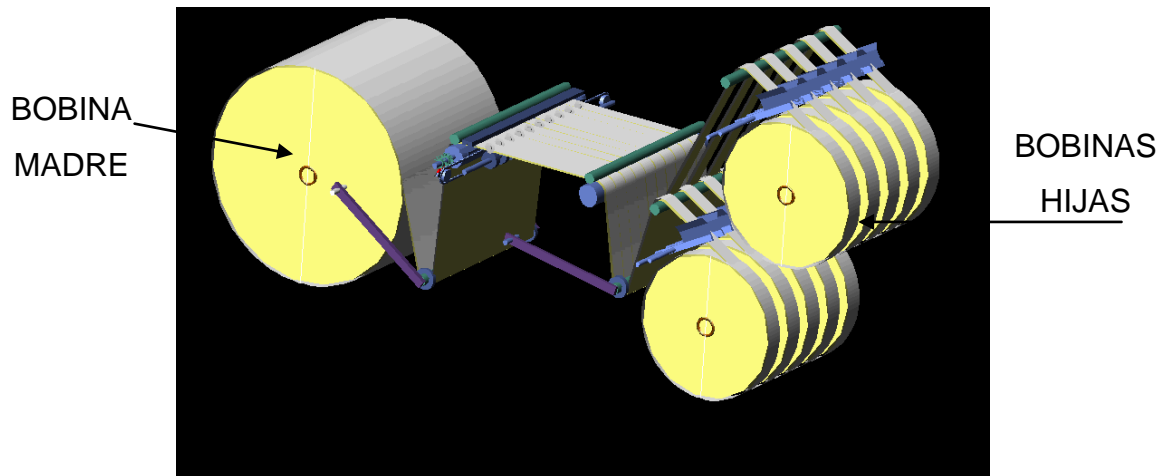


Fuente: *Polytec*. <http://polytec.com.gt/wpcontent/uploads/2012/08/LAMINACION.jpg>. Consulta: julio de 2014.

#### 1.8.4. **Slitter**

Este es el proceso por el cual la bobina más grande (bobina madre) se divide en bobinas más pequeñas (bobinas hijas), según los requerimientos del cliente. Para identificar dichas bobinas se presenta la figura 6.

Figura 8. **Identificación de bobinas en el proceso de *slitter***



Fuente: *Ns-slitter*. [http://www.ns-slitter.co.jp/english/img/e\\_slitter/e\\_slitter.gif](http://www.ns-slitter.co.jp/english/img/e_slitter/e_slitter.gif). Consulta: julio de 2014.

Este proceso también es utilizado para dar la medida solicitada por el cliente. Cuando el polietileno pasa por el proceso de impresión se estira, reduciendo el ancho de la impresión y es por esto que se le debe dar más ancho a la bobina cuando se extruye. Una vez impreso y laminado pasa a *slitter* a quitar ese exceso, convirtiéndolo en desperdicio, el cual posteriormente será reutilizado.

### **1.8.5. Corte**

Este es el proceso más sencillo de los anteriores, en esta etapa únicamente se cortan las bobinas hijas según las dimensiones establecidas por el cliente o por el plano diseñado en el Departamento de Prerensa. En este proceso se generan restricciones en función del calibre de la película, el ancho de la película, maquinaria y las propiedades del sello.

## **2. SITUACIÓN ACTUAL DEL PROCESO DE EXTRUSIÓN**

Existen variaciones en el Departamento de Extrusión debido a las diferentes máquinas que se encuentran en este Departamento. Existen extrusoras con tecnología reciente que poseen sistemas de enfriamiento, controles de temperaturas y velocidades distintas a las extrusoras con tecnología antigua, en las que los controles de temperaturas y velocidades son muy variables y no poseen un sistema de enfriamiento. Debido a la falta de este sistema de enfriamiento se presentan distintos problemas durante el proceso.

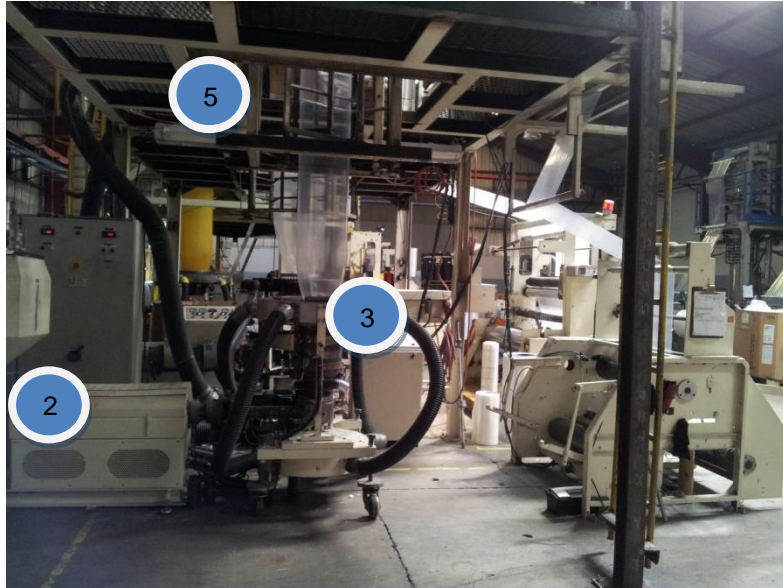
Uno de estos problemas es la variación de calibre de la película de polietileno, este problema consiste en la producción de películas erróneas a causa de la disminución o aumento del calibre, debido a las temperaturas de admisión hacia el anillo de enfriamiento. Si en dado caso la orden de producción solicita una película de polietileno de baja densidad, dicha película debe ser de calibre alto, pero al tener temperaturas altas, se disminuye el calibre, pudiendo provocar la producción de un polietileno por debajo del estándar. Para reducir este problema se pone a funcionar la máquina a velocidades bajas en comparación a su capacidad, dando como resultado bajas eficiencias y variaciones de calibre.

## **2.1. Descripción del equipo**

Polytec cuenta con 23 máquinas en área de extrusión, de las cuales 4 son coextrusoras, y el resto son extrusoras de una capa (monocapa). La diferencia entre las extrusoras y las coextrusoras, radica en que las coextrusoras son capaces de plastificar y estirar tres capas, es decir que con una coextrusora se obtendrá una película con dos capas de los lados, ya sea de baja o alta densidad, y una capa en medio de estas. La importancia de esto se debe a que existen productos que deben tener propiedades de barrera contra la luz, temperatura, humedad y agua, al extruir 3 capas se logra la barrera. La plastificación se da cuando el polietileno se somete altas temperaturas antes de llegar al punto de fusión.

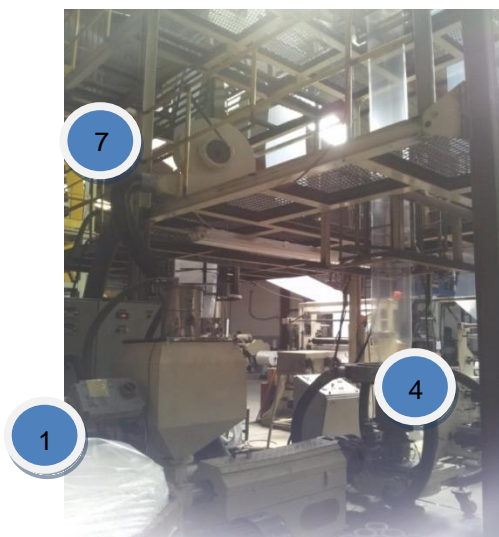
Este trabajo de investigación se enfocará en la extrusora monocapa número 21, debido a la baja eficiencia que presenta en comparación a las otras 22 extrusoras, en las cuales la eficiencia promedio es alrededor del 70 %. La causa de la baja eficiencia en la extrusora 21 se debe a las altas temperaturas que se manejan alrededor de la turbina de admisión y la falta de un sistema de enfriamiento. Las figuras 7, 8 y 9 describen las partes más importantes de la extrusora 21 que se utilizarán a lo largo del trabajo.

Figura 9. Partes de la extrusora 21, vista lateral derecha



Fuente: Departamento de Extrusión.

Figura 10. Partes de la extrusora 21, vista trasera



Fuente: Departamento de Extrusión.

Figura 11. Partes de la extrusora 21, vista frontal



Fuente: Departamento de Extrusión.

A continuación se explicará cada una de las partes de la extrusora 21, las cuales están indicadas en las figuras 7,8 y 9.

- Dosificador y mezclador (1): en esta parte se realiza la mezcla y se verifican los porcentajes de resinas y aditivos, calculados por el Departamento de Investigación y Desarrollo. Se le llama resinas al polietileno en forma granular, dichos gránulos se obtienen de los gases que se capturan al refinar el petróleo a altas temperaturas y presiones.



Los aditivos tienen la misma forma que el polietileno, con la diferencia de que estos cambian las propiedades químicas del polietileno al momento en que se está plastificando. La figura 10 muestra la forma de la resina.

Figura 12. **Forma de las resinas de polietileno**



Fuente: *Alibaba*. [http://i01.i.aliimg.com/photo/v0/113084241/Resin\\_LDPE\\_Recycle.jpg](http://i01.i.aliimg.com/photo/v0/113084241/Resin_LDPE_Recycle.jpg).

Consulta: julio de 2014.

- Tornillo extrusor (2): este es el elemento mecánico de la extrusora encargado de plastificar el polietileno a alrededor de 150 °C. Se encuentra justo después del dosificador, a este punto se le llama etapa de alimentación. Luego de esto viene la etapa de compresión, que es cuando se plástica el PE y, por último, la etapa de transporte que es la encargada de dar al otro elemento mecánico el PE plastificado.
- Anillo de distribución y enfriamiento (3): el anillo de distribución es el encargado de soplar aire por dentro de la burbuja de PE, y el anillo de enfriamiento es el encargado de soplar aire frío por fuera de la burbuja, unidos a estos anillos se encuentran las mangueras que transmiten el aire de la turbina hacia ellos.

- Burbuja (4): es el resultado generado por el soplado de los anillos de distribución y de enfriamiento.
- Canasta (5): la función principal de la canasta es darle estabilidad a la burbuja durante su trayecto, mejorando la uniformidad de las propiedades mecánicas del producto final.
- Rodillos (6): estos son los encargados unificar la burbuja de polietileno y transportarla desde el punto más alto hacia el rodillo de embobinado. Entre más alta sea la extrusora mas rodillos tendrá y mejores serán las propiedades mecánicas, debido a que, la película tendrá suficiente tiempo para que los aditivos migren hacia la superficie de la película antes de llegar a la fase de embobinado.
- Turbina (7): es la encargada de obtener el aire del ambiente y enviarlo hacia los anillos.

## **2.2. Especificaciones técnicas de la maquinaria**

Con el fin de identificar los parámetros con los que fue diseñada la extrusora 21 y compararlos con los parámetros actuales, se presentan las especificaciones técnicas de la maquinaria.

Tabla III. **Especificaciones técnicas de la extrusora 21**

Extrusor	Marca	Modelo	Diámetro tornillo (mm)	Velocidad de tornillo (RPM)	Rodillo Tiro (mm)	Rodillo Bobinador (mm)
21	Matu y Sole S.A	BVC50B NO.100	50	2000	955	950

Fuente: base de datos de Polytec.

Tabla IV. **Especificaciones técnicas del material a extruir**

Extrusor	Material	Capas	Moldes	Rango Calibre (mm)	Ancho Min (pulg)	Ancho min (mm)	Ancho máx. (pulg)	Ancho máx. (mm)
21	Baja Densidad	Monocapa	140	0.010 - 0.180	16	416	37	945

Fuente: base de datos de Polytec.

Tabla V. **Especificaciones accesorios extrusora 21**

Extrusor	Posee Fuelladora	Fuelle min. Pulg	Fuella max. Pulg	Posee Tratador	Bobinadores
21	Si	2	7	Si	2

Fuente: base de datos de Polytec.

La velocidad angular del tornillo extrusor es de 2 000 revoluciones por minuto, brindando velocidades de alrededor de 90 a 95 kg/h, dependiendo de la densidad deseada. Actualmente las velocidades angulares trabajadas van desde las 555 hasta las 1 000 revoluciones por minuto, dando como resultado velocidades de 25 a 40 kg/h. Esta velocidad angular y la velocidad son los indicadores que se desean aumentar, reduciendo la temperatura.

### **2.3. Procedimientos actuales de producción**

Para el proceso de extrusión se obtienen las fórmulas desarrolladas por el Departamento de Investigación y Desarrollo, encargado de generar los porcentajes de resinas, aditivos y pigmentos que se deben mezclar y dosificar en una orden de producción, según las características y propiedades que el cliente ha solicitado. Hecho esto, se llevan las resinas, pigmentos y *masterbatch* necesarios para la producción de las bobinas de polietileno, esta materia es transportada de la bodega de materia prima hacia la extrusora.

Cada materia prima es depositada en un recipiente distinto, luego se programa la dosificadora con base en los porcentajes establecidos en la orden de producción, también se establece la velocidad del tornillo extrusor. Establecidos los parámetros de la máquina, se ajusta la canasta con base en el polietileno a plastificar y se realizan las primeras pruebas.

De la primera película obtenida se verifica el calibre, a modo de saber la densidad, ya que según la densidad se sabrá si se está obteniendo un polietileno de alta o baja densidad. Si en dado caso el calibre es muy alto la densidad será baja y si el calibre es bajo utilizando resina de baja densidad, la película no será lo suficientemente resistente. Los rangos de densidades que Polytec maneja se presentan en la tabla VI.

Tabla VI. **Densidades del polietileno**

<b>Polietileno</b>	<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>
Baja	0.910-0.925
Media	0.926-0.940
Alta	0.940-0.965

Fuente: base de datos de Polytec.

El operario de la extrusora mide con un micrómetro el calibre de la película y mediante la siguiente ecuación obtiene la densidad:

$$Densidad = \left( \frac{\text{rendimiento de PE}}{\text{calibre} * \text{ancho de película}} \right) * 1000$$

Con dicha ecuación, el operario encuentra la densidad y si en dado caso el valor de la densidad calculada está dentro del rango de la densidad deseada, la película cumplirá con las propiedades de resistencia. De lo contrario, el operario ajusta la velocidad de tal manera que el calibre sea menor y la densidad aumente.

En la ecuación de densidad se logra observar que el calibre es inversamente proporcional a la densidad, es por esto que el aumento del calibre disminuye la densidad y viceversa.

Este procedimiento puede variar según la hora y la estación del año, debido a que en la mañana el clima es más fresco, entonces la velocidad de la extrusora se puede aumentar y a medio día se debe bajar la velocidad de la extrusora, ya que la temperatura ambiente aumenta. Este aumento de temperatura ocasiona una inestabilidad en la burbuja plastificada, dando como resultado variaciones en el calibre de la película.

Este tiempo de preparación de la máquina toma alrededor de 30 minutos. Al tener la velocidad indicada para obtener la densidad deseada, se deja correr la extrusora hasta que se lleguen a la cantidad de kilos y bobinas solicitadas por el cliente.

#### **2.4. Materias primas**

Las materias primas utilizadas en este proceso son las siguientes:

- Polietileno (PE): polímero que se trata para obtener un polietileno de baja o alta densidad.
- Agentes de deslizamiento: este es un *masterbatch* que sirve para proporcionar el deslizamiento entre dos capas de PE. Por ejemplo, cuando se deslizan con los dedos las bolsas del supermercado, ese deslizamiento entre las caras de la bolsa es dado por este aditivo. El exceso de este aditivo en mezcla puede causar bloqueo, es decir que el uso en exceso no permitirá el deslizamiento, sino que pegará las caras del PE.

- **Antibloqueo:** este aditivo sirve para evitar el bloqueo una vez que la bobina ha sido extruida. Debido a que este aditivo no es compatible con el PE, migra una vez terminado el proceso de extrusión hacia la superficie, creando una capa deslizante entre en toda la bobina. Al igual que con los agentes de deslizamiento, el utilizar en exceso el antibloqueo puede crear películas demasiado lisas y brillantes, provocando que la bobina se pegue o genere bloqueo.
- **Antioxidantes:** es un aditivo que evita la oxidación del material, este se usa ya que las bobinas al estar almacenadas en una bodega están expuestas a la humedad y este aditivo evita el contacto con dicha humedad.
- **Antifog:** este es un aditivo que evita la creación de partículas condensadas en la película.
- **Ayuda de proceso:** este aditivo se utiliza para mejorar la procesabilidad del PE. Esto se da más en el PE de alta densidad ya que el PE de baja es de fácil procesabilidad, debido a que tiene un índice de fluidez más alto que la resina de alta densidad. El índice de fluidez del PE se mide en gramos por cada diez minutos, el cual se define como la cantidad de material que fluye a través de un orificio de un dado capilar en 10 minutos.

El índice de fluidez depende la viscosidad del PE, por consiguiente el PE de alta densidad es más viscoso que el de baja densidad. La ventaja de este aditivo es que tiene un alto grado de migración y al momento de tener contacto con el tornillo extrusor se adhiere a las paredes metálicas, formando una pared de deslizamiento y facilitando el flujo del PE plastificado a lo largo de todo el tornillo.

## 2.5. Velocidades

Las velocidades a las cuales se corre la extrusora 21 dependen del material a extruir, sobre todo del calibre y temperatura. Actualmente, el rango de velocidades a las cuales se corre dicha extrusora es de 500 a 900 RPM. Para obtener la velocidad lineal a la cual sale la película extruida se utiliza un tacómetro, como el que se muestra en la figura 11.

Figura 13. **Tacómetro utilizado para medir la velocidad lineal del embobinado**



Fuente: *Instrumentación hoy*.

<http://www.instrumentacionhoy.com/imagenes/2012/10/Tac%C3%B3metro-digital.jpg>. Consulta: julio de 2014.



Para obtener la velocidad lineal, se coloca la rueda del tacómetro en la bobina que está siendo extruida y, al momento en que uno de los puntos de la rueda tiene contacto con la rotación de la bobina, despliega en la pantalla los metros por minuto, mediante la relación de las revoluciones por segundo y el radio de la rueda del tacómetro.

Las velocidades lineales que se obtienen son de 7 a 20 m/min, con base en estas lecturas y el rendimiento del PE por kilogramo es que se logra obtener la velocidad del producto mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Caudal} = \text{rendimiento PE} * \text{Velocidad lineal} * \text{Factor } 0,06$$

El factor de 0,06 es un factor obtenido para que los operarios realicen los cálculos de una manera sencilla. Las unidades del caudal obtenido son kilogramos por hora y las velocidades que se manejan en la extrusora son de 25 a 40 kg/h. Esta es la información que servirá de comparación para la propuesta que se basa en aumentar en un 33 % los caudales actuales y, por consiguiente, aumentar la eficiencia de la extrusora, que se encuentran en un 40 % en comparación a las demás extrusoras que se encuentran en alrededor del 70 %.

## 2.6. Temperaturas

Las temperaturas que se generan en esta extrusora son altas, no solo en la máquina, sino también en el ambiente, y la principal causa es la falta de un sistema de enfriamiento en el anillo extrusor. La temperatura ambiente que existe en el área es alrededor de 33 °C, esto genera fatigación, estrés, mareos, hasta desmayos. Entre los antecedentes de accidentes en dicha área se ha presentado una lipotomía, que es un desmayo breve por trabajar a altas temperaturas.

Aunque la ventilación en dicha área es buena, al momento de estar cerca de la extrusora, el ambiente cambia drásticamente, por lo que el operario al estar expuesto a dicha extrusora empieza a sentir los síntomas descritos anteriormente. Las temperaturas a las cuales se trabaja en la extrusora son las que se describen en la siguiente tabla:

Tabla VII. **Temperatura elemento mecánicos**

<b>Elemento</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
<b>Anillo de enfriamiento</b>	45,68
<b>Anillo de distribución</b>	54,82
<b>Compresión tornillo</b>	56,90
<b>Tornillo extrusor</b>	156,70

Fuente: elaboración propia.

Estas temperaturas se obtuvieron mediante un medidor de temperatura digital láser, el cual se apunta a puntos identificados en cada uno de los elementos descritos en la tabla VII. La figura 12 muestra el medidor de temperatura que se utilizó.

Figura 14. **Medidor de temperatura láser**



Fuente: Cedesa. <http://www.cedesa.com.mx/imagenes/productos/1/lightbox/fluke-63.jpg>.

Consulta: julio de 2014.

La distancia a la cual debe ser tomada la lectura es de 30 cm, según el fabricante. Este es un aspecto importante a tomar en cuenta debido a que si la lectura se hace a una distancia mayor, el medidor tomará parte de la temperatura ambiente, dando como resultado datos erróneos.

La falta de un sistema de refrigeración en la extrusora 21 es fácil de notar, ya que en las extrusoras que poseen dicho sistema la temperatura ambiente es alrededor de 22 °C y las velocidades, tanto lineales como angulares, son bastante altas en comparación a las de la extrusora 21.

## **2.7. Calibres de películas**

En Polytec se trabajan diferentes calibres, dependiendo de los requerimientos del cliente. Los calibres pueden variar desde 15 hasta 150 micras, entre más calibre exista, se obtendrá un material de menor densidad.

Para el producto agroindustrial en donde se necesita un calibre bastante alto, se ajustan las máquinas a modo de tener PE de baja densidad, pero estos productos únicamente pueden ser elaborados en las extrusoras de mayor tamaño, debido a que el ancho que solicita el cliente es bastante grande y la extrusora 21 únicamente puede producir anchos de hasta 1 700 mm. Por consiguiente, también existen restricciones acerca del calibre a utilizar, actualmente se utilizan calibres desde 25 hasta 80 micras, es decir que se obtienen PE de alta y baja densidad. Para determinar la densidad del material extruido se realiza mediante la ecuación de densidad descrita anteriormente.

## **2.8. Análisis del desempeño**

Con el objetivo de identificar la situación actual y tener una base de comparación para la propuesta, se detallan los aspectos más importantes que influyen en el proceso de producción de la extrusora 21, como los estándares de calidad y las eficiencias actuales.

Estos aspectos son importantes debido a los problemas que se presentan en los procesos posteriores a la extrusión. Uno de los más importantes son los rechazos por parte de los demás departamentos, generando desperdicio, el cual es reutilizado en el Departamento de Reciclado por medio de una peletizadora que somete a altas temperaturas las películas de polietileno, a modo de conseguir de nuevo la resina de polietileno.

El problema de someter el material al proceso de peletizado debido a problemas de calidad es la pérdida de horas de producción, una baja OEE (es decir una baja calidad, eficiencia y disponibilidad), el material reprocesado no adquiere las mismas propiedades que un material virgen, retrasos en la entrega de pedidos para el cliente, tiempo perdido por reprogramación de la producción y tiempo perdido por la supervisión y jefatura.

### **2.8.1. Estándares de calidad**

En Polytec existen distintos tipos de defectos de calidad que se presentan en las películas y estos dependerán de diversos factores. Los defectos dependerán del departamento que se esté analizando, para este trabajo de investigación se analizarán los del Departamento de Extrusión, algunos de estos son:

- Apariencia
- Arrugas
- Bloqueo
- Calibre
- COF
- Contaminación
- Grumos
- Mal embobinado
- Pruebas de materia prima

Al tomar muestras de la película de polietileno de la extrusora 21, se obtienen valores de calibre cercanos al límite inferior y otros fuera de este límite, como se muestra en la figura 14 que son las muestras de una película de baja densidad. Al tener valores cercanos al límite inferior se corre el riesgo de plastificar polietileno de baja densidad con propiedades deficientes, como baja resistencia al rasgado, elongación, tensión y brillo.

Lo que define el calibre de una película de polietileno en una extrusora es la estabilidad de la burbuja, dicha estabilidad se logra mediante el soplado del anillo de enfriamiento a bajas temperaturas, el cual es un sistema que la extrusora 21 no posee. Es por esto que los valores de las muestras se encuentran cerca de los límites inferiores, por lo tanto, para lograr que el calibre se encuentre por el límite central, se debe disminuir la temperatura de admisión al anillo de enfriamiento.

Los estándares de calibre son determinados por una máquina de calibre de espesor digital, el cual sigue la norma del Organismo de Normalización de los Estados Unidos de América que establece los procedimientos para determinar espesores de varios tipos de materiales, como aislantes eléctricos sólidos, polietilenos, polipropilenos y poliéster (ASTM D374). La siguiente imagen muestra la máquina de calibre de espesor digital para los calibres.

Figura 15. Máquina de calibre de espesores



Fuente: *Direct industry*. [http://img.directindustry.es/images\\_di/photo-m/calibres-espesor-digitales-58198-3789079.jpg](http://img.directindustry.es/images_di/photo-m/calibres-espesor-digitales-58198-3789079.jpg). Consulta: julio de 2014.

De una película de polietileno se tomaron 4 muestras por hora para verificar el comportamiento del calibre a lo largo del tiempo de producción y así poder comparar los límites de especificación y los límites de control del proceso. Los resultados fueron los que se muestran en la tabla VIII.

Tabla VIII. **Muestras para prueba de calidad 1**

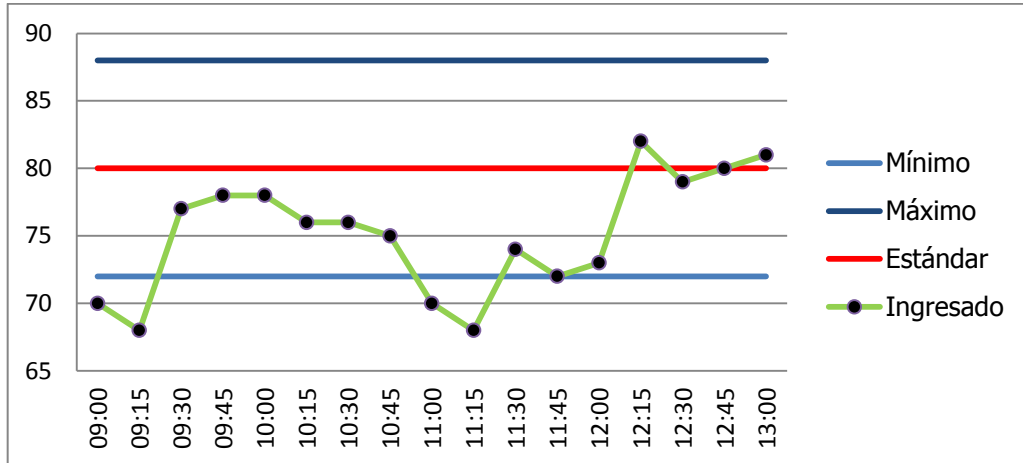
<b>Corrida</b>	208558
<b>Proceso</b>	Extrusión
<b>Extrusora</b>	21

Tipo de análisis	Evaluación	Método	Mínimo	Estándar	Máximo	Ingresado	Hora
Análisis crítico	Calibre	ASTMD374	72	80	88	70	09:00
Análisis crítico	Calibre	ASTMD374	72	80	88	68	09:15
Análisis crítico	Calibre	ASTMD374	72	80	88	77	09:30
Análisis crítico	Calibre	ASTMD374	72	80	88	78	09:45
Análisis crítico	Calibre	ASTMD374	72	80	88	78	10:00
Análisis crítico	Calibre	ASTMD374	72	80	88	76	10:15
Análisis crítico	Calibre	ASTMD374	72	80	88	76	10:30
Análisis crítico	Calibre	ASTMD374	72	80	88	75	10:45
Análisis crítico	Calibre	ASTMD374	72	80	88	70	11:00
Análisis crítico	Calibre	ASTMD374	72	80	88	78	11:15
Análisis crítico	Calibre	ASTMD375	72	80	88	77	11:30
Análisis crítico	Calibre	ASTMD376	72	80	88	79	11:45
Análisis crítico	Calibre	ASTMD377	72	80	88	78	12:00
Análisis crítico	Calibre	ASTMD378	72	80	88	82	12:15
Análisis crítico	Calibre	ASTMD379	72	80	88	79	12:30
Análisis crítico	Calibre	ASTMD380	72	80	88	80	12:45
Análisis crítico	Calibre	ASTMD381	72	80	88	81	13:00

Fuente: elaboración propia.

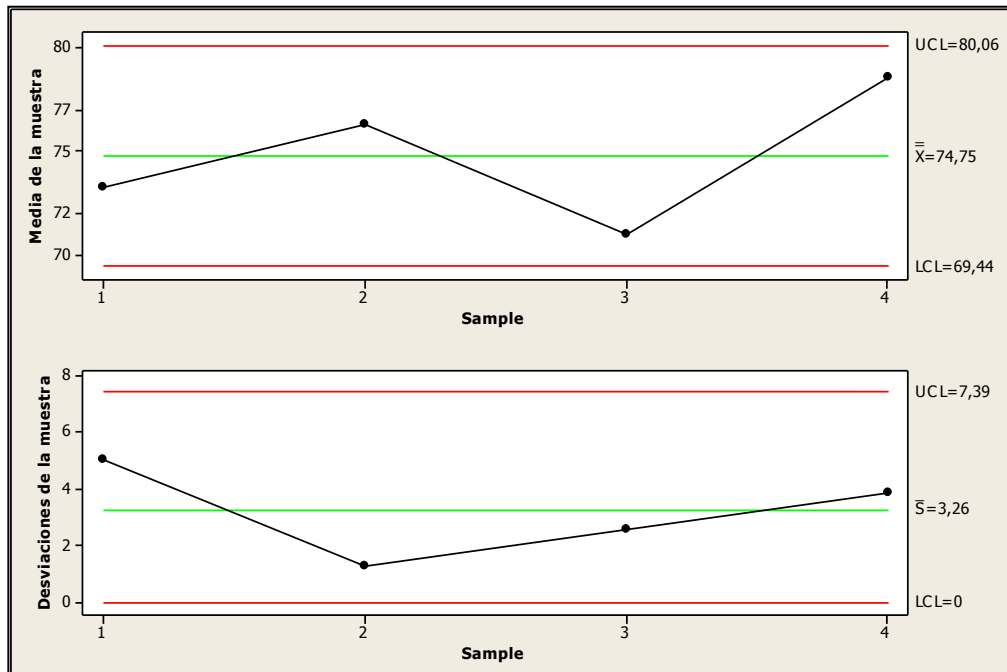


Figura 16. Estándares de calidad, 1



Fuente: elaboración propia.

Figura 17. Límites de control



Fuente: elaboración propia.

Al observar la figura 14 se puede notar que existen puntos que salen del límite inferior de especificación, en las primeras dos muestras y en la muestras de las 11:00 am a las 12:00 am. Aun así, se puede apreciar en la figura 15 que el proceso se encuentra bajo control, debido a que no hay ningún punto fuera de los límites de control, es importante observar el comportamiento de las medias con respecto a las desviaciones estándar.

Para el primero punto se logra identificar que la primera media está cerca del valor de 73,25, el cual todavía es un punto dentro de los límites de especificación, aún así la desviación estándar para ese punto es de  $\pm 5$ , por lo que cualquier pequeño cambio durante esa primera hora puede ocasionar un punto fuera de los límites de control y de especificación.

El segundo punto es un punto deseable, debido a que se encuentra muy cercano a la media con un valor de 76,25, y una desviación estándar de 1,25, dando como resultado un punto con poca variación, por lo que durante esa hora se establece que el proceso estuvo bajo control. Aún así hubo muy pocos valores que estuvieron en el estándar solicitado con número 80, por lo cual se puede decir que el proceso de extrusión en la extrusora 21 se encuentra bajo control, pero no se encuentra centrado con respecto al estándar establecido por el cliente. Para centrar el proceso es importante abordar la variable que origina que el proceso no esté centrado y tenga variaciones de calibre, la cual es la temperatura.

Este es un punto crítico debido a que en la gráfica la mayoría de los puntos del calibre ingresados se encuentran por debajo del límite central, y esto quiere decir que cualquier cambio pequeño en la temperatura podría empezar a generar variaciones en el calibre por debajo del punto de especificación.

Se analizó otra orden de producción para verificar el comportamiento de la calidad en el calibre, los datos se muestran en la tabla IX y en la figura 16.

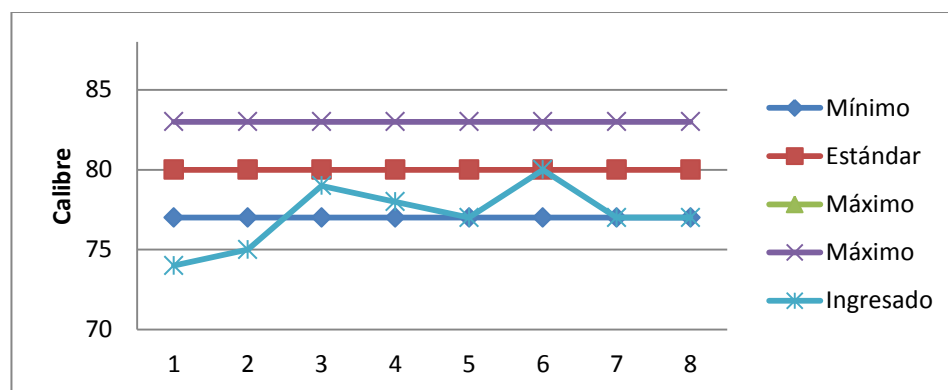
Tabla IX. **Muestras para prueba de calidad 2**

<b>Corrida</b>	208558
<b>Proceso</b>	Extrusión
<b>Extrusora</b>	21

Tipo de Análisis	Evaluación	Método	Mínimo	Estándar	Máximo	Ingresado	No. Muestra
Análisis crítico	Calibre	ASTMD374	77	80	83	74	1
Análisis crítico	Calibre	ASTMD374	77	80	83	75	2
Análisis crítico	Calibre	ASTMD374	77	80	83	79	3
Análisis crítico	Calibre	ASTMD374	77	80	83	78	4
Análisis crítico	Calibre	ASTMD374	77	80	83	77	5
Análisis crítico	Calibre	ASTMD374	77	80	83	80	6
Análisis crítico	Calibre	ASTMD374	77	80	83	77	7
Análisis crítico	Calibre	ASTMD374	77	80	83	77	8

Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Estándares de calidad prueba 2**



Fuente: elaboración propia.

Mediante la recolección de la segunda muestra, se logra concluir que el comportamiento es el mismo, se mantiene muy cerca del límite inferior, y esto se debe a que las temperaturas que se manejan en el anillo extrusor alteran la película ya plastificada. La causa de esto es que el anillo debe de enviar aire frío a la burbuja de PE, a modo de darle estabilidad y controlar el calibre y, por consiguiente, evitar que el PE posea baja resistencia. Pero la misma temperatura que provoca la plastificación del PE se disipa en el ambiente, provocando que la turbina, que es la encargada de enviar el aire al anillo extrusor, absorba toda esta temperatura caliente y sea enviada al anillo.

En otras palabras, la turbina que envía aire al anillo de enfriamiento debería de enviarlo frío, pero envía el aire del ambiente y, debido a las temperaturas a las cuales trabaja la extrusora que transmite calor por radiación, se obtiene que el aire que envía la turbina al anillo es caliente.

Todos los puntos que se encuentran fuera de los límites son desechados, al tener este tipo de desperdicio el costo del producto aumenta, debido a que es pesado y reportado por los operarios en el sistema con la finalidad de ser incluido en los costos de los productos.

## **2.9. Eficiencias actuales**

Para el cálculo de las eficiencias se toman en cuenta los tiempos que Polytec ha establecido según sus 25 años de experiencia, para restarlos del tiempo disponible total, el tiempo disponible total son las horas que tiene cada turno. Actualmente, en el proceso de extrusión hay doble turno de lunes a sábado, por lo tanto el tiempo disponible es de 24 horas al día sin tomar en cuenta el día domingo. Los tiempos restados del tiempo total son los siguientes:

- Cambios: es el tiempo que se tarda el operario en poner a funcionar a máquina cuando realiza un cambio de pedido.
- Tiempo de cuadro: es el tiempo que el operario tarda en cuadrar y establecer los parámetros de la máquina, es decir, en tomar las primeras muestras para verificar que el calibre sea el adecuado, establecer las velocidades, la temperatura y ajustes de máquina.
- Sin carga: este es el tiempo que se da, debido a problemas de bodega de materia prima, ya sea que no enviaron la resina indicada, la cantidad de resina solicitada, en general, el tiempo que la máquina está parada a causa de otras áreas.
- Deducciones: en este tiempo se toman en cuenta factores como el mantenimiento de la máquina, paros por fallos de energía, ingreso de un pedido urgente solicitado por un vendedor, entre otros.

Para la extrusora 21 se hizo el análisis del período 1 de junio de 2014 hasta el 24 de junio de 2014. Los tiempos reportados se muestran en la tabla X.

Tabla X. **Tiempos muertos**

<b>TIEMPOS MUERTOS REPORTADOS</b>				
<b>Extrusora</b>		21		
<b>Día</b>	<b>Deducciones (h)</b>	<b>Cambios (h)</b>	<b>T. Sin Carga (h)</b>	<b>T. cuadro (h)</b>
03-jun	0	1	0	0.5
04-jun	0	1	0	0.5
05-jun	0	1	0	0.5
09-jun	0	1	0	0.5
14-jun	2	0	0	0
16-jun	0	1	0	0.5
20-jun	0	1	0	0.5

Fuente: elaboración propia.

Para el cálculo de eficiencia de la máquina, se procedió a restar los tiempos de muertos del tiempo disponible. En la tabla XI se muestran las eficiencias de la extrusora, los días domingos no se encuentran en esta tabla debido a que ese día no se trabaja, la velocidad establecida es de 85 kg/h, aunque la establecida por el fabricante es de 100 kg/h, se utiliza la velocidad de 85 kg/h para que la máquina no trabaje a su máxima carga. El cálculo para el día tres se hizo de la siguiente manera:

$$\textit{T tiempo disponible} = 24 \textit{ hrs} - \textit{tiempos muertos}(1,5) = 22,5$$

$$\textit{Producción teórica} = \textit{velocidad máquina} * \textit{tiempo disponible}$$

$$\textit{Producción teórica} = \left(90 \frac{\textit{kg}}{\textit{h}}\right) (22,5\textit{h}) = 1\ 912,5 \textit{ kg}$$

*Producción real*

= kg pesados y reportados al finalizar la orden de producción

$$Eficiencia = \frac{Producción\ real}{Producción\ teórica} * 100 = \frac{1\ 028}{1\ 912,5} * 100 = 54\ %$$

Tabla XI. **Eficiencias extrusora, junio 2014**

EFICIENCIAS 2 JUNIO AL 24 DE JUNIO						
Día	Velocidad (kg/h)	Producción teórica (kg)	Producción Real (kg)	Tiempo total	Eficiencia	Diferencia
2	85	2 040	796	24	39 %	61 %
3	85	1 912,5	1 028	22,5	54 %	46 %
4	85	1 912,5	668	22,5	35 %	65 %
5	85	1 912,5	905	22,5	47 %	53 %
6	85	2 040	859	24	42 %	58 %
7	85	2 040	772	24	38 %	62 %
9	85	1 912,5	809	22,5	42 %	58 %
10	85	2 040	856	24	42 %	58 %
11	85	2 040	794	24	39 %	61 %
12	85	2 040	777	24	38 %	62 %
13	85	2 040	827	24	41 %	59 %
14	85	1 870	587	22	31 %	69 %
16	85	1 912,5	569	22,5	30 %	70 %
17	85	2 040	627	24	31 %	69 %
18	85	2 040	627	24	31 %	69 %
19	85	2 040	617	24	30 %	70 %
20	85	1 912,5	614	22,5	32 %	68 %
21	85	2 040	553	24	27 %	73 %
23	85	2 040	556	24	27 %	73 %
24	85	2 040	830	24	41 %	59 %
<b>MEDIA</b>					<b>37 %</b>	<b>63 %</b>


Fuente: elaboración propia.

Al observar los datos obtenidos durante junio, se pudo notar que la media de la eficiencia de la máquina se encuentra alrededor de un 40 % y las diferencias entre la producción real y la teórica se encuentran dentro de un 60 %, por lo tanto el 60 % de la capacidad de la máquina no se está utilizando.

## 2.10. Recolección de datos actuales

A modo de establecer ecuaciones y pronosticar el comportamiento de la producción a través del tiempo en función de indicadores como el calibre, temperatura y velocidad del tornillo extrusor, se tomaron muestras de dichos indicadores utilizando un medidor de temperatura láser y un tacómetro. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla XII.

Tabla XII. Registro de datos en extrusora 21

		Depto: Extrusión											Máquina: Ext-21 Molde 140			
REGISTRO DE DATOS																
Datos Orden				Temperaturas Anillo Enfriamiento				Temperatura Distribuidor				Velocidades		Variables		
Orden	Corrida	kg/1000	Ancho película sencilla	Calibre	1	2	3	4	5	6	7	8	RPM	m/min	Densidad	Caudal (kg/h)
79 764	208 556	60,4176	820	80	45,4	44,8	48,8	52	51,4	51,4	53	55,5	555	7,1	0,9210000	25,74
79 764	208 556	60,4176	820	80	45	42,1	45,4	47	48,1	48,1	51	52,2	559	7	0,9210000	25,38
79 764	208 556	60,4176	820	80	42,8	42,7	44,3	45,7	46,6	47,2	49,2	50,7	560	7,2	0,9210000	26,10
79 764	208 556	60,4176	820	80	45,2	42,1	48,6	49	46,8	48	50	51,5	563	7,2	0,9210000	26,10
79 764	208 556	60,4176	820	80	39,7	40,5	47,6	46,1	45	45,2	47,6	51,8	565	7	0,9210000	25,38
80 407	211 318	56,1442	762	80	41,8	43,8	44,4	45,8	41,2	41,4	43,2	46	608	7,5	0,9210007	25,26
80 407	211 318	56,1442	762	80	45,2	50,8	50	46,6	44,8	45,2	46,6	49	608	7,4	0,9210007	24,93
80 407	211 318	56,1442	762	80	41,4	41,6	44,2	43	41	42	43	45,2	608	7,9	0,9210007	26,61
80 975	212 249	33,0545	1 016	35,28	43,3	44,4	47,2	47,6	47,2	47	48,5	52,8	746	16,6	0,9221643	32,92
80 975	212 249	33,0545	1 016	35,28	41,6	49,8	50,2	42	41,4	41,8	43,2	46	755	16,2	0,9221643	32,13
79 723	208 465	36,1638	1 320	29	46,6	50	56,6	49,4	47,8	48,4	51,2	54,8	776	18	0,9447179	39,06
80 975	212 249	33,0545	1 016	35,28	43,4	45,4	46,6	47,7	42,4	42,6	44,4	45,6	788	17,3	0,9221643	34,31
80 975	212 249	33,0545	1 016	35,28	44,4	45,4	53,4	48,4	45,2	46,2	47,4	50,2	788	17,5	0,9221643	34,71



Continuación de la tabla XII.

79 728	208 468	35,5338	1 320	29	43,6	44,8	46,6	47,6	43,8	43,6	46,6	48,4	798	17,7	0,9282602	37,74
79 728	208 468	35,5338	1 320	29	45,4	47,4	48,8	48,6	45,6	46,2	48,6	50,4	800	17,7	0,9282602	37,74
79 723	208 465	36,1638	1 320	29	47,8	51	57,6	49,6	47,8	48,6	50,2	52,2	805	18	0,9447179	39,06
79 723	208 465	36,1638	1 320	29	44,2	46	56,4	46,4	44,2	44,8	46,4	49	812	18	0,9447179	39,06
80 975	212 249	33,0545	1 016	35,28	44,4	45,4	53,4	48,4	45,2	46,2	47,4	50,2	910	20,2	0,9221643	40,00
79 764	208 556	60,4176	820	80	45,4	44,8	48,8	52	51,4	51,4	53	55,5	555	7,1	0,9210000	25,74
79 764	208 556	60,4176	820	80	45	42,1	45,4	47	48,1	48,1	51	52,2	559	7	0,9210000	25,38
79 764	208 556	60,4176	820	80	42,8	42,7	44,3	45,7	46,6	47,2	49,2	50,7	560	7,2	0,9210000	26,10
79 764	208 556	60,4176	820	80	45,2	42,1	48,6	49	46,8	48	50	51,5	563	7,2	0,9210000	26,10
79 764	208 556	60,4176	820	80	39,7	40,5	47,6	46,1	45	45,2	47,6	51,8	565	7	0,9210000	25,38
80 407	211 318	56,1442	762	80	41,8	43,8	44,4	45,8	41,2	41,4	43,2	46	608	7,5	0,9210007	25,26
80 407	211 318	56,1442	762	80	45,2	50,8	50	46,6	44,8	45,2	46,6	49	608	7,4	0,9210007	24,93
80 407	211 318	56,1442	762	80	41,4	41,6	44,2	43	41	42	43	45,2	608	7,9	0,9210007	26,61
80 975	212 249	33,0545	1 016	35,28	43,3	44,4	47,2	47,6	47,2	47	48,5	52,8	746	16,6	0,9221643	32,92
80 975	212 249	33,0545	1 016	35,28	41,6	49,8	50,2	42	41,4	41,8	43,2	46	755	16,2	0,9221643	32,13
79 723	208 465	36,1638	1 320	29	46,6	50	56,6	49,4	47,8	48,4	51,2	54,8	776	18	0,9447179	39,06
80 975	212 249	33,0545	1 016	35,28	43,4	45,4	46,6	47,7	42,4	42,6	44,4	45,6	788	17,3	0,9221643	34,31
80 975	212 249	33,0545	1 016	35,28	44,4	45,4	53,4	48,4	45,2	46,2	47,4	50,2	788	17,5	0,9221643	34,71
79 728	208 468	35,5338	1 320	29	43,6	44,8	46,6	47,6	43,8	43,6	46,6	48,4	798	17,7	0,9282602	37,74
79 728	208 468	35,5338	1 320	29	45,4	47,4	48,8	48,6	45,6	46,2	48,6	50,4	800	17,7	0,9282602	37,74
79 723	208 465	36,1638	1 320	29	47,8	51	57,6	49,6	47,8	48,6	50,2	52,2	805	18	0,9447179	39,06
79 723	208 465	36,1638	1 320	29	44,2	46	56,4	46,4	44,2	44,8	46,4	49	812	18	0,9447179	39,06
80 975	212 249	33,0545	1 016	35,28	44,4	45,4	53,4	48,4	45,2	46,2	47,4	50,2	910	20,2	0,9221643	40,00

Fuente: elaboración propia.

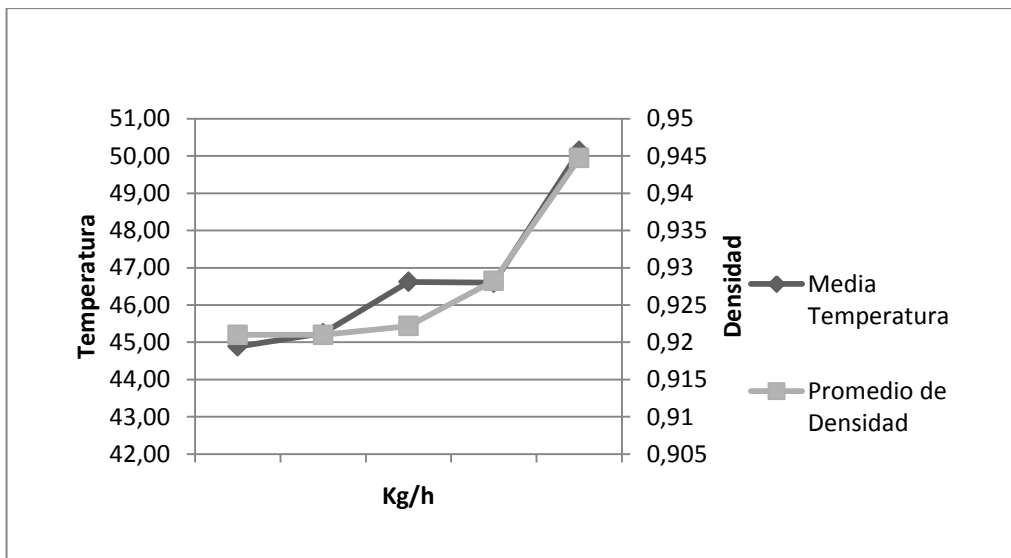
Para lograr ver el comportamiento entre los indicadores de densidad, caudal y temperatura se muestra el resumen de la tabla anterior en la tabla XIII.

Tabla XIII. **Comportamiento de indicadores**

Orden	Corrida	Promedio de densidad	Promedio de velocidad (kg/h)	Media temperatura	Promedio de RPM
80407	211318	0,921000656	25,60	44,88	608,00
79764	208556	0,921000000	25,74	45,24	560,40
80975	212249	0,922164305	34,81	46,62	797,37
79728	208468	0,928260188	37,74	46,60	799,00
79723	208465	0,944717868	39,06	50,13	797,67

Fuente: elaboración propia.

Figura 19. **Comportamiento de indicadores**



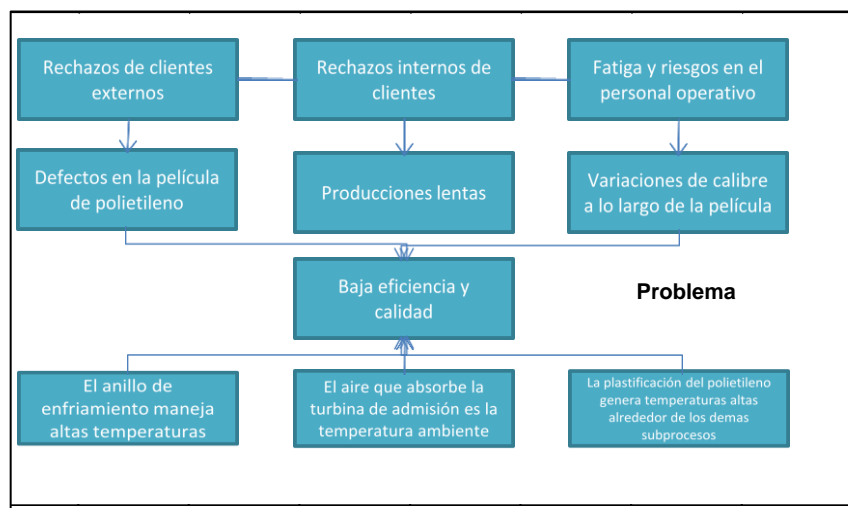
Fuente: elaboración propia.

En resumen, se observa una relación entre el caudal y la temperatura, entre más se eleve la temperatura, así incrementará el caudal, pero afectan otros indicadores como la densidad y por consiguiente el calibre. Al tener un sistema de enfriamiento, la temperatura se mantiene constante, controlando el calibre de la burbuja de polietileno y convirtiendo los kilogramos por hora independientes de la densidad, dando como resultado las mismas densidades a velocidades más altas, incrementando la eficiencia y calidad.

### 2.11. Diagrama de árbol

Debido a la baja eficiencia y calidad de la extrusora 21, se genera una cadena problemas que afectan a otros departamentos, es por esto que es importante establecer las causas del problema para determinar soluciones. En el siguiente diagrama de árbol se muestran los efectos y causas de la baja eficiencia y calidad, que es el problema central en la extrusora 21.

Figura 20. Diagrama de árbol extrusión



Fuente: elaboración propia.

Mediante el diagrama de árbol, se observa que las 3 causas se relacionan con las altas temperaturas que se manejan alrededor de la extrusora, y los efectos se relacionan con la eficiencia y calidad. Es por esto que surge la importancia del diseño de un intercambiador de calor para aumentar la calidad y eficiencia en la extrusora 21. En el capítulo 3 se detallarán las causas principales de las variaciones de calibre y todos los posibles remedios para esto.

### **3. PROPUESTA PARA EL INCREMENTO DE EFICIENCIA Y CALIDAD**

Con base en la información del capítulo dos, se establece una propuesta con el fin de satisfacer las necesidades, tanto de producción como de calidad. Para esto se determinará cuál es el defecto más recurrente en las películas de polietileno y en qué máquina se presenta. Determinado este factor, se definirá la causa raíz que lo ocasiona y la mejor solución para el mismo.

#### **3.1. Definición y análisis de la magnitud del problema**

Al obtener el producto final de la extrusión, es decir las películas de polietileno, se presentan diferentes tipos de características físicas y mecánicas que se muestran en la tabla XIV, las cuales deben cumplir con los parámetros establecidos por el cliente.

Cuando alguna de las características del producto no cumple con los parámetros del cliente, se establece que hay un defecto en la película. Por ejemplo, el cliente solicita un rollo de polietileno de 35 micras de calibre con un máximo permitido de 40 micras y un mínimo de 30 micras. Si de la extrusión se obtienen calibres de 45 micras, existe un defecto por calibre en el rollo solicitado.

Abordar todas las causas de los defectos de la tabla XIV en las películas de polietileno es una práctica que se debe realizar de una manera gradual y para esto se utilizará la herramienta del diagrama de Pareto, con el fin de identificar el defecto de mayor recurrencia.

Para la construcción del diagrama, se obtuvo de la base de datos de calidad la cantidad total de defectos que existen en el Departamento de Extrusión. La tabla XIV muestra en la primera columna el defecto y en la segunda la cantidad de veces que este ha ocurrido durante el año 2014. La tercera y cuarta sirven para identificar el 80/20.

Tabla XIV. Defectos en las películas de polietileno año 2014

Defecto película	Cantidad	Porcentaje de participación	Porcentaje acumulado
Calibre	65	15 %	15 %
Apariencia	48	11 %	27 %
Arrugas	33	8 %	35 %
Bloqueo	29	7 %	41 %
Medidas fuera de estándar	21	5 %	46 %
Material caído	20	5 %	51 %
Venas	17	4 %	55 %
Tratado	15	4 %	59 %
Tonalidad fuera de estándar	13	3 %	62 %
Grumos	10	2 %	64 %
Contaminación	9	2 %	66 %
Resistencia	9	2 %	68 %
Apariencia rayada	8	2 %	70 %
Centro de cartón colapsado	7	2 %	72 %
<i>Pellets</i> no fundidos	6	1 %	73 %
COF	6	1 %	75 %
Geles	6	1 %	76 %
Venas	6	1 %	78 %
Retracción fuera de estándar	5	1 %	79 %
Rayones	5	1 %	80 %
Sellabilidad	5	1 %	81 %
Ancho fuera estándar	5	1 %	82 %
Impresión borrosa	4	1 %	83 %
Cambio formulación	4	1 %	84 %
Tratado débil	4	1 %	85 %
Resistencia Impacto fuera de estándar	4	1 %	86 %
Curling	4	1 %	87 %
Mezcla no cumple formula	3	1 %	88 %

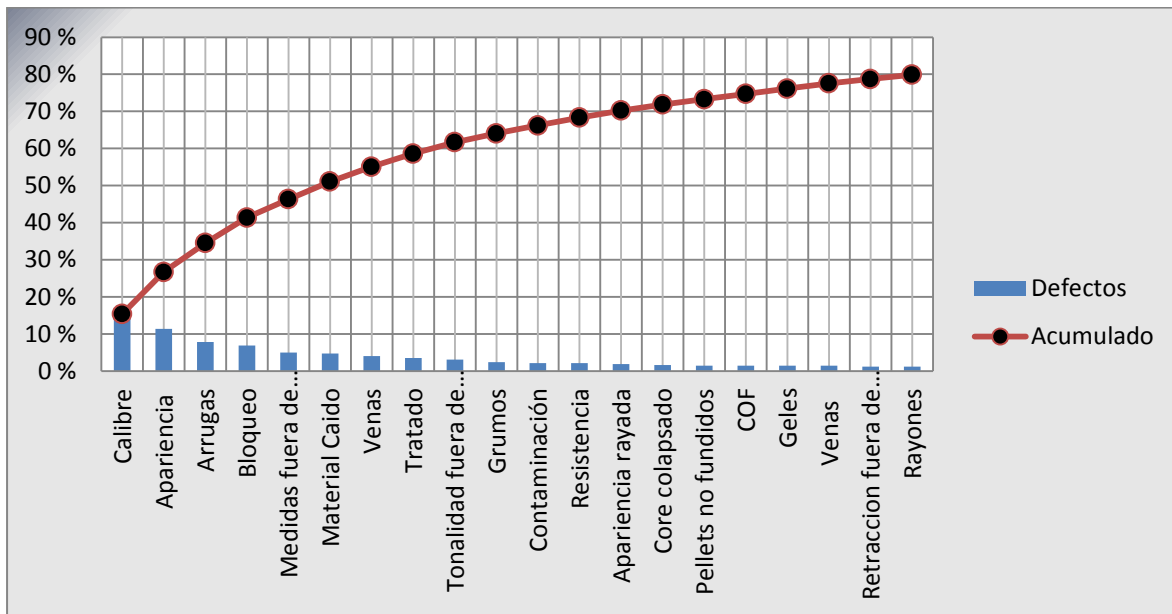
Continuación de la tabla XIV.

Apariencia gelada	3	1 %	88 %
Impresión corrida	2	0 %	89 %
Trama mal impresa	2	0 %	89 %
Tonalidad	2	0 %	90 %
Prop. mecánicas fuera de límites	2	0 %	90 %
Pigmentación	2	0 %	91 %
Prueba de materia prima	2	0 %	91 %
Sin impresión	2	0 %	92 %
Apariencia con línea traslúcida	2	0 %	92 %
Pedido nuevo sin referencia	2	0 %	93 %
Material Frenado	2	0 %	93 %
Materia prima sin ficha técnica	2	0 %	94 %
Apariencia porosa	2	0 %	94 %
Porosidad	2	0 %	95 %
Baja resistencia	2	0 %	95 %
Material lastimado	2	0 %	96 %
Manchas de impresión	1	0 %	96 %
Mal bobinado	1	0 %	96 %
Sin tratado	1	0 %	96 %
Despinton	1	0 %	96 %
Peso bajo	1	0 %	97 %
Fuelle débil	1	0 %	97 %
Procedimiento fuera de estándar	1	0 %	97 %
Apariencia	1	0 %	97 %
Tensión	1	0 %	98 %
Apariencia línea traslucida	1	0 %	98 %
Mal embobinado	1	0 %	98 %
Apariencia húmeda	1	0 %	98 %
Traslucidez	1	0 %	99 %
Anclaje de tinta	1	0 %	99 %
Materia prima fuera de estándar	1	0 %	99 %
Mezcla	1	0 %	99 %
Propiedades mecánicas	1	0 %	100 %
Desregistro	1	0 %	100 %
Medida de fuelle fuera de estándar	1	0 %	100 %
Totales	423	100 %	200 %

Fuente: elaboración propia.

Según los datos de la tabla anterior, se observa que el 80 % de los defectos de calidad, se encuentran dentro de los primeros 20. La figura 19 muestra el 80/20 en forma gráfica.

Figura 21. Pareto de los defectos en películas de polietileno



Fuente: elaboración propia.

Con base en la figura y tabla anterior, se observa que uno de los problemas de calidad más recurrentes en extrusión es el calibre, con un porcentaje de 15 % del total de defectos, razón por la cual se selecciona este defecto para abordar su causa. El problema de calibre se puede presentar en cualquier extrusora y las causas pueden ser por diferentes motivos.

Con el propósito de reducir los defectos de calibre, se realiza de nuevo un Pareto, para identificar cuál es la máquina que mayor presenta este defecto. Para esto se enlista el total de extrusoras y la recurrencia de este defecto



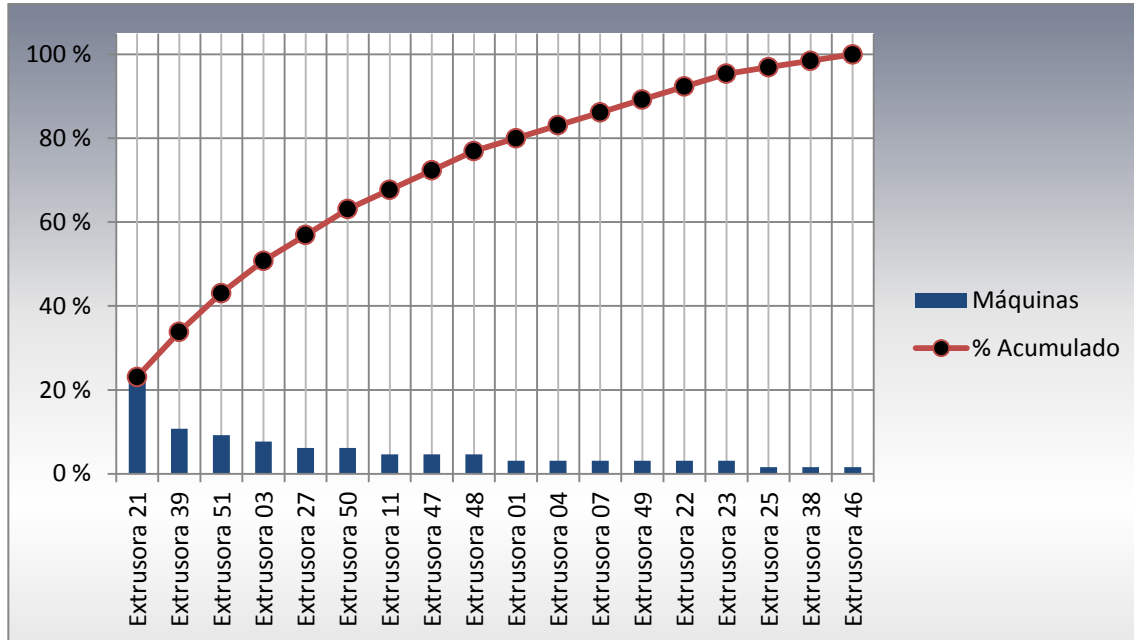
durante el 2014, esta información se obtuvo de la base de datos del Departamento de Calidad de Extrusión, en la tabla XV y figura 20 se observan los valores.

Tabla XV. **Pareto según cantidad recurrente de defecto por calibre**

Extrusora	Cantidad de veces	Porcentaje de Participación	Porcentaje Acumulado
Extrusora 21	15	23 %	23 %
Extrusora 39	7	11 %	34 %
Extrusora 51	6	9 %	43 %
Extrusora 03	5	8 %	51 %
Extrusora 27	4	6 %	57 %
Extrusora 50	4	6 %	63 %
Extrusora 11	3	5 %	68 %
Extrusora 47	3	5 %	72 %
Extrusora 48	3	5 %	77 %
Extrusora 01	2	3 %	80 %
Extrusora 04	2	3 %	83 %
Extrusora 07	2	3 %	86 %
Extrusora 49	2	3 %	89 %
Extrusora 22	2	3 %	92 %
Extrusora 23	2	3 %	95 %
Extrusora 25	1	2 %	97 %
Extrusora 38	1	2 %	98 %
Extrusora 46	1	2 %	100 %
TOTAL	65	100,00 %	200,00 %

Fuente: elaboración propia, con información de la base de datos del Departamento de Calidad de Extrusión de Polytec.

Figura 22. Pareto del defecto de calibre por extrusora



Fuente: elaboración propia.

Del Pareto anterior se logra identificar que las primeras 10 extrusoras son las que presentan la mayor cantidad de defectos por calibre y son las que más impacto generan en la calidad del producto. De la misma forma, se puede identificar que la extrusora 21 es la máquina que tiene el mayor porcentaje de defectos por calibre, con un 23 % del total, es por esto que surge la necesidad de identificar las causas que provocan la variación de calibre en esta máquina.

Una buena práctica para abordar problemas de calidad es realizar pruebas piloto, es decir, únicamente analizar una máquina u operador. En este caso se utilizará como prueba piloto la extrusora 21 debido a su recurrencia presentando defecto por calibre.

### 3.2. Causas del problema

Con base en el Pareto de la sección anterior se determinó que la variación en el calibre es el defecto de mayor recurrencia y que la extrusora 21 es la máquina en donde mayor veces se presenta. Es por esto que se enfocará en la variación de calibre, para identificar las causas potenciales que lo ocasionan, para esto se analizarán las 6M (materiales, maquinaria, medición, mano de obra, métodos y factores del ambiente) que son los elementos que aportan variabilidad en el producto terminado.

Para analizar si se debe trabajar en el centrado del proceso o en la variabilidad del mismo, es necesario realizar gráficos de control y analizar su comportamiento. Para esto se obtuvieron 4 muestras cada 15 minutos para 5 subgrupos, las muestras se presentan en la tabla XVI.

Tabla XVI. **Muestras para gráficos de control**

Subgrupo	X1	X2	X3	X4	Media	LCI	LC	LCS	Desv. Est.	LCI	C	LCS
1	70,00	68,00	77,00	78,00	73,25	71,67	76,90	82,13	4,99	-	3,21	7,28
2	78,00	76,00	76,00	75,00	76,25	71,67	76,90	82,13	1,26	-	3,21	7,28
3	70,00	78,00	77,00	79,00	76,00	71,67	76,90	82,13	4,08	-	3,21	7,28
4	78,00	82,00	79,00	80,00	79,75	71,67	76,90	82,13	1,71	-	3,21	7,28
5	75,00	77,00	84,00	81,00	79,25	71,67	76,90	82,13	4,03	-	3,21	7,28

**Media 76,90**

**Media 3,21**

Fuente: elaboración propia.

Para realizar un gráfico de control, es necesario determinar la media o la tendencia central para comprobar que los datos muestran apuntan hacia el objetivo establecido por el cliente. Para esto se utiliza la ecuación de la media para encontrar la medias de los subgrupos y, posterior a esto, encontrar la media de las medias.

$$\bar{\bar{X}} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n} = \frac{70 + 68 + 77 + 78}{4} = 73,25$$

Uno de los principales propósitos de realizar gráficos de control es determinar si un proceso se encuentra trabajando con variaciones de causas comunes o especiales, cuando un proceso se encuentra bajo control se dice que trabaja bajo variaciones de causas comunes y abordar estas causas son oportunidades de mejora, determinado esto se procede a identificar bajo qué causas se encuentra trabajando el proceso de extrusión.

Para esto es importante definir los límites de control establecidos en la tabla XVI mediante las siguientes ecuaciones:

$$LCI = \bar{\bar{X}} - \bar{S} * A_3$$

$$LCS = \bar{\bar{X}} + \bar{S} * A_3$$

$$LC = \bar{\bar{X}}$$

La letra A es una constante que depende del número de subgrupo y esta es introducida en las ecuaciones para facilitar los cálculos, en el caso de las muestras tomadas se necesita el valor de  $A_3$  para un tamaño de 4, en la tabla que se muestra en el anexo 3 se encuentra de donde sale el valor de  $A_3$ . Los resultados para cada subgrupo se definen en la tabla XVI.

Para vigilar el comportamiento de las muestras y al mismo tiempo la variación de las mismas, se procede a realizar un gráfico de control de desviaciones estándar que permita identificar qué tanta variabilidad existe en las medias tomadas. Las ecuaciones para este gráfico son las siguientes:

$$LCI = \bar{S} * B_3$$

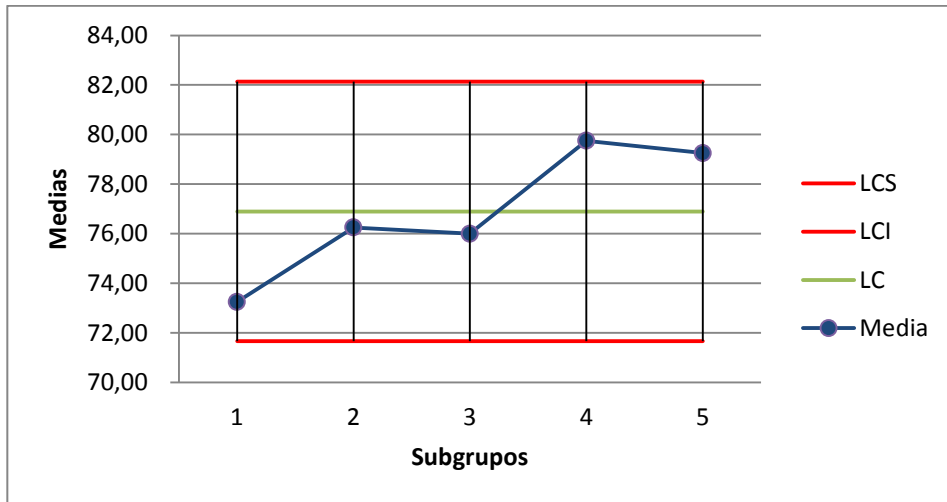
$$LCS = \bar{S} * B_4$$

$$LC = \bar{S} = \frac{S_1 + S_2 + \dots + S_M}{M}$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{X})^2}{n - 1}}$$

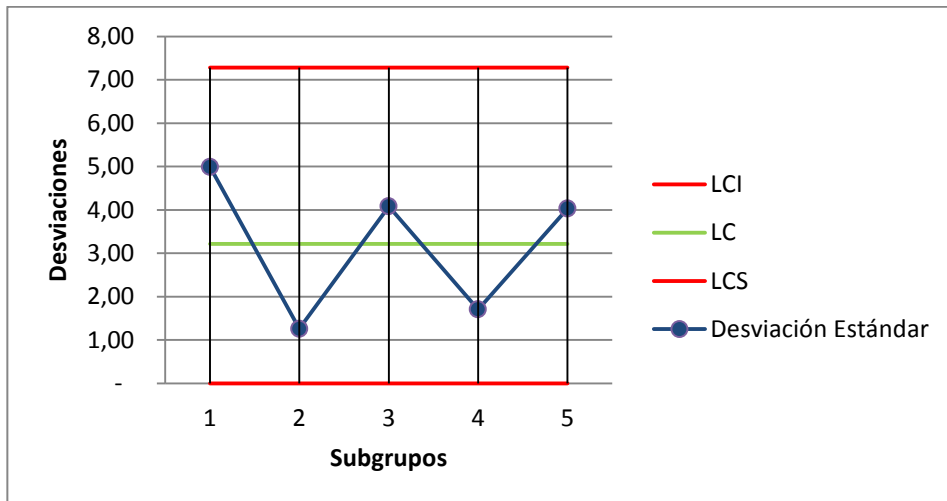
Al igual que las medias, los valores de las constantes de  $B_3$  y  $B_4$  se encuentran en la tabla del anexo 3, los resultados de aplicar dichas ecuaciones se muestran en la tabla XVI. Con los datos obtenidos, el siguiente paso es realizar los gráficos de control como se muestra en la figura 21 y 22.

Figura 23. Gráfico de medias



Fuente: elaboración propia.

Figura 24. Gráfico de desviaciones estándar

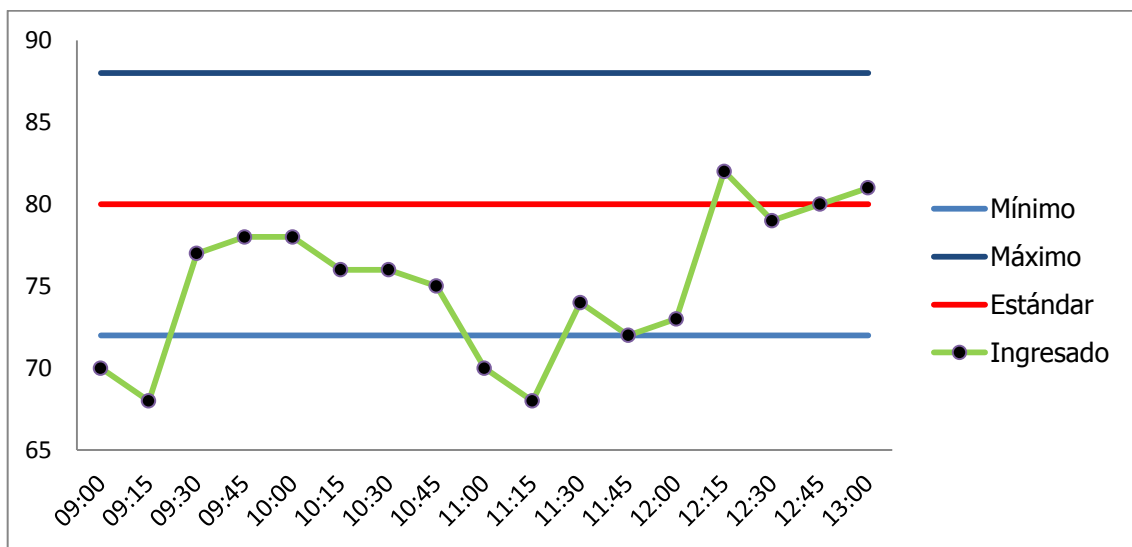


Fuente: elaboración propia.

Al analizar ambas gráficas, los valores de las medias de las muestras se encuentran bajo control debido a que ningún punto sale de los límites establecidos, aún así es importante analizar la gráfica de las medias junto con la gráfica de las desviaciones. El punto se encuentra muy cercano a salir del límite de control inferior y, de la misma forma, tiene una desviación bastante grande en comparación a los demás puntos graficados.

Una gráfica ideal es cuando los valores de las medias se encuentran estables por la línea central y las desviaciones cercanas al límite inferior, con base en esto, se puede determinar por medio del gráfico que existe una variación notable en las muestras tomadas. Estas variaciones puede que no influyan en los límites de control del proceso, pero sí en los límites de especificación del cliente. Para corroborar esto se procede a graficar los datos de la muestra tomados de la tabla VIII del capítulo 2.

Figura 25. Límites de especificación



Fuente: elaboración propia.

Analizando la gráfica, los valores de la muestra no cumplen con los límites de especificación de los clientes como se muestra en la figura 22, por lo que se puede concluir que el proceso de extrusión, al estar bajo control, trabaja con variabilidad de causas comunes que son aportadas por cualquiera de las 6M y que se necesita un enfoque en la variabilidad y no en el centrado del proceso.

Una vez establecido en dónde se presenta el problema de calibre, es importante utilizar una herramienta que nos determine la causa del problema, por lo que se utilizará el diagrama de Ishikawa. Para el diagrama se analizaron los distintos factores de cada una de las 6M que pueden causar variación en extrusión, como se muestra a continuación.

### **3.2.1. Mano de obra**

- **Conocimiento:** el personal cada año recibe una capacitación técnica acerca del proceso de extrusión, en donde se hace énfasis a las especificaciones de cada parte de la extrusora, así como los cuidados y condiciones ideales a las cuales se deben trabajar las mismas.
- **Habilidad:** existen procedimientos para los distintos tipos de operaciones en la extrusora 21, el operador ha sabido llevarlos a cabalidad y ha demostrado ser hábil para el cumplimiento de los mismos, según el criterio del jefe de área.



- Importancia de la calidad: al personal se le había instruido acerca de calidad en el 2012, en donde existía una inducción acerca de cultura de calidad. Por motivos de reorganización, la Gerencia de Calidad cambió de personal y esta inducción se dejó de impartir, actualmente se está retomando dicha inducción a modo de establecer una cultura de calidad en el personal.
- Motivación: en el área se han establecido metas a modo de lograr cierta cantidad de producción con el mínimo de desperdicio, al cumplir con dichas metas al personal se le premia con un almuerzo y un incentivo. Con el fin de no generar mucho desperdicio, el operador está consciente de que al tener problemas de calidad por calibre generará más desperdicio, por consiguiente afectará su meta.

### **3.2.2. Métodos**

- Estandarización: las responsabilidades y procedimientos están definidos y claros, y no dependen del criterio de cada persona para establecer el calibre de la película.
- Excepciones: cuando el procedimiento estándar no se puede llevar a cabo, es decir que por algún motivo no se puede respetar el procedimiento para establecer el calibre que demanda la orden de producción, no se cuenta con un procedimiento que establezca las medidas alternas para establecer el calibre.

- Operaciones: estas han sido establecidas dentro de los procedimientos y son los adecuados debido a la naturaleza del proceso. Es decir, si el operador desea modificar el calibre hasta llevarlo a un valor deseado, la única operación que se realiza es disminuir o aumentar la velocidad de la máquina, hasta llevarlo al calibre deseado, posteriormente se mide el calibre de la película mediante un micrómetro.

### **3.2.3. Máquinas o equipos**

- Capacidad: la máquina ha sido capaz de dar la calidad que el Departamento de Calidad solicita, pero no todo el tiempo. El calibre a lo largo de la película tiende a variar durante el transcurso del día, sobre todo al medio día, que es cuando la temperatura ambiente aumenta. La extrusora, al no tener un sistema de enfriamiento en el soplado del polietileno, genera inestabilidades atribuidas a las temperatura del alrededor.

Con el fin de que no existan inestabilidades, es necesario que el aire del soplado se haga mediante aire frío, para darle una mejor estabilidad al polietileno, si no existe un sistema de enfriamiento, el aire que circula en el soplado es el aire del ambiente.

El aire del ambiente es caliente y esto se debe a que las temperaturas para plastificar el polietileno se encuentran desde los 160 a los 220 °C. Dicho proceso de transformación transfiere energía en forma de radiación y la turbina, que es la encargada de generar el aire al anillo de enfriamiento, absorbe el aire caliente y lo transfiere al anillo de enfriamiento. Por consiguiente, el soplado se realiza por medio de aire caliente dándole inestabilidad al soplado y cualquier cambio pequeño en la temperatura provoca variaciones de calibre.

- Condiciones de operación: las condiciones de operación en cuanto a temperaturas del tornillo extrusor han sido establecidas según las fichas técnicas de las materias primas y a la información histórica de la máquina que el Departamento posee. La única variable de entrada que no se tiene controlada es la velocidad del tornillo extrusor, esta velocidad se establece con base en la temperatura ambiente y el operador sabe hasta qué velocidad establecer la máquina según al calibre resultante de la película.

Entre más velocidad se le proporcione al tornillo extrusor, mayor empuje hará el tornillo a la resina plastificada y dará calibres más grandes, y viceversa para calibres pequeños.

- Herramientas: para el proceso de extrusión únicamente se utilizan llaves Allen de diferentes tamaños para hacer distintos tipos de ajustes con respecto a rodillos, ajuste de canasta, centrado de dado, entre otros.

El cambio de herramienta se realiza hasta que llegue la falla, para establecer el calibre no se utiliza ningún tipo de herramienta únicamente el tablero de control, que es en donde se establece la velocidad de tornillo extrusor y las temperaturas de las resistencias que calientan el tornillo extrusor.

- **Mantenimiento:** en Polytec se cuenta con un programa de mantenimiento preventivo, el cual se realiza cada 6 meses. Dicho mantenimiento incluye actividades como la limpieza de todos los elementos mecánicos externos, como la turbina, el anillo de distribución y enfriamiento, y la revisión de las resistencias encargadas de calentar el tornillo extrusor. De la misma forma conlleva la actividad de lubricar los rodillos por los que pasa la película de polietileno y, por último, se alinean todos los elementos de la extrusora, a modo de que la película corra en forma recta. La limpieza del tornillo extrusor se hace cada año.

#### **3.2.4. Material**

- **Variabilidad:** según la base de datos del Departamento de Calidad y la experiencia del jefe de Extrusión, la variabilidad de los materiales no influye con respecto a la variación de calibre. Los materiales influyen en problemas de calidad como apariencia, arrugas, bloqueo (que las películas de polietileno se queden adheridas), tonalidad fuera de estándar, entre otros.
- **Proveedores:** por la naturaleza del defecto de calidad, no influye el cambio de proveedores de materias primas.

### 3.2.5. Mediciones

- Disponibilidad: actualmente no se cuenta con las mediciones requeridas que puedan prevenir o detectar la variación de calibre, la forma en que se detecta dicha variación depende mucho de la experiencia del operador.

La detección se realiza mediante la observación de la burbuja de polietileno, cuando la burbuja empieza a tener inestabilidad es cuando el operador utiliza el micrómetro para medir el calibre e identificar si ha variado, hecho esto el operador baja la velocidad o la aumenta a modo de llegar al valor deseado. Para ese entonces, ya ha transcurrido gran parte del material que ha tenido variación en el calibre. En la figura 24 se ilustra una burbuja que está corriendo de manera estable.

Figura 26. **Burbuja corriendo de manera estable**



Fuente: *Blown film extruder*. <http://i.ytimg.com/vi/iGzZGRIKX9Q/0.jpg>. Consulta: diciembre de 2014.

Como se ve en la imagen, la burbuja tiene una apariencia sólida a diferencia de cuando la burbuja esta inestable, que presenta una apariencia de estar “bailando” como comúnmente se le conoce.

- Calibración: los instrumentos utilizados por los operadores de las máquinas y el Departamento de Calidad son calibrados cada mes, y esto se tiene programado en el programa de mantenimiento preventivo del departamento de mantenimiento. Los instrumentos que indican el tamaño del calibre son los micrómetros, durante el 2014 no se tuvieron hallazgos de micrómetros que no estuvieran calibrados. Los micrómetros que se utilizan son analógicos, por consiguiente, es más sencillo identificar si estos se encuentran calibrados

### **3.2.6. Medio ambiente**

- Ciclos del medio ambiente: actualmente existen patrones en extrusión que dependen del medio ambiente. La velocidad es mayor en el turno nocturno y en las primeras horas de la mañana, debido a la temperatura del ambiente, las mismas temperaturas evitan la estabilidad de la burbuja al aumentar la velocidad. En las horas del mediodía y en la tarde se presenta una baja en la velocidad de la máquina, debido al aumento de la temperatura ambiente.

La tabla XVII contiene la información de una orden de producción tomada en las horas de la mañana que tiene como fin demostrar cómo la velocidad de la máquina va en decremento conforme la temperatura del anillo aumenta a través del tiempo. La temperatura del anillo depende de la temperatura ambiente, si la temperatura ambiente disminuye, también lo hará la temperatura del anillo, por consiguiente la velocidad de la máquina aumentará y se formarán ciclos de velocidad a través del día.

La tabla XVII muestra una columna llamada hora y conforme esta aumenta la columna caudal disminuye, esto se debe al aumento de temperatura ambiente de las 12:00 p.m. contra las 8:00 a.m. Esto quiere decir que en los turnos nocturnos la velocidad de la extrusora es mayor con respecto a los turnos diurnos, por lo que en los turnos nocturnos existe menos variación de calibre que en los diurnos.

Tabla XVII. **Comportamiento temperatura y velocidad**

Datos orden				Temperaturas anillo enfriamiento					Velocidades	Variables	
Orden	Corrida	kg/1000	Calibre	1	2	3	4	Media	RPM	Hora	Caudal (kg/h)
79764	208556	60,4	80	42,8	42,7	44,3	45,7	43,875	560	08:00:00 a.m.	26,10
79764	208556	60,4176	80	45,2	42,1	48,6	45,1	45,25	563	09:00:00 a.m.	26,10
79764	208556	60,4176	80	45,4	44,8	48,8	52	47,75	559	10:00:00 a.m.	24,74
79764	208556	60,4176	80	45	42,1	50,4	52,4	47,475	555	11:00:00 a.m.	23,38
79764	208556	60,4176	80	47,7	45,5	49,6	49,1	47,975	555	12:00:00 p.m.	23,38

Fuente: elaboración propia.

- Temperatura ambiente: esta influye en las operaciones. El calor que genera el proceso de la plastificación genera variaciones en el calibre, a esto se le debe sumar la temperatura ambiente, debido a que la turbina absorbe el aire a temperatura ambiente.

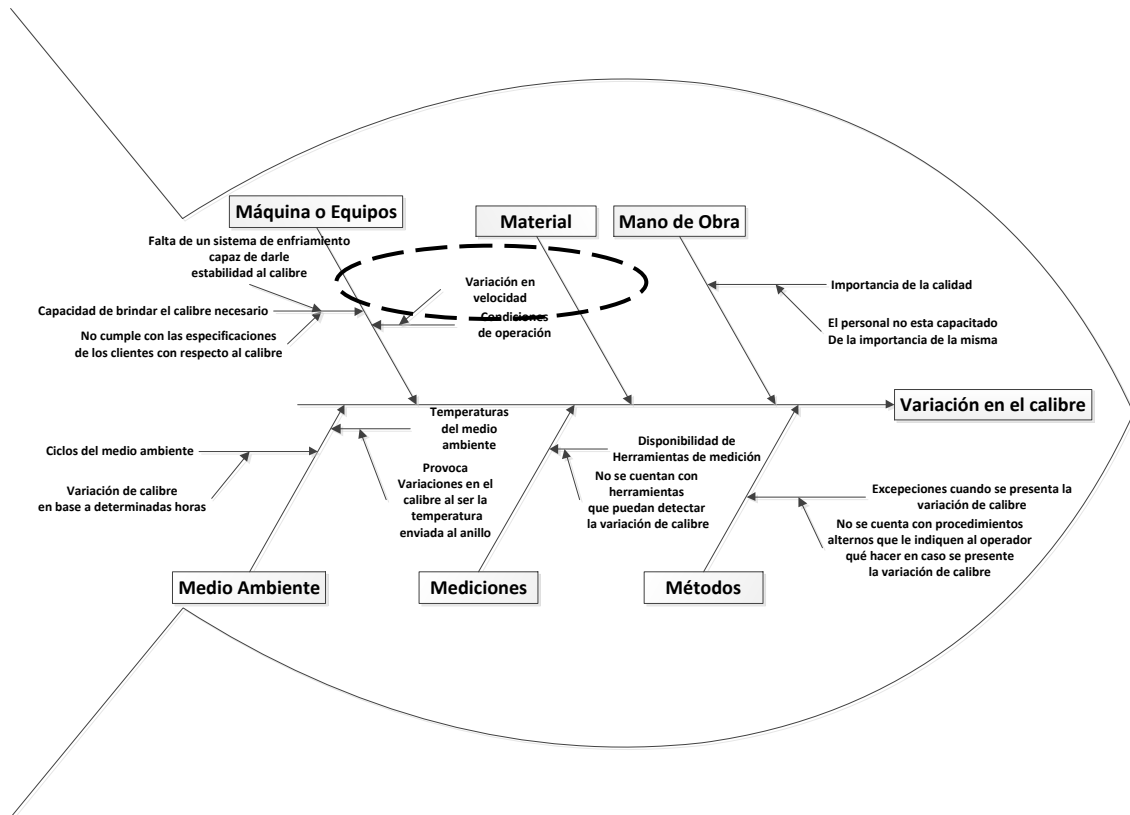
La temperatura ambiente es un factor que no se puede modificar, pero la temperatura del aire que es enviado al anillo de enfriamiento sí puede ser modificada y controlada.

Una vez analizadas las causas potenciales y los aspectos que pueden ocasionar variación en el producto final, se realiza el diagrama de causa-efecto Ishikawa en la figura 25.

El diagrama muestra que de las 6 causas posibles, 5 son las que pueden originar la variación de calibre (mano de obra, métodos, mediciones, medio ambiente y maquinaria). Sin embargo, aunque la medición, los métodos y la mano de obra cumplan a cabalidad los aspectos que los hacen aportar variación al calibre, de nada servirá si las causas de medio ambiente y la maquinaria no cuentan con un sistema que controle la temperatura, razón por la cual en el diagrama se circula con una línea punteada.



Figura 27. Diagrama causa-efecto, variación de calibre



Fuente: elaboración propia.

### 3.3. Establecimiento de las medidas remedio

Con base en el diagrama de Ishikawa de la figura 25, se logra determinar ciertas causas que deben ser abordadas, tales como:

- Falta de capacitación de personal enfocada a calidad.
- Falta de procedimientos alternos en caso de que se presente el problema.

- No se cuenta con medidas que detecten la variación de calibre.
- El calibre varía en base a la temperatura ambiente.
- La velocidad y calidad no se pueden mantener estables debido a la falta de un sistema de enfriamiento.

La verdadera causa raíz, según la figura 25, es la falta de un sistema de enfriamiento. Sin embargo, en la tabla XVIII se plantean soluciones para las causas encontradas.

Tabla XVIII. **Soluciones a causas encontradas en Ishikawa**

CAUSA	SOLUCIÓN
Falta de capacitación de personal	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Realizar un plan de capacitación para el personal de extrusión enfocado en calidad.</li> <li>• Contratación de personal con experiencia en el área.</li> <li>• Modificar el nivel académico en el perfil de los operadores de extrusión.</li> </ul>
Falta de procedimientos alternos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Realizar documentos escritos sobre qué operaciones hacer en caso se presente la variación de calibre.</li> <li>• Cuando se imparta la capacitación técnica de extrusión hacer enfoque a las posibles soluciones de los defectos más recurrentes.</li> </ul>
Medidas que detecten la variación de calibre	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Colocar un sistema de medición de micras o calibres en los rodillos, debido a que es el lugar por donde pasa la película.</li> <li>• Colocar sensores alrededor del anillo de enfriamiento y que exista un sistema que sea capaz de detectar la variación de calibre en base a la cantidad de resina empujada por el tornillo y la temperatura.</li> </ul>
Calibre varía con base en la temperatura ambiente	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Colocar la turbina en el exterior de la planta para que brinde aire a temperaturas menores a las de la planta.</li> <li>• Colocar ventiladores alrededor de la extrusora para transmitir el flujo caliente de aire hacia áreas lejanas de la turbina.</li> <li>• Colocar un intercambiador de calor a modo de disminuir la temperatura del anillo de enfriamiento.</li> </ul>
Velocidad y calibre no se mantienen estables	

Fuente: elaboración propia.

Determinadas las soluciones o medidas remedio se selecciona una solución para la causa raíz. Para esto es importante definir los siguientes criterios:

- Colocar la turbina de admisión de aire en el exterior de la planta: esta solución brindaría temperaturas menores hacia la extrusora, el inconveniente que se presenta es a lo largo del camino de los ductos hacia la extrusora, en donde el aire absorbería la temperatura de los alrededores y representaría un cambio muy pequeño en la temperatura de admisión al anillo de enfriamiento.

Esta solución también puede presentar el desinble de la burbuja y defecto por apariencia, al estar la turbina expuesta al medio ambiente y que pueda transportar partículas extrañas al anillo de enfriamiento.

- Colocar ventiladores alrededor de la extrusora: colocar ventiladores que transmitan el flujo de aire caliente hacía otras áreas brindaría un ambiente más fresco alrededor de la extrusora, lo cual beneficiaría al operador de la máquina, pero la turbina no sería capaz de brindar temperaturas lo suficientemente bajas debido al calor por radiación que genera el tornillo extrusor. Por consiguiente, el cambio en la estabilidad de la burbuja, la disminución en la variación de calibre y aumento de la velocidad sería bajo con respecto al objetivo primordial de aumentarla en un 33 %.

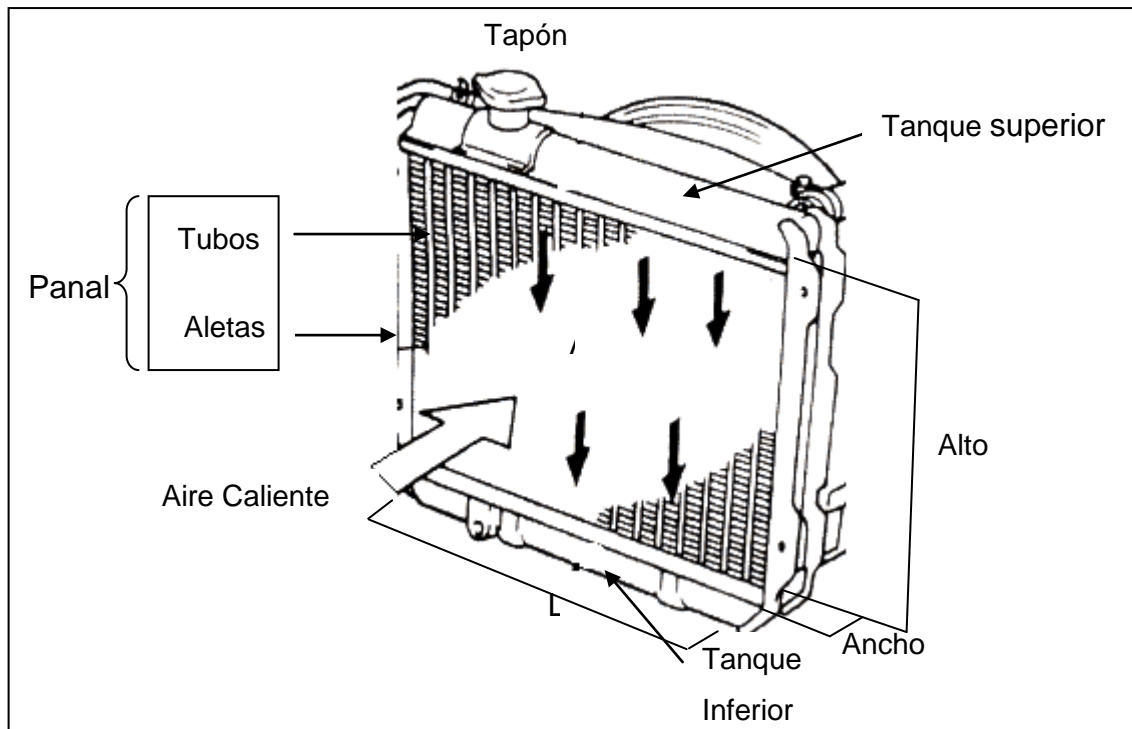
- Colocar un intercambiador de calor: con un intercambiador de calor se lograría transferir la alta temperatura del aire de la turbina hacia el agua a bajas temperaturas. Por consiguiente, tener aire a temperaturas bajas en el anillo de enfriamiento y brindar la estabilidad necesaria para evitar la variación de calibre y brindar mayores velocidades en comparación a las actuales establecidas en el capítulo 2.

Dado que el intercambiador de calor es el dispositivo que dará resultados notorios con respecto a la transferencia de calor del aire a la admisión del anillo de enfriamiento, se selecciona esta solución debido a que teniendo temperaturas más bajas en el anillo se obtiene mayor estabilidad. Por consiguiente, el tornillo extrusor es capaz de brindar mayor empuje a las resinas plastificadas dando como resultado velocidades mayores en comparación a las actuales.

#### **3.4. Diseño de un intercambiador de calor**

Para el diseño de un intercambiador de calor es necesario conocer las partes del mismo. El intercambiador que se diseñará para Polytec consta de las siguientes partes que se presentan en la figura 26, la definición de las mismas se encuentran en el glosario.

Figura 28. Partes de un intercambiador de calor



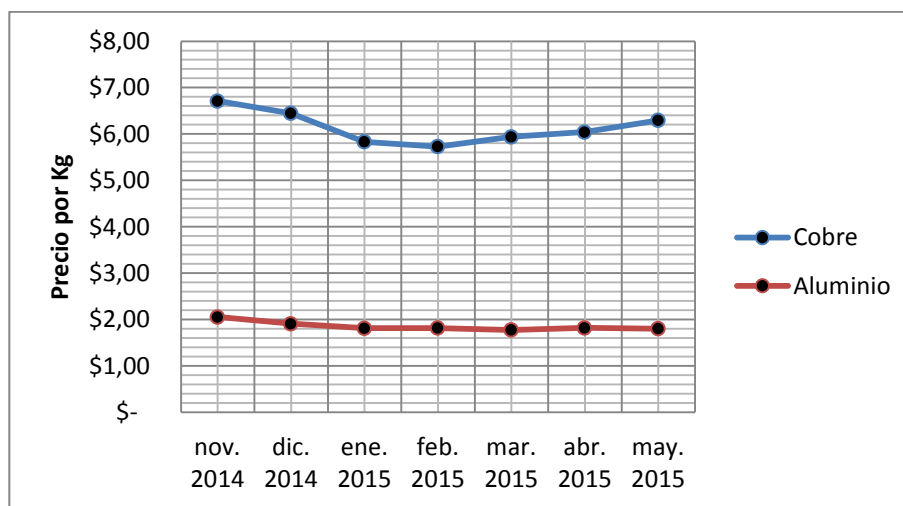
Fuente: *Aficionados a la mecánica*. <http://www.aficionadosalamecanica.com/refrigeracion-motor.htm>. Consulta: diciembre de 2014.

### 3.4.1. Materiales del intercambiador de calor

Los materiales más utilizados para los intercambiadores de calor son el aluminio y el cobre/bronce. Cada uno de estos materiales posee ventajas y desventajas, y la forma en que están estructurados depende de ciertos factores como la rigidez, resistencia, espesor de la pared y el costo por kilogramo de materia prima.

La selección de los materiales depende la actividad y del criterio de selección del diseñador, en el caso de Polytec uno de los factores más importantes es el costo de materia prima y espacio. La figura 27 muestra la comparación de precios entre el aluminio y el cobre.

Figura 29. **Comparación de precios de aluminio y cobre**



Fuente: *Indexmundi*. <http://www.indexmundi.com/es/precios-de-mercado/?mercancia=aluminio>.  
Consulta: diciembre de 2014.

Según la gráfica el precio por kilogramo del aluminio se encuentra más bajo y estable que el precio por kilogramo del cobre. En un promedio el costo por kilogramo de aluminio es de \$ 1,86 mientras que el de cobre de \$ 6,14. También, el intercambiador de cobre/bronce es más utilizado en maquinarias de gran tamaño, en donde se necesita mayor transferencia de calor, y el aluminio para piezas medianas y pequeñas en donde la exigencia de transferencia de calor es menor.

El tema de espacio es un factor de importancia para Polytec, debido al acuerdo gubernativo de salud y seguridad ocupacional en donde se establecen los espacios libres para el operador, máquina y pasillos, por lo que se necesita un intercambiador que ocupe menos espacio y tenga menos peso en dado caso se tuviera que cambiar de lugar. La tabla XIX muestra características de cada uno de los intercambiadores.

**Tabla XIX. Características de materiales intercambiadores de calor**

Aluminio	Cobre/bronce
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menor peso específico necesitando poco espacio y convirtiéndolo en un dispositivo ligero en comparación al cobre/bronce.</li> <li>• Gracias a su peso es posible tener tubos más anchos permitiendo tener mayor contacto para la transferencia de calor.</li> <li>• Más barato que el cobre según figura 27.</li> <li>• La reparación es más difícil que el de cobre y muchas veces es mejor sustituir el intercambiador por otro.</li> <li>• La soldadura utilizada es oxiacetilénica, la cual es uniforme y no reduce el coeficiente de transferencia de calor del aluminio.</li> <li>• Utilizado para máquinas pequeñas y medianas en donde las necesidades de transferencia de calor son menores.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mayor peso específico necesitando más espacio y convirtiéndolo en un dispositivo pesado.</li> <li>• El cobre tiene mejor transferencia térmica por lo que es utilizado en maquinarias con necesidades grande de transferencia de calor.</li> <li>• El tipo de soldadura reduce su transferencia de calor debido a que los materiales de soldadura tiene un coeficiente de transferencia menor.</li> <li>• Más caro que el aluminio según gráfico 27.</li> <li>• Fácil reparación.</li> </ul>

Fuente: elaboración propia.

Con base en esto se seleccionará el aluminio para el diseño del intercambiador, debido a que este cumple con las necesidades de la empresa en cuanto precio, espacio y peso.

### 3.4.2. Pasos para el diseño del intercambiador de calor

Una vez determinados los materiales a utilizar para el intercambiador, es necesario determinar sus dimensiones, según las necesidades de producción. En este caso, el principal objetivo es aumentar la velocidad de la máquina en un 33 % a modo de dar estabilidad a la burbuja de polietileno, evitando variaciones en los calibre de las películas. Los pasos para el diseño del intercambiador se describen en la tabla XX.

Tabla XX. Pasos para el diseño de un intercambiador de calor

Núm.	Descripción	Ecuación
1	Definir una ecuación de balance de energía. Esta será la ecuación que junto con información adicional nos determinará las dimensiones del intercambiador.	$Q = m_a C p_a (T_{ae} - T_{as}) = m_f C p_f (T_{fs} - T_{fe})$
2	Se deben determinar los valores de las variables de la ecuación de balance de energía para el fluido del agua, debido a que la energía que gana el agua es la misma que pierde el aire, resultado que nos servirá para un posterior análisis en el flujo del aire y determinar las dimensiones con base en las necesidades de temperatura.	$Q = m_f C p_f (T_{fs} - T_{fe})$
3	Determinar una ecuación que relacione la temperatura del aire con respecto al área necesaria. Para esto es necesario utilizar la ecuación de balance de energía del aire.	$Q = m_a C p_a (T_{ae} - T_{as})$ $m_a = v * \rho * A_t$ $A_t = \frac{Q}{v * \rho * C p_a (T_{ae} - T_{as})}$



Continuación de la tabla XX.

4	Para la temperatura de salida del aire necesaria se debe realizar un análisis de correlación entre la velocidad de la extrusora y la temperatura, de esta forma se determina la temperatura de salida del aire necesaria para aumentar la velocidad en un 33 %.	$r = \frac{\sum xy}{\sqrt{\sum x^2 \sum y^2}}$ $y = b + ax$ $b = \frac{\sum y_i - a \sum x_i}{N}$ $a = \frac{N \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$
5	Establecer el área del intercambiador que brinde la temperatura necesaria.	$A_t = \frac{Q}{v * \rho * C p_a (T_{ae} - T_{as})}$

Fuente: elaboración propia.

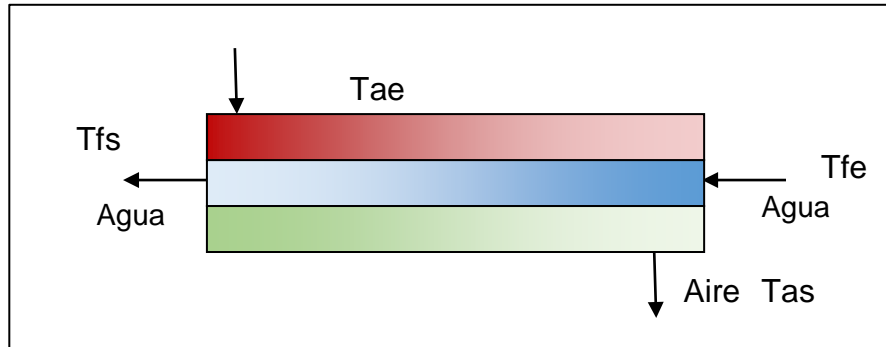
### 3.4.3. Balance de energía

Como se describió en la tabla XX, el primer paso para el diseño es establecer la ecuación de balance de energía. La energía que gana el agua es la misma energía que pierde el aire caliente de la turbina al pasar por el intercambiador de calor y la cantidad de este dependerá del área de contacto del intercambiador con la temperatura de flujo de aire y agua.

Es por esto que se debe establecer dicha ecuación para determinar las dimensiones del intercambiador que brinde la temperatura necesaria para lograr aumentar la velocidad de la extrusora en un 33 %, esta ecuación es la base para el diseño del intercambiador.

La figura 28 representa el intercambiador de calor a diseñar de una manera sencilla para realizar el balance de energía, en donde el aire  $T_{ae}$  es el que la turbina enviará al intercambiador y el agua  $T_{fe}$  es el fluido que vendrá de la tubería de agua que Polytec utiliza para enfriar elementos mecánicos de máquinas.

Figura 30. Representación básica para un balance de energía



Fuente: elaboración propia.

Para esto es importante definir que el flujo es estacionario, el volumen de los tubos del intercambiador no será variable y tampoco el ducto de entrada de aire, esto quiere decir que es un volumen de control.

El principio de conservación de la masa para un intercambiador de calor establece que la suma de los flujos másicos de entrada sean igual a los flujos másicos de salida, esta condición se puede expresar mediante la ecuación:

$$m_1 h_1 + m_2 h_2 = m_3 h_3 + m_4 h_4$$

Reordenando las variables de la ecuación se obtiene la siguiente ecuación:

$$m_a (h_{a1} - h_{a3}) = m_h (h_{f4} - h_{f2})$$

El calor específico, tanto del aire como del agua serán constantes, por lo que se puede expresar la ecuación de balance de energía de la siguiente forma:

$$Q = m_a C p_a (T_{ae} - T_{as}) = m_f C p_f (T_{fs} - T_{fe})$$

Esta ecuación será la que servirá para el diseño, es importante tener en cuenta que la energía que pierde el aire al tener contacto con los tubos fríos, es la misma energía que gana el agua.

#### **3.4.4. Temperaturas y calor específico del agua**

Para definir el calor del agua es necesario establecer los datos de la siguiente ecuación, la cual proviene de la ecuación de balance de energía.

$$Q = m_f C p_f (T_{fs} - T_{fe})$$

Donde

Q= energía

mf= flujo másico del agua

Cpf= calor específico del agua

Tfe= temperatura de entrada del agua

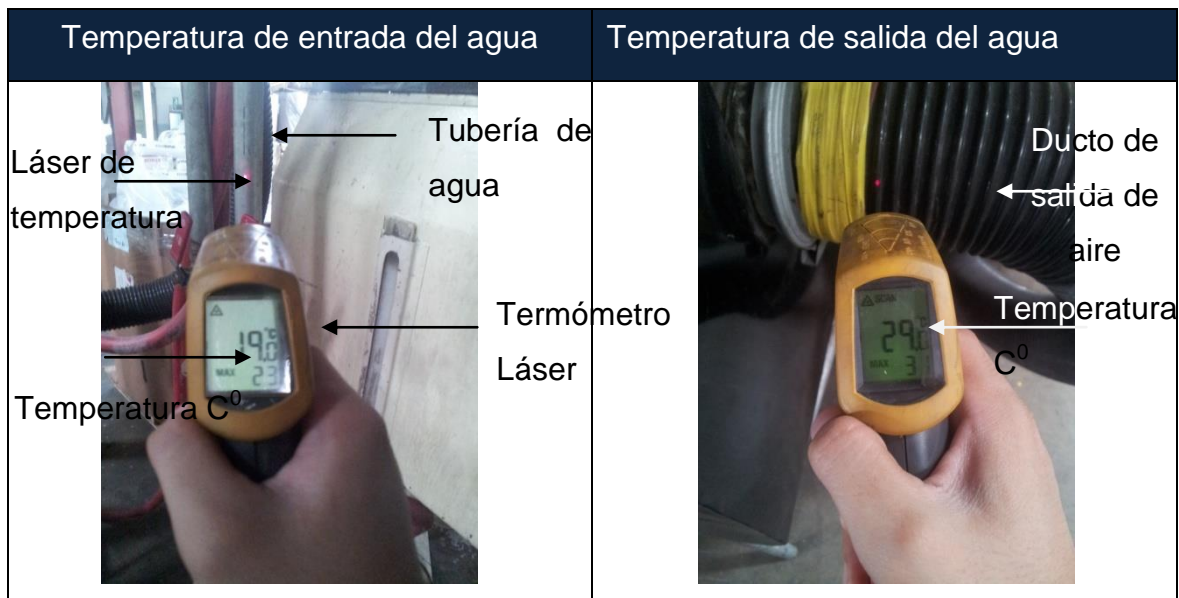
Tfs= temperatura de salida del agua

Se debe encontrar las temperaturas del agua y el calor específico debido a que son variables que están en la ecuación del balance de energía del agua. Una vez encontrada esta, junto con el flujo másico del agua se determinará la energía del agua que servirá para la ecuación de balance de energía del aire.

Por medio de un termómetro láser como el que se muestra en el capítulo 2, en la sección 2.3.4, se toma la temperatura del agua utilizada para enfriar las extrusoras, impresoras, laminadoras y cortadoras.

Para determinar el agua de salida del intercambiador, se utilizó como modelo el intercambiador de calor de la extrusora 38 que posee dicho dispositivo. Esta temperatura podrá ser cambiada en el futuro si en dado caso las condiciones del intercambiador fueran diferentes, aun así la variación no sería lo suficientemente significativa debido a la similitud de ambas extrusoras. Los resultados obtenidos fueron los siguientes.

Figura 31. **Lectura de temperaturas**



Fuente: extrusora 38, Departamento de Extrusión, Polytec.

$$T_{fe} = 19,0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{fs} = 29,0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Para determinar el calor específico del agua, es necesario utilizar la temperatura de entrada y buscar en el anexo 1 las propiedades del agua. Realizado esto se tiene la siguiente información:

°C	kJ/kg*°C
15,56	4 186
19,00	X
21,11	4 179

Interpolando, se obtiene el valor deseado de la siguiente forma:

$$\frac{15,56 - 19,00}{15,56 - 21,11} = \frac{4 186 - x}{4 186 - 4 179}$$

$$x = \frac{4 180,53kJ}{kg} * °C$$

### 3.4.5. Energía del agua

Como se ha dicho anteriormente, la energía del agua es la misma energía que pierde el aire, por lo que encontrar el valor de la energía dará la facilidad de encontrar la variable de área en la ecuación de balance de energía del aire.

Para determinar la energía que gana el agua, es necesario determinar el flujo másico del agua y para esto se utiliza la ecuación de flujo másico:

$$mf = \rho * v_f * A_t$$

Donde

m= flujo másico

$\rho$  = densidad del agua

Vf = velocidad del agua

At = área transversal por donde ingresa el agua

Para el cálculo del área transversal, se tomó en cuenta el diámetro de las tuberías de agua, el cual es de 8 cm. Con el fin de mantener el mismo sistema de flujo de agua en la planta y no modificarlas, el diámetro de las mangueras que transportarán el flujo hacia el intercambiador será igual al de las tuberías y de la misma forma el orificio por donde ingresará el agua al intercambiador.

Para encontrar la velocidad del agua, existen distintas formas de hacerlo, para este caso se determinó el caudal volumétrico de la tubería con ayuda del Departamento de Mantenimiento y la aprobación del jefe de área, haciendo una abertura en la tubería y tomando el tiempo para determinar cuántos galones llena en un determinado tiempo, el resultado fue de 10,02 segundos/galón. Con base en esta información, se procede al cálculo de la velocidad de la siguiente manera:

La ecuación del caudal es:

$$Q = A * V$$

Despejando V de la ecuación se tiene:

$$v = Q/A$$

Encontrando el área de la tubería de 8 cm de diámetro

$$A = \pi r^2 = \pi \left( \frac{0.08}{2} \right)^2 = 0,0005 \text{ m}^2$$

Convirtiendo el caudal de galones a metros cúbicos se obtiene:

$$Q = 0,099 \frac{\text{gal}}{\text{seg}} * \frac{0,0037\text{m}^3}{1\text{gal}} = 0,0003 \text{ m}^3/\text{s}$$

Encontrando la velocidad del agua:

$$v = \frac{0,0003\text{m}^3/\text{s}}{0,0005\text{m}^2} = 0,74 \text{ m/s}$$

Utilizando la densidad del agua como 997,4 kg/m<sup>3</sup>, se calcula el flujo másico de la siguiente forma utilizando la siguiente ecuación.

$$mf = 997,4 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,74 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 0,0005\text{m}^2 = \frac{1,15\text{kg}}{\text{s}}$$

Se aplica la ecuación de balance de energía para encontrar la cantidad de energía absorbida por el agua.

$$Q = \frac{1,15\text{kg}}{\text{s}} * \frac{4180,53\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} * (19,91 - 29,43)^\circ\text{C} = 45\,719,58 \text{ kW}$$

Esta información servirá para determinar el área necesaria para el diseño del intercambiador de calor.

### 3.4.6. Temperaturas de aire

Encontrada la energía del agua, es necesario determinar las demás variables conocidas en el balance de energía del aire. Se debe encontrar una relación entre el área de contacto que necesitará el aire y las variables conocidas, por lo que se parte de la ecuación de balance de energía.

Para calcular el área de contacto que necesitará el aire, es necesario recordar la ecuación de balance de energía para el aire establecida anteriormente, la cual es:

$$Q = m_a C p_a (T_{ae} - T_{as})$$

El flujo másico se puede expresar como:

$$m_a = v * \rho * A_t$$

Sustituyendo en la ecuación de balance de energía del aire se obtiene la siguiente expresión:

$$Q = v * \rho * A_t * C p_a (T_{ae} - T_{as})$$

Para determinar el área necesaria para el contacto con el aire, se despeja de la ecuación  $A_t$ , dando como resultado la ecuación de área de contacto necesaria

$$A_t = \frac{Q}{v * \rho * C p_a * (T_{ae} - T_{as})}$$

Con base en esta ecuación, se sabe que la cantidad de energía es la encontrada en la sección anterior, con un valor de 45 719,58 kW y con una densidad de aire de 1,12 kg/m<sup>3</sup>, ahora es necesario determinar las temperaturas, tanto de entrada como de salida del aire.



Para la temperatura de entrada de aire, se utilizó el termómetro láser que se estableció en el capítulo 2 en la sección 2.3.4, la toma se hace en la salida de aire de la turbina y la temperatura que se obtuvo fue de 40,4 °C.

Es importante tomar en cuenta que durante el transcurso en el que el aire pasa de la turbina hacia el anillo de enfriamiento existe una temperatura adicional, debido a las temperaturas de las resistencias con las cuales trabaja el tornillo extrusor, transfiriendo energía en forma de radiación. Esta misma energía se convierte en calor, provocando que la temperatura en el anillo de enfriamiento sea mayor, como se muestra en la tabla XXI.

Tabla XXI. **Temperatura de anillo y salida de turbina**

Núm.	Temperatura anillo	Temperatura salida turbina
1	51,5	40,4
2	50,8	40,4
3	50,8	40,4
4	50,65	40,4
5	49,35	40,4
6	48,8	40,4
7	48,75	40,4
8	48,5	40,4
9	48,2	40,4
10	48,2	40,4
:	:	:
:	:	:
73	41,15	40,4
74	40,55	40,4
<b>Promedio</b>	<b>45,83</b>	40,4
<b>Variación</b>	<b>13,45 %</b>	

Fuente: elaboración propia.

La tabla XXI determina que el calor por radiación emitido por el tornillo extrusor aumenta la temperatura de salida de la turbina en un 13,45 %, valor que es importante tomar en cuenta para determinar la temperatura del aire.

Para establecer la temperatura de salida del aire, es importante definir el principal objetivo, el cual es mejorar la calidad y aumentar la eficiencia de la extrusora 21 en un 33 % por medio de la velocidad, por lo que se debe determinar la velocidad promedio. Se tomaron 74 datos de diferentes órdenes de producción y de los mismos se obtuvo la velocidad promedio, dando un resultado de 34,13 kg/h.

Entonces, la velocidad que se desea obtener de la máquina es de:

$$v = 34,13 * 1,33 = 45,39 \text{ kg/h}$$

Con el propósito de identificar la relación que existe entre la temperatura y la velocidad, se procede hacer un análisis de regresión lineal y determinar la temperatura necesaria del aire para llegar a los 45,39 kg/h. El primer valor que se determinará será el coeficiente de correlación  $r$ , debido a que este nos indicará si existe una fuerte relación entre la temperatura y la velocidad de la máquina con base en la tabla XXII.

Si el coeficiente de correlación  $r$  se encuentra cercano a 1, quiere decir que existe una fuerte relación entre las dos variables de interés y viceversa para 0 en este caso las variables de interés es la temperatura y la velocidad. El signo indica si las variables son directamente o inversamente proporcionales. Por ende, se esperaría que la temperatura y la velocidad estuvieran lo más cercanas a 1 con signo negativo.

Tabla XXII. Interpretación del valor de coeficiente de correlación

Valor	Significado
-1	Correlación negativa grande y perfecta
-0,9 a -0,99	Correlación negativa muy alta
-0,7 a -0,89	Correlación negativa alta
-0,4 a -0,69	Correlación negativa moderada
-0,2 a -0,39	Correlación negativa baja
-0,01 a -0,19	Correlación negativa muy baja
0	Correlación nula
0,01 a 0,19	Correlación positiva muy baja
0,2 a 0,39	Correlación positiva baja
0,4 a 0,69	Correlación positiva moderada
0,7 a 0,89	Correlación positiva alta
0,9 a 0,99	Correlación positiva muy alta
1	Correlación positiva grande y perfecta

Fuente: *Slide player*. [ocwus.us.es/ analisis-de-datos-en-la-investigacion](http://ocwus.us.es/analisis-de-datos-en-la-investigacion). Consulta: febrero de 2015.

Para determinar el valor de r se utiliza la siguiente ecuación:

$$r = \frac{\sum xy}{\sqrt{\sum x^2 \sum y^2}}$$

Donde:

$r = \text{coeficiente de correlación}$

$$x = X - \bar{X}$$

$$y = Y - \bar{Y}$$

Establecidas las ecuaciones necesarias, se utiliza la información obtenida de las 74 lecturas tomadas para determinar los valores de  $y$ ,  $x$  y  $r$ , como se muestra en tabla XVIII, en donde  $X$  es la variable dependiente, en este caso la velocidad de la máquina y  $Y$  es la variable independiente, es decir la temperatura del anillo de enfriamiento. Con los valores obtenidos se calcula el coeficiente de correlación de la siguiente forma:

$$r = \frac{-1\,029,69}{\sqrt{2\,579,70 * 447,23}} = -0,96$$

Con el valor de  $r$  y la tabla XVII, se concluye que existe una correlación negativa muy alta entre la temperatura y la velocidad, esto quiere decir que la temperatura es inversamente proporcional a la velocidad y que un cambio en la temperatura influye en la velocidad de la máquina.

Una vez que se ha determinado el valor de  $r$  que indica que existe una relación fuerte entre la temperatura y la velocidad, se procede a determinar una ecuación que nos permita pronosticar la temperatura necesaria del aire para aumentar la velocidad en un 33 %. Se debe tomar en cuenta que la forma de calcular el coeficiente  $r$  es para una ecuación de primer grado, por lo tanto se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$y = b + ax$$

$$b = \frac{\sum y_i - a \sum x_i}{N}$$

$$a = \frac{N \sum x_i y_i + \sum x_i \sum y_i}{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

En las ecuaciones anteriores se sustituyen los valores de la tabla XVIII y se encuentra la siguiente ecuación:

$$y = 59,33 - (0,39)(x)$$

La ecuación encontrada es la que servirá para determinar la temperatura necesaria para aumentar la velocidad. Para esto se sustituye en el valor de x de la ecuación el valor deseado, de la siguiente forma:

$$y = 59,33 - (0,39 * 45,39)$$

$$y = 41,22$$

El valor obtenido de y es la temperatura necesaria para aumentar la velocidad de la máquina en un 33 %. Sin embargo, esta no es la temperatura a la cual saldrá del intercambiador de calor, debido a que se debe tomar en cuenta el calor en forma de radiación que es del 13,45 %, por lo que la temperatura de salida debe ser igual a 36,33 °C.

Tabla XXIII. Datos para la elaboración de una ecuación para pronosticar la temperatura de salida del aire

No.	Orden de producción	Temperatura Anillo (Y)	Caudal (kg/h) (X)	X*Y	X^2	Xi-m	Yi-m	(Xi-m)^2	(Yi-m)^2	x*y
1	79 723,00	51,50	24,93	1 283,79	621,41	(8,90)	5,67	79,16	32,13	(50,43)
2	80 346,00	50,80	25,26	1 283,46	638,31	(8,56)	4,97	73,28	24,68	(42,53)
3	81 266,00	50,80	25,38	1 289,07	643,91	(8,45)	4,97	71,40	24,68	(41,98)
4	79 723,00	50,65	25,38	1 285,26	643,91	(8,45)	4,82	71,40	23,21	(40,71)
5	81 763,00	49,35	25,74	1 270,17	662,44	(8,09)	3,52	65,41	12,38	(28,45)
6	81 765,00	48,80	26,10	1 273,70	681,23	(7,72)	2,97	59,68	8,81	(22,93)
7	81 266,00	48,75	26,10	1 272,39	681,23	(7,72)	2,92	59,68	8,51	(22,54)
8	79 723,00	48,50	26,61	1 290,70	708,22	(7,21)	2,67	52,03	7,12	(19,24)
9	81 788,00	48,20	26,83	1 292,98	719,60	(7,00)	2,37	49,00	5,61	(16,58)
10	82 476,00	48,20	26,90	1 296,51	723,53	(6,93)	2,37	47,98	5,61	(16,40)
71	81 280,00	41,65	42,95	1 788,84	1 844,64	9,12	(4,18)	83,25	17,49	(38,16)
72	81 655,00	41,50	43,05	1 786,60	1 853,35	9,23	(4,33)	85,10	18,77	(39,96)
73	86 121,00	41,15	43,37	1 784,85	1 881,32	9,55	(4,68)	91,18	21,92	(44,71)
74	81 765,00	40,55	44,88	1 820,04	2 014,57	11,06	(5,28)	122,29	27,90	(58,41)
Totales		3 391,58	2 503,08	113 691,59	87 247,24	0,00	(0,00)	2 579,71	447,23	(1 029,70)
Medias		45,83	33,83	1 536,37	1 179,02	0,00	(0,00)	34,86	6,04	(13,91)

Fuente: elaboración propia.

### 3.4.7. Área del intercambiador de calor

Una vez determinadas las variables conocidas de la ecuación del balance de energía para el aire, se procede al cálculo del área del intercambiador. Esta área ya toma en cuenta la velocidad a la cual correrá la máquina, la cantidad de energía que el aire caliente perderá con base en la ecuación de balance de energía del agua, la densidad del fluido de trabajo y el calor específico del aire.

Para determinar el área del intercambiador de calor, es necesario utilizar la siguiente ecuación:

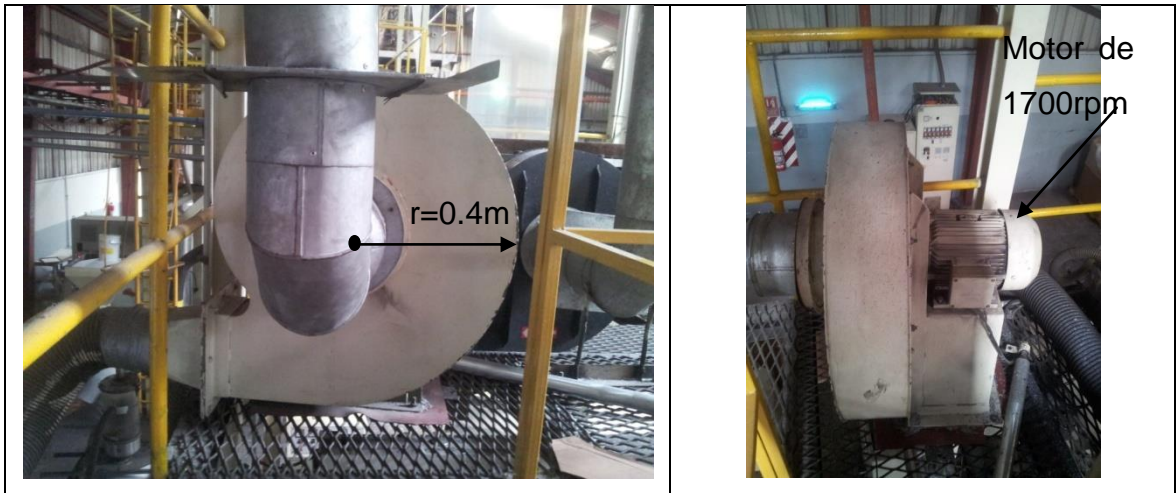
$$A_t = \frac{Q}{v * \rho * C_{p_a} * (T_{ae} - T_{as})}$$

En donde la velocidad  $v$ , viene determinada por la velocidad a la que la turbina entrega el aire al anillo de enfriamiento. Esta velocidad se encuentra mediante la relación entre las revoluciones por minuto ( $w$ ) que se leen directamente de la turbina y el radio de las aspas de la turbina, de la siguiente forma:

$$v = w * r$$

El valor de la lectura de la turbina fue de 1 700 rpm, el cual viene definido por el motor de la misma y con un radio de 0,4 m, la turbina se presenta en la figura 30.

Figura 32. **Radio y motor de turbina de admisión de aire**



Fuente: extrusora 21 Departamento de Extrusión, Polytec.

La velocidad lineal del aire en metros por segundo entregado por la turbina es de:

$$v = \frac{1\,700 * 0,4}{60} = 11,33 \text{ m/s}$$

El calor específico del aire se puede determinar de la misma forma como se determinó el calor específico del agua, para este se utiliza la tabla del anexo 1, a una temperatura de 40,4 °C, los valores encontrados son los siguientes:

Temperatura (k <sup>0</sup> )	Cp
300	1 005,7
313,55	X
350	1 009,0

$$\frac{300 - 313,55}{300 - 350} = \frac{1\,005,7 - x}{1\,005,7 - 1\,009}$$

$$x = 1\,006,59$$

Encontrada la velocidad lineal y el calor específico del aire, se procede al cálculo del área del intercambiador de calor, sustituyendo los valores anteriormente encontrados en la ecuación del área transversal, de la siguiente forma:

$$A_t = \frac{14\,928,84}{11,33 * 1,17 * 1\,005,7 * (40,4 - 36,33)} = 0,27 \text{ m}^2$$



Esta área es la que indicará las dimensiones del intercambiador de calor. Las dimensiones del intercambiador pueden tener distintos tipos de valores siempre y cuando cumplan con el área de  $0,27\text{m}^2$  para la transferencia de calor. Para establecer el ancho y el largo del intercambiador de calor se tomará en cuenta las dimensiones del lugar, también se debe tomar en cuenta que el intercambiador tendrá una base que lo sostenga, la cual necesitará más espacio.

Según el Acuerdo Gubernativo 229-2014 de seguridad y salud ocupacional en el artículo 24 establece que la distancia entre pasillos secundarios debe de ser de 1 metro y en el artículo 25 menciona que el operador debe tener una distancia mínima para la operación de 90 cm. Teniendo en cuenta la seguridad industrial, el pasillo secundario por donde se encuentra esta extrusora es de 1 m y el espacio en donde se colocará el intercambiador de calor es de 1,70 m, por lo que deja un espacio libre de 90 cm para la operación y 80 cm para el intercambiador.

Se ha elegido un ancho de 60 cm con el fin de dejar 10 cm de cada lado del intercambiador para la base del mismo y una altura de 45 cm, con estas dimensiones no se viola el área necesitada para la transferencia de calor de  $0,27\text{ m}^2$ .

Determinadas las dimensiones se procede a definir el número de aletas que tendrá el intercambiador de la siguiente forma:

$$\#Aletas = l/a$$

Donde

a= alto de las aletas para un intercambiador de aluminio

l= Altura del intercambiador de calor

Sustituyendo valores se obtiene:

$$\#Aletas = \frac{45 \text{ cm}}{0,9 \text{ cm}} = 50 \text{ aletas}$$

### 3.4.8. Cálculo de la efectividad del intercambiador de calor

La efectividad de un intercambiador es un valor que sirve para predecir cómo se comportará el dispositivo cuando realice la transferencia de calor, de la misma forma permite hacer predicción acerca de la temperatura de salida de un fluido. La efectividad se puede determinar mediante la siguiente ecuación:

$$\epsilon = \frac{C_c(T_1 - T_2)}{C_{\min}(T_1 - T_{r1})}$$

Donde

$C_c = m_a \cdot C_{pa}$  (flujo másico del aire \* calor específico del aire)

$C_{\min} = m_f \cdot C_{pf}$  (flujo másico del agua \* calor específico del agua)

Sustituyendo valores se encuentra:

$$\epsilon = \frac{3\,668,02(40,4 - 36,33)}{1\,571,45(40,4 - 19,9)} = 46,34 \%$$

Los valores promedio de efectividad de los intercambiadores de calor se mantienen alrededor del 30 al 50 %, por lo que un valor de efectividad del 46,34 % indica que el intercambiador tendrá un buen desempeño al momento de realizar la transferencia de calor. La información resumida que se necesita del intercambiador de calor para aumentar la velocidad de la extrusora 21 en un 33 % se detalla en la tabla XXIV.

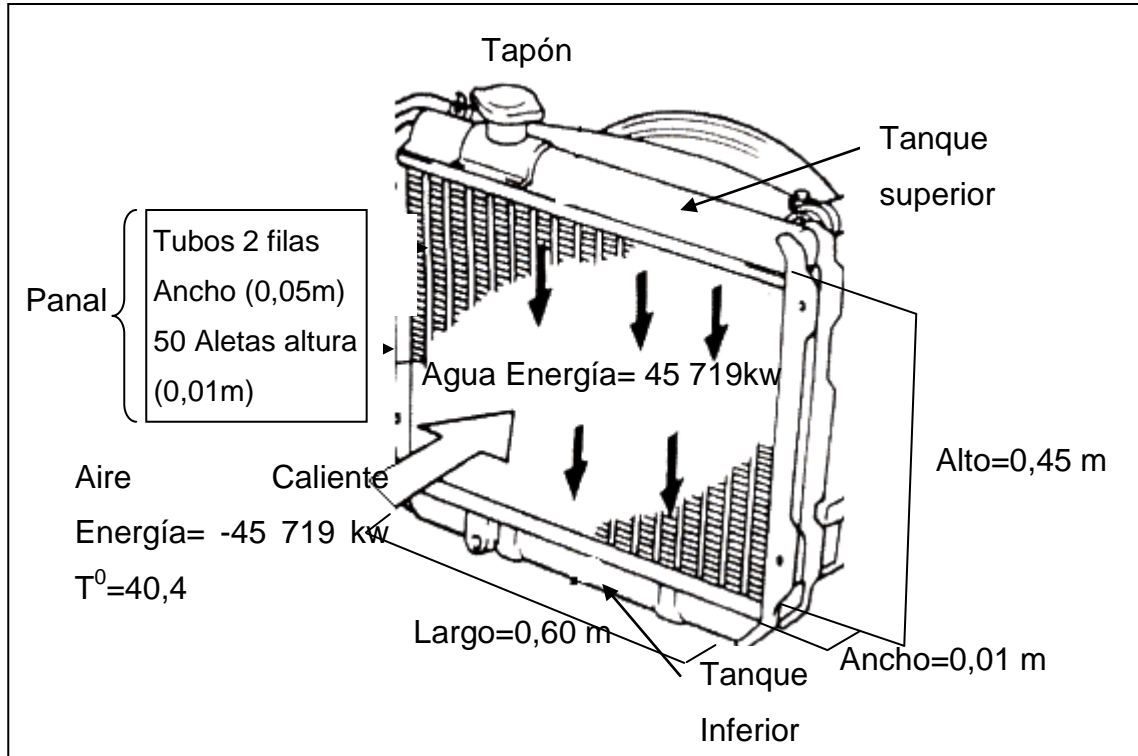
Tabla XXIV. **Características del intercambiador de calor**

<b>Material</b>	<b>Aluminio</b>
Número de tubos por fila	2,00
Ancho por tubo (m)	0,05
Altura aletas (m)	0,01
Energía (kw)	45 719,58
Temperatura de entrada aire °C	40,40
Temperatura de salida aire °C	36,33
Área (m <sup>2</sup> )	0,27
Largo	0,60
Alto	0,45
Número Aletas	50,00
Efectividad	46,34 %

Fuente: elaboración propia.

En la figura 31 se muestran los valores encontrados para el intercambiador de calor, de la misma forma se encuentra el diseño del intercambiador en el anexo 7.

Figura 33. **Características del intercambiador de calor**

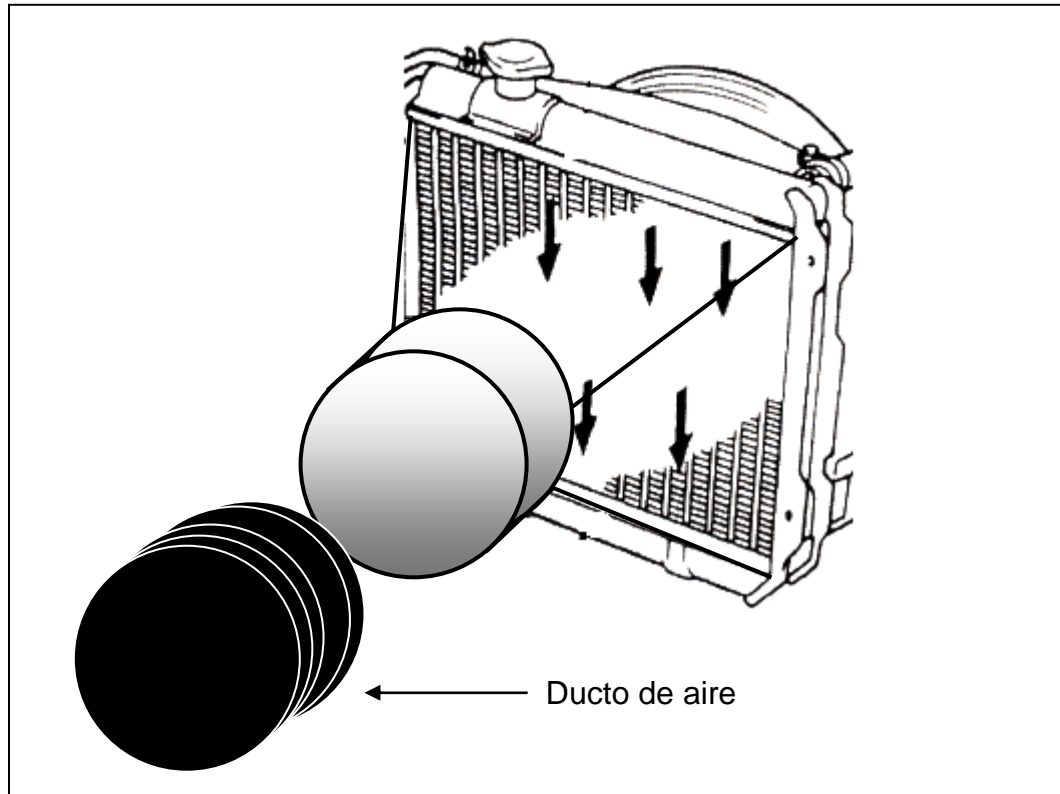


Fuente: *Aficionados a la mecánica*. <http://www.aficionadosalamecanica.com/refrigeracion-motor.htm>. Consulta: junio de 2015.

### 3.5. Costo de la propuesta

Como se determinó en la sección 3.4.1, el material que se utilizará para el intercambiador de calor es el aluminio, el cual tiene un costo por kilogramo de \$ 1,86, siendo este más bajo que el cobre en un 70 %. Al determinar el costo de la propuesta se debe tomar en cuenta hacer una estructura que conecte el ducto del aire de la turbina hacia el intercambiador, como se muestra en la figura 32.

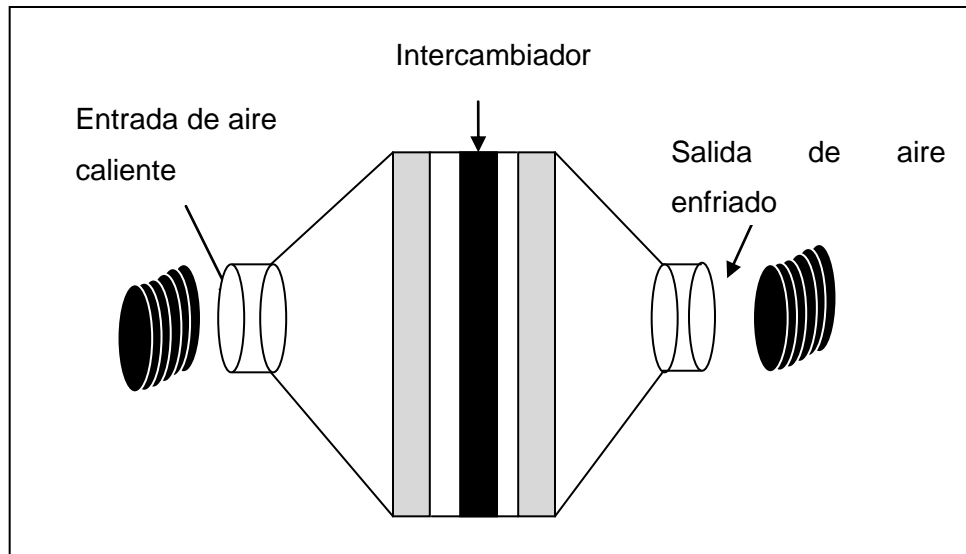
Figura 34. Ducto de aire hacia el intercambiador de calor



Fuente: *Aficionados a la mecánica*. <http://www.aficionadosalamecanica.com/refrigeracion-motor.htm>. Consulta: junio de 2015.

El intercambiador, la base y estructura serán de aluminio, para determinar el costo de la estructura completa es necesario determinar el volumen de dicha estructura. Para ejemplificar esto de una mejor manera, se muestra la figura 33.

Figura 35. **Estructura del intercambiador de calor**

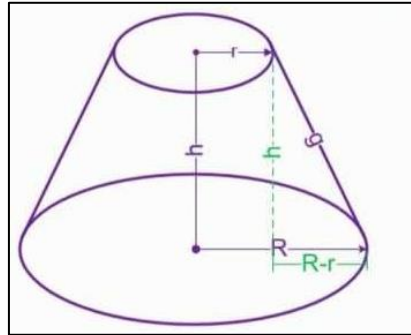


Fuente: elaboración propia.

Esta forma se ha seleccionado según el diámetro de salida de aire de la turbina, el cual es de 0,16 m, si se selecciona la entrada y la salida como un cono truncado se puede determinar el volumen de la estructura con la siguiente ecuación:

$$v = \frac{1}{3}\pi h(R^2 + r^2 + Rr)$$

Figura 36. **Cono truncado**



Fuente: *Hiru*. [http://www.hiru.eus/image/image\\_gallery](http://www.hiru.eus/image/image_gallery). Consulta: junio de 2015.

Donde

R=0,60m

r=0,16m

h=0,50m

Al momento de establecer la altura h se debe tener el cuidado de dar el suficiente espacio para que el aire tenga contacto con toda el área del intercambiador, debido a que si se le da muy poca distancia, la mayor parte del aire no tendrá el suficiente tiempo para enfriar y una buena parte del intercambiador no será utilizado.

Sustituyendo valores en la ecuación de volumen se obtiene:

$$v = \frac{1}{3}\pi h(0,60^2 + 0,16^2 + 0,60 * 0,16) = 0,25 \text{ m}^3$$

A esta ecuación se le debe de restar el volumen interno, y para esto se utiliza la misma ecuación anterior con la variación del radio R, en donde este depende del grosor de las paredes de la estructura de aluminio. Para el grosor se seleccionó el mismo que el del intercambiador de calor de 0,01, por lo que el radio R es de 0,59 y el volumen total es:

$$v = \frac{1}{3}\pi h(0,59^2 + 0,16^2 + 0,59 * 0,16) = 0,24 m^3$$

Por lo tanto el volumen de la estructura es de 0,01 m<sup>3</sup>, debido a que son dos conos truncados el volumen se multiplica por dos. De la misma forma se determina el volumen para los dos cilindros que se encuentran a la entrada y salida del aire mediante la siguiente ecuación:

$$v = (\pi R^2 h) - (\pi r^2 h) = \pi * 0,16^2 * 0,10 - \pi * 0,15^2 * 0,10 = 0,0009 m^3$$

Entonces el volumen para la estructura total del intercambiador de calor es la siguiente:

$$v = \text{Cono} * 2 + \text{intercambiador} + 2 * \text{cilindro}$$

$$v = 0,01 * 2 + 0,0027 + 0,0009 * 2 = 0,024 m^3$$

Una vez determinado el volumen total de la estructura, se procede a determinar el peso de dicha estructura, para esto se utiliza el peso específico del aluminio de la siguiente manera:

$$\text{Peso} = \frac{2700 \text{ kg}}{m^3} * 0,024 m^3 = 64,8 \text{ kg}$$



Con el peso de la estructura y teniendo el costo por kilogramo de aluminio, se determina el costo por materias primas de la siguiente forma:

$$\text{Costo m.p} = 64,8kg * \frac{\$ 1,86}{kg} = \$ 120,53$$

Para la elaboración del intercambiador se necesita personal del Departamento de Mantenimiento, el personal gana en promedio Q 6 000,00 al mes. Para la elaboración del intercambiador se tiene estimado utilizar un mecánico del Departamento de Mantenimiento para finalizar el intercambiador en un plazo de una semana.

También se toma en cuenta el personal que estará apoyando en la elaboración del mismo de manera indirecta, tal como el supervisor de la extrusora, el operador de la extrusora, el personal de compras, el jefe de mantenimiento y los supervisores de mantenimiento. Debido a que todo este personal no utiliza todo su tiempo para dicho proyecto, se utilizará el dato que la empresa ha establecido en mano de obra indirecta, el cual proviene de un prorrateo del total de los gastos de la empresa en conceptos de salarios y prestaciones con un valor de Q 71,00/h.

Para la elaboración se utilizará soldadura oxiacetilénica, como se indicó en la sección 3.4.1, para esto el cilindro de oxígeno junto con el de acetileno tienen un costo de Q 415,00. Esto debe ir ligado a la seguridad industrial, por lo que también se debe adquirir equipo de protección personal, lo que incluye careta (Q 100), guates (Q 50/par) y bata (Q 95). Se han incluido otros gastos para cubrir todos los gastos que sean de oficina y papelería en la tabla XXV.

Tabla XXV. **Suministros, costos directos y servicios**

Rubro	Unidad	Cantidad	Precio	Total
Suministros				Q 1 637,94
Aluminio	kg	64,80	Q 14,32	Q 927,94
Cilindros oxiacetilénicos	Unidad	2,00	Q 207,50	Q 415,00
Caretas	Unidad	1,00	Q 100,00	Q 100,00
Guantes	Unidad	2,00	Q 50,00	Q 100,00
Bata	Unidad	1,00	Q 95,00	Q 95,00
Costo de servicio				Q 1 200,00
Mecánico	Horas	48,00	Q 25,00	Q 1 200,00
Costos directos				Q 6 816,00
Supervisión	Horas	48,00	Q 71,00	Q 3 408,00
Operador	Horas	48,00	Q 71,00	Q 3 408,00
			<b>TOTAL</b>	<b>Q 9 653,94</b>

Fuente: elaboración propia.

El total de dinero para colocar un intercambiador de calor en la extrusora 21 es de Q 9 653,94.

### 3.6. Evaluación de la propuesta

Para determinar si se debe invertir en la propuesta, se debe realizar ciertas evaluaciones con el propósito de definir si es viable invertir en el intercambiador a modo de obtener rentabilidad.

Para realizar la evaluación es necesario establecer ciertos factores que serán de ayuda, estos son:

- Inversión inicial
- Flujos de efectivo

La inversión inicial ha sido establecida en la sección anterior con un valor de Q 9 653,94. Para el cálculo de flujos de efectivo es necesario establecer cuánto dinero más se gana con la propuesta, así como cuánto dinero se deberá invertir en el mantenimiento del intercambiador.

La velocidad actual es de 34,13 kg/h, con el intercambiador la velocidad aumenta a 45,22 kg/h y se mejora la calidad al brindarle estabilidad a la burbuja de polietileno, por lo que existe menos desperdicio, pero para el cálculo de flujo de efectivo únicamente se tomará en cuenta la velocidad y no el beneficio de calidad.

Es importante definir que el costo por kilogramo de la extrusora oscila alrededor de Q 17,50 y tiene un precio de venta de Q 21,00/kg. Tomando en cuenta doble turno de 12 horas cada uno, durante 6 días por semana con un cambio de pedido promedio de 1 por día y una duración de 30 minutos, se determina en la tabla XXVI.

Tabla XXVI. **Ganancia propuesta contra ganancia actual**

Variable	Actual	Propuesta
Velocidad (kg/h)	34,13	45,22
Horas/día	23,5	23,5
kg/día	802,06	1 062,67
kg/ semana	4 812,33	6 376,02
kg/mes	19 249,32	25 504,08
Q/kg	Q 17,50	Q 17,50
Costo total	Q 336 863,10	Q 446 321,40
Precio de venta	Q 21,00	Q 21,00
Ganancia mes	Q 67 372,62	Q 89 264,28
Ganancia anual	Q 808 471,44	Q 1 071 171,36
<b>Ganancia propuesta anual</b>	<b>Q 262 699,92</b>	

Fuente: elaboración propia.

Para el mantenimiento del intercambiador, el cual únicamente incluye limpieza, se estima realizar un gasto de Q 1 000 por cada 6 meses, entonces el flujo de dinero para la propuesta anual es de Q 262 699,92.

### 3.6.1. TMAR

Para realizar la primera evaluación económica se procede al cálculo de la TMAR que servirá para el cálculo del VPN. La TMAR determinará la ganancia que Polytec desea obtener por invertir su dinero en la implementación del intercambiador de calor, es importante definir que se invertirá capital de la empresa y no se solicitará financiamiento, por lo que la TMAR viene definida por la siguiente ecuación:

$$TMAR = i + f + i * f$$

Donde

i= premio al riesgo

f= inflación

Para determinar la TMAR se obtiene del banco de Guatemala el porcentaje de inflación del 2,32 % mensual y para el premio al riesgo, que es el porcentaje de riesgo de un capital invertido en un proyecto, se estima en un 5 % que es el porcentaje que la empresa desea recuperar por invertir los Q 9 653,94 en un intercambiador, determinados estos valores se procede al cálculo de la TMAR de la siguiente forma:

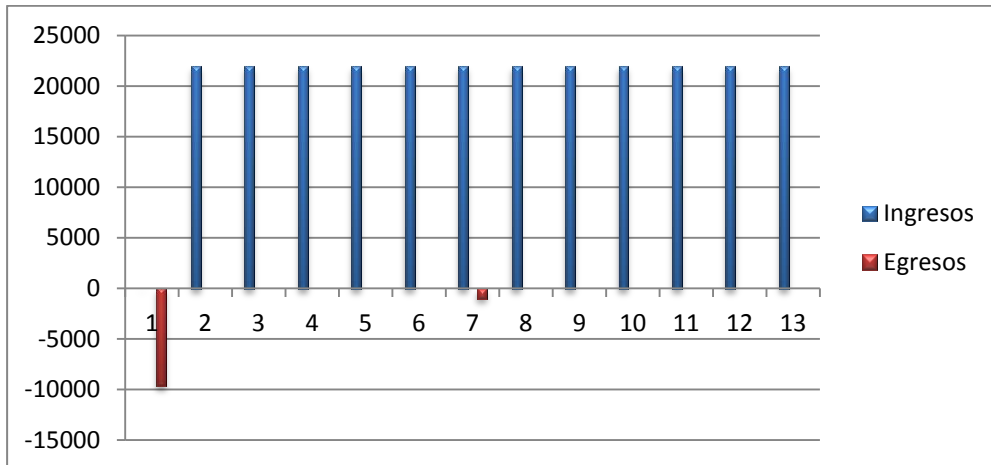
$$TMAR = 5 \% + 2,32 \% + (5 \% * 2,32 \%) = 7,44 \%$$

### **3.6.2. VPN**

Para determinar el VPN, se utilizará un periodo de 1 año, con una tasa de mínima atractiva de retorno del 7,44 % mensual simple según la TMAR, para esto se realizó la siguiente tabla que contiene los flujos de efectivo del proyecto, así mismo tiene una columna llamada valor presente, la cual determina el valor presente según el mes, el flujo de efectivo y la tasa de rendimiento deseada.

Los ingresos mensuales se determinaron de la resta de los valores del campo “ganancia mes” de la tabla XXVI. Con el fin de tener un panorama más claro acerca del flujo de fondos se presenta la figura 33, en donde se identifica que los ingresos generados en un año con la propuesta del intercambiador de calor, son mayores a los egresos generados durante dicho periodo. Esto da la pauta para determinar que el proyecto es rentable, aún así es necesaria la evaluación financiera del VPN para corroborarlo, dicha evaluación se presenta en la tabla XVII.

Figura 37. Flujo de efectivo



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. **VPN a una TMAR de 7,44 %**

Mes	Ingresos	Egresos	Flujo efectivo	Valor presente
0	Q -	Q 9 653,94	Q (9 653,94)	(Q9 653,94)
1	Q 21 891,66		Q 21 891,66	Q20 375,71
2	Q 21 891,66		Q 21 891,66	Q18 964,73
3	Q 21 891,66		Q 21 891,66	Q17 651,46
4	Q 21 891,66		Q 21 891,66	Q16 429,13
5	Q 21 891,66		Q 21 891,66	Q15 291,45
6	Q 21 891,66	Q 1 000,00	Q 20 891,66	Q13 582,41
7	Q 21 891,66		Q 21 891,66	Q13 246,97
8	Q 21 891,66		Q 21 891,66	Q12 329,65
9	Q 21 891,66		Q 21 891,66	Q11 475,85
10	Q 21 891,66		Q 21 891,66	Q10 681,17
11	Q 21 891,66		Q 21 891,66	Q9 941,52
12	Q 21 891,66		Q 21 891,66	Q9 253,09
			<b>VPN</b>	<b>Q159 569,20</b>
			<b>Tasa de rendimiento</b>	<b>7,44 %</b>

Fuente: elaboración propia.

En la tabla anterior se determinaron los valores presentes de los flujos durante 12 meses y se comparó con respecto a la inversión inicial. El resultado, como se logra ver, es positivo, por lo que es una propuesta atractiva para que la empresa invierta en un intercambiador de calor, debido a que será rentable y capaz de generar la suficiente cantidad de dinero para recuperar la inversión. El valor del VPN de la propuesta indica que el intercambiador renta por encima de la tasa de rendimiento, para determinar la rentabilidad del mismo se calculará el indicador de rentabilidad TIR.

### 3.6.3. TIR

Utilizando la tabla anterior se procede al cálculo de la TIR (tasa interna de rentabilidad). El criterio para aceptar la propuesta del intercambiador, será que la TIR sea mayor que la tasa de rendimiento establecida en el VPN, este indicador determinará si el intercambiador es un proyecto en el cual vale la pena invertir y si devolverá utilidades.

Tabla XXVIII. Tasa interna de rentabilidad

Mes	Ingresos	Egresos	Flujo efectivo	Valor presente
0	Q -	9 653,94	Q (9 653,94)	Q (9 653,94)
1	Q 21 891,66		Q 21 891,66	Q 20 375,71
2	Q 21 891,66		Q 21 891,66	Q 18 964,73
3	Q 21 891,66		Q 21 891,66	Q 17 651,46
4	Q 21 891,66		Q 21 891,66	Q 16 429,13
5	Q 21 891,66		Q 21 891,66	Q 15 291,45
6	Q 21 891,66	Q 1 000,00	Q 20 891,66	Q 13 582,41
7	Q 21 891,66		Q 21 891,66	Q 13 246,97
8	Q 21 891,66		Q 21 891,66	Q 12 329,65
9	Q 21 891,66		Q 21 891,66	Q 11 475,85
10	Q 21 891,66		Q 21 891,66	Q 10 681,17
11	Q 21 891,66		Q 21 891,66	Q 9 941,52
12	Q 21 891,66		Q 21 891,66	Q 9 253,09
			<b>VPN</b>	<b>Q 159 569,20</b>
			<b>Tasa de rendimiento</b>	<b>7,44 %</b>
			<b>TIR</b>	<b>226,74 %</b>

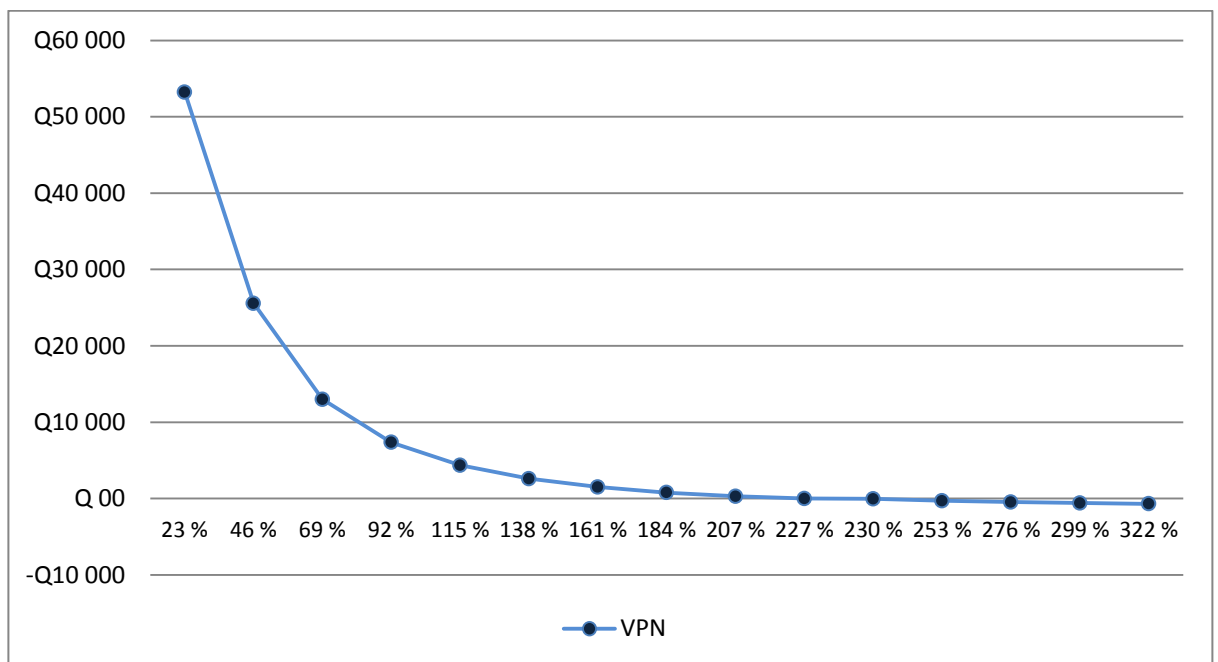
Fuente: elaboración propia.



Según la tabla anterior, la TIR es mayor que la tasa de rendimiento, por lo que el proyecto generará mayor rentabilidad que la tasa de rendimiento establecida por Polytec. La figura 34 muestra en dónde es que el VPN cambia de signo, en este cambio de signo es en donde se presenta la TIR.

Según la figura 34 a una tasa 227 % es donde el proyecto es indiferente, es decir, en donde la inversión es igual a los flujos de fondo, con esta tasa se puede determinar que se puede invertir a un costo de capital hasta el 227 % y por arriba de este se presentarán pérdidas.

Figura 38. **Tasa a la cual el VPN es cero**



Fuente: elaboración propia.

### **3.7. Comparación situación actual y propuesta**

Con base en la información anterior, se logra determinar que invirtiendo en la propuesta se logra obtener más del rendimiento esperado, se logra aumentar la velocidad de la máquina en un 33 % y la inversión se recupera en menos de 12 meses. Se espera que al momento de implementar el intercambiador de calor el porcentaje de defectos por variación de calibre baje de la primera posición en el Pareto que se definió en la sección 3.1 en la tabla XIV, y así mejorar la calidad y disminuir la cantidad de desperdicio generada por rechazos.

De la misma forma, se tomó en cuenta para las dimensiones del intercambiador el reglamento de seguridad y salud ocupacional, debido a que dicho reglamento entrará en vigencia en 2015.

Haciendo una comparación con respecto a las eficiencias actuales y de la propuesta, se presenta información acerca de la eficiencia de la máquina según la tabla de eficiencias de junio establecidas en el capítulo 2 sección 2.4.2. En donde espera aumentar la eficiencia de un 37 % a un 49 % con la propuesta, como se muestra en la tabla XXIX.

Tabla XXIX. Comparación de la situación actual y la propuesta

Situación Actual							Propuesta			
Día	Velocidad (Kg/h)	Producción teórica (Kg)	Producción Real (Kg)	Tiempo total	Velocidad Actual	Eficiencia Actual	Velocidad Propuesta	Producción teórica (Kg)	Producción Propuesta	Eficiencia Propuesta
2	85,00	2 040,00	796,00	24,00	33,17	39 %	44,11	2 040,00	1 058,64	51,89 %
3	85,00	1 912,50	1 028,00	22,50	45,69	54 %	60,77	1 912,50	1 367,33	71,49 %
4	85,00	1 912,50	668,00	22,50	29,69	35 %	39,49	1 912,50	888,53	46,46 %
5	85,00	1 912,50	905,00	22,50	40,22	47 %	53,50	1 912,50	1 203,75	62,94 %
6	85,00	2 040,00	859,00	24,00	35,79	42 %	47,60	2 040,00	1 142,40	56,00 %
7	85,00	2 040,00	772,00	24,00	32,17	38 %	42,78	2 040,00	1 026,72	50,33 %
9	85,00	1 912,50	809,00	22,50	35,96	42 %	47,82	1 912,50	1 075,95	56,26 %
10	85,00	2 040,00	856,00	24,00	35,67	42 %	47,44	2 040,00	1 138,56	55,81 %
11	85,00	2 040,00	794,00	24,00	33,08	39 %	44,00	2 040,00	1 056,00	51,76 %
12	85,00	2 040,00	777,00	24,00	32,38	38 %	43,06	2 040,00	1 033,44	50,66 %
13	85,00	2 040,00	827,00	24,00	34,46	41 %	45,83	2 040,00	1 099,92	53,92 %
14	85,00	1 870,00	587,00	22,00	26,68	31 %	35,49	1 870,00	780,78	41,75 %
16	85,00	1 912,50	569,00	22,50	25,29	30 %	33,63	1 912,50	756,68	39,56 %
17	85,00	2 040,00	627,00	24,00	26,13	31 %	34,75	2 040,00	834,00	40,88 %
18	85,00	2 040,00	627,00	24,00	26,13	31 %	34,75	2 040,00	834,00	40,88 %
19	85,00	2 040,00	617,00	24,00	25,71	30 %	34,19	2 040,00	820,56	40,22 %
20	85,00	1 912,50	614,00	22,50	27,29	32 %	36,29	1 912,50	816,53	42,69 %
21	85,00	2 040,00	553,00	24,00	23,04	27 %	30,65	2 040,00	735,60	36,06 %
23	85,00	2 040,00	556,00	24,00	23,17	27 %	30,81	2 040,00	739,44	36,25 %
24	85,00	2 040,00	830,00	24,00	34,58	41 %	46,00	2 040,00	1 104,00	54,12 %
<b>MEDIA</b>					<b>31,32</b>	<b>37 %</b>	<b>41,65</b>			<b>49,00 %</b>

Fuente: elaboración propia.



## **4. IMPLEMENTACIÓN DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR**

Una vez establecido que el intercambiador de calor será capaz de brindar la temperatura necesaria para aumentar la velocidad de la máquina en un 33 %, es necesario establecer todas las actividades necesarias para la construcción e implementación del mismo, desde el conocimiento del proceso de fabricación del intercambiador de calor, hasta la selección e instalación de las tuberías y mangueras.

### **4.1. Selección del intercambiador de calor**

Para la selección del intercambiador de calor se debe tomar como base los parámetros establecidos en el capítulo 3 y de esta forma determinar cuál de los siguientes intercambiadores se seleccionará.

- Intercambiadores tubulares
- Intercambiadores con tubos de aire
- Intercambiador nido de abeja
- Intercambiador de circulación descendente
- Intercambiador de circulación transversal

Se selecciona un intercambiador de circulación transversal, debido a que este puede ser fabricado de aluminio y es más eficaz que los demás, según las características definidas en el tabla XIX, en donde su bajo peso, precio y alta transferencia de calor son las características que satisfacen los requerimientos del proyecto.

Adicional a las características mencionadas, las condiciones bajo las cuales estará sometido el intercambiador de calor pueden dar origen a la corrosión y el aluminio posee una capa llamada alúmina responsable de impedir la corrosión del metal y prolongar la vida útil del intercambiador.

## **4.2. Montaje del intercambiador de calor**

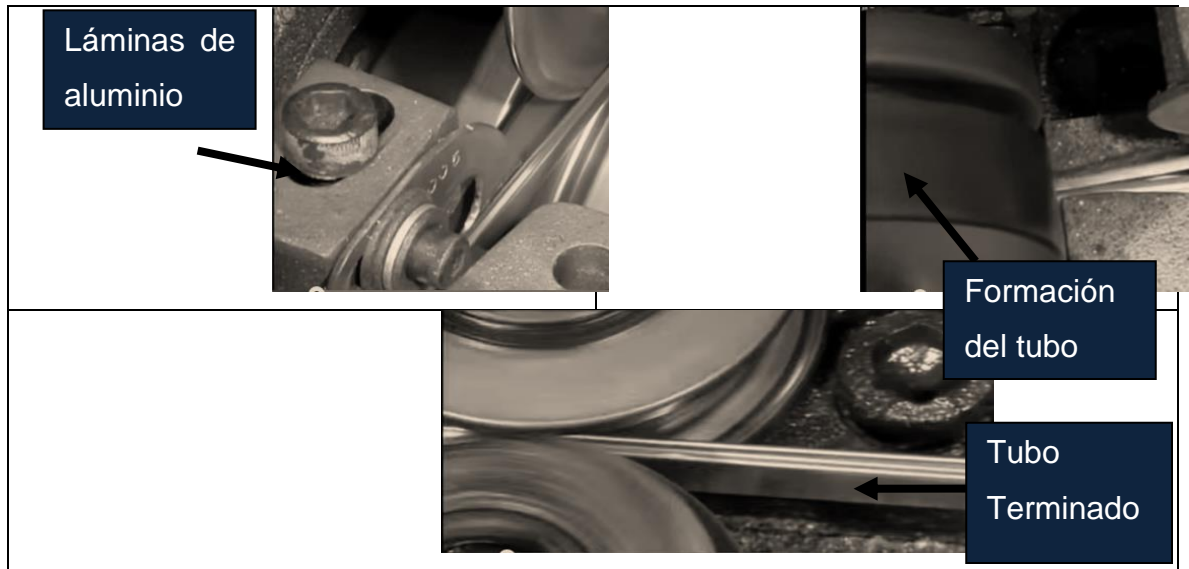
Para el montaje del intercambiador de calor se deben tomar en cuenta ciertos aspectos que serán de gran importancia para el rendimiento del intercambiador. Tener el análisis acerca de los elementos mecánicos, las soldaduras, mangueras, tuberías y pruebas de calidad del intercambiador, asegurarán un buen funcionamiento y una vida útil prolongada.

### **4.2.1. Análisis de elementos**

Es importante conocer el proceso de manufactura para el intercambiador de calor con el propósito de identificar en qué puntos del proceso se debe dar especial atención para que cumpla con las especificaciones establecidas en el capítulo 3 y sean los requisitos que el contratista debe cumplir al momento de fabricar el intercambiador de calor.

El proceso empieza con la producción de los tubos del intercambiador por donde circulará el agua proveniente de las tuberías de Polytec. Mediante rodillos se logra hacer la forma de tubo a láminas de aluminio, como se muestra en la figura 36, se debe de verificar que el ancho de los tubos sea de 25,4 mm así como se estableció en el capítulo 3.

Figura 39. **Formación de tubo intercambiador de calor**



Fuente: *Youtube*. <https://www.youtube.com/watch?v=t4WwsXTQ9Fc>. Consulta: marzo de 2015.

La cantidad de tubos a fabricar dependerá de las dimensiones del intercambiador. En el capítulo 3 se determinó el número de aletas que se necesitarán para el intercambiador, el cual fue de 50 aletas, por lo que se necesitarán 48 tubos de aluminio, debido a que en los intercambiadores las aletas son las que empiezan y terminan en la parte superior e inferior del panel para brindar mayor área de contacto y por consiguiente mayor transferencia de calor.

Los tubos se cortan por medio de cuchillas a las dimensiones deseadas, como se muestra en la figura 37, en este caso la longitud de los tubos es de 60 cm.

Figura 40. **Corte de tubos a 60 cm**



Fuente: *Youtube*. <https://www.youtube.com/watch?v=t4WwsXTQ9Fc>. Consulta: marzo de 2015.

En este punto es fundamental que el contratista practique ensayos no destructivos a los tubos de aluminio, proporcionando documentación o antecedentes que respalden la fabricación de los elementos, con el fin de asegurar que no existirán fugas en los tubos del intercambiador de calor. Existen 3 clasificaciones diferentes para los ensayos no destructivos, la clasificación de defectología es la de interés para el intercambiador de calor.

Para el caso de los tubos, se pueden aplicar pruebas superficiales para identificar defectos o grietas, alguno de los ensayos pueden ser ensayos visuales, líquidos penetrantes, partículas magnéticas y electromagnetismo. A causa de que el material de trabajo es aluminio no es posible utilizar el ensayo de partículas magnéticas, debido a que el campo de aplicación para este es únicamente para materiales ferrosos.



Los ensayos electromagnéticos son comúnmente utilizados para la detección de discontinuidades subsuperficiales, y realizar pruebas de este tipo a volúmenes pequeños como el de los tubos del intercambiador puede incurrir en resultados erróneos. Realizar ensayos visuales puede depender mucho del criterio de la persona que lo realiza, es por esto que de primero se debe aplicar un ensayo visual acompañado de un ensayo de líquidos penetrantes si fuese necesario, para los elementos del intercambiador de calor. Para esto es necesario apoyarse en la Norma ASTM E 165-95 y que se siga al pie de la letra el punto de norma número 8 que especifica el procedimiento a realizar.

El ensayo no destructivo por líquidos penetrantes exige un procedimiento en el cual la pieza a someterse al ensayo debe estar completamente limpia, esto se puede hacer mediante un decapado. Posterior a la limpieza, se aplica el líquido penetrante de manera uniforme sobre toda la pieza, a modo de que esta cubra toda la superficie por un determinado tiempo que permita la penetración del líquido en las imperfecciones, el tiempo de penetración dependerá del material. La tabla XXX muestra los tiempos de penetración para el material de aluminio el cual es el material de interés para los tubos, también muestra el mejor líquido para el ensayo.

Tabla XXX. **Tiempos de penetración en aluminio**

Material	Proceso	Penetrante autoemulsionable	Penetrante postemulsionable
Aluminio	Fundición	5 a 15	5
	Extrusión y forja	No se recomienda	10
	Soldadura	30	5

Fuente: *Comtecol*.

<http://www.comtecol.com/intranet/manual/docu/PROCEDIMIENTO%20DE%20INSPECCION%20DE%20SOLDADURA%20LP.pdf>. Consulta: marzo de 2015.

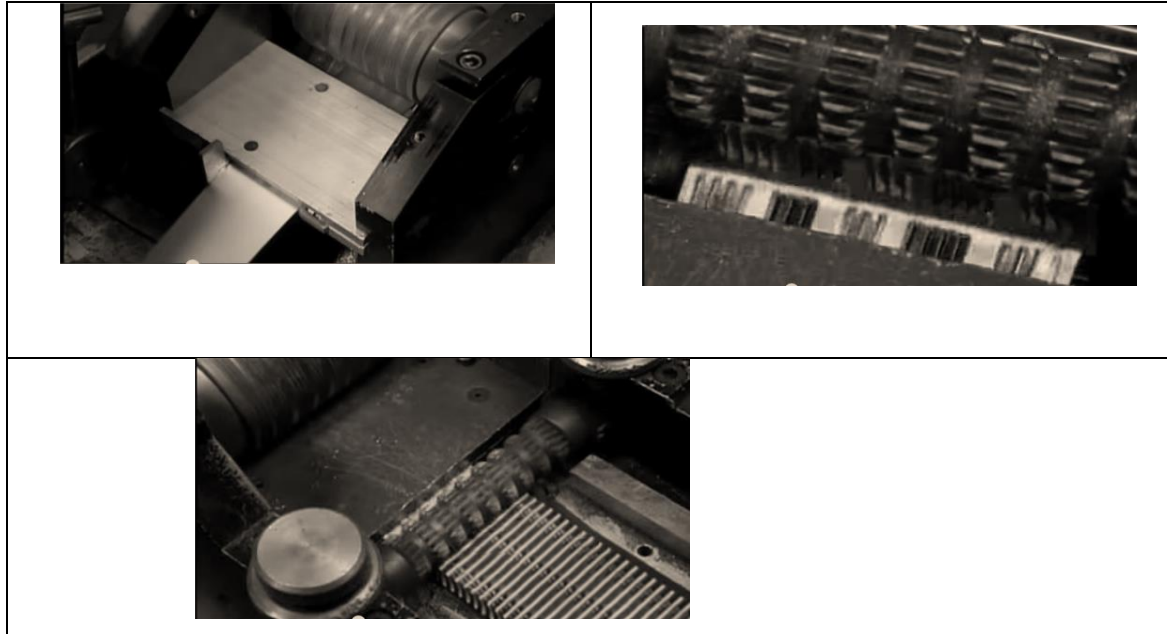
Con base en la tabla XX, se debe permitir un tiempo de 10 minutos utilizando un líquido penetrante postemulsionable, es decir un líquido que sea lavable con agua debido a que lleva un emulsificador. Después de respetar el tiempo de penetración del líquido, se debe de eliminar el exceso de la mejor manera, a modo de no obtener resultados falsos. Posterior a esto, se aplica el polvo revelador, el cual tiene una gran capacidad de absorción y al igual que el líquido penetrante se debe de dar un tiempo para que penetre en las imperfecciones.

Los resultados pueden ser analizados mediante luz natural o artificial en buen estado, si existen imperfecciones en la superficie de los tubos se concentrará gran parte del polvo revelador en un área específica y se deben analizar las causas de dicha imperfección.

Las imperfecciones pueden ser grietas y hoyos y pueden llegar a causar fugas en el intercambiador de calor, es por esto que el contratista debe proporcionar los resultados de los ensayos aplicados a los elementos del intercambiador de calor. De la misma forma, la norma exige que el personal que realice estos ensayos sea calificado según MIL-STD-410E, la cual establece los requerimientos para la certificación del personal que practique cualquier tipo de ensayos no destructivos por lo que se debe de exigir al contratista que demuestre la calificación del personal según este criterio.

Terminados los tubos, es turno de la fabricación de las aletas de aluminio. Al igual que los tubos, se necesitan láminas de aluminio que serán dobladas como abanico y pasadas por rodillos con engranes que serán los encargados de darles forma, así como se muestra en la figura 38. Realizadas las aletas, se cortan según el tamaño deseado, en este caso es de 60 cm. Es importante que el contratista presente los ensayos no destructivos realizados a las aletas, al igual que los tubos es recomendable un ensayo de líquidos penetrantes.

Figura 41. **Fabricación de aletas**



Fuente: *Youtube*. <https://www.youtube.com/watch?v=t4WwsXTQ9Fc>. Consulta: marzo de 2015.

Con base en el ancho y el alto del intercambiador se procede a elaborar los cabeceros que van a cada lado del intercambiador. Este se puede hacer sobre planchas de aluminio mediante un troquel que tenga las medidas de los anchos de los tubos, como se muestra en la figura 42.

Figura 42. **Cabecero**



Fuente: *Youtube*. <https://www.youtube.com/watch?v=t4WwsXTQ9Fc>. Consulta: marzo de 2015.

Estos cabeceros se colocan sobre los tubos mediante golpes con un martillo con cabeza de goma, como se muestra en la figura 40, es importante que antes de montar los cabeceros el contratista presente los resultados del ensayo no destructivo realizado al elemento.

Figura 43. **Colocación cabecero**



Fuente: *Youtube*. <https://www.youtube.com/watch?v=t4WwsXTQ9Fc>. Consulta: marzo de 2015.

Según el ancho y largo, se procede a la fabricación de los depósitos de agua, las dimensiones de estos deben ser de 60 cm de largo y 5 cm de ancho según los datos obtenidos en el capítulo 3. Estos se pueden hacer por medio de una prensa en donde se tengan los moldes con las dimensiones deseadas, se debe dejar los espacios para la entrada de agua, como se muestra en la figura 44.

Figura 44. **Depósitos de agua**



Fuente: Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=t4WwsXTQ9Fc>. Consulta: marzo de 2015.

#### **4.2.2. Soldadura en aluminio**

Con todos los materiales elaborados se procede a su unión. Para el montaje de las partes del intercambiador de primero se procede a la unión de las aletas con los tubos, existen dos formas de hacer este tipo de uniones, mediante soldadura o por medio de un horno.

Lo primero que se debe hacer es utilizar una base, la cual ayude apilar los tubos con las aletas, como se muestra en la figura 43.

Figura 45. **Apilando tubos y aletas**



Fuente: *Youtube*. <https://www.youtube.com/watch?v=t4WwsXTQ9Fc>. Consulta: marzo de 2015.

Hecho esto se atan los componentes con un cordón y se comprimen, luego se le agregan los cabeceros a los extremos del intercambiador y posteriormente se introduce el panel a un horno en donde se eleva a temperaturas alrededor de los 660 °C, temperatura a la cual el aluminio llega a su punto de fusión para unir las aletas y los tubos.

La soldadura por horno permite que el aluminio conserve sus propiedades originales de conducción térmica. En la soldadura el aluminio se mezcla con el material de aporte, el cual brinda diferentes características al aluminio pudiendo disminuir su capacidad de conducción térmica. Con base en lo establecido en el capítulo 3, la unión para este intercambiador debe de ser por soldadura oxiacetilénica.

Antes de realizar la soldadura es importante definir ciertas características del aluminio y su comportamiento frente a la soldadura. A continuación se presentan algunas recomendaciones al momento de soldar las piezas del intercambiador:

- Es importante definir que el material de aporte debe tener un punto de fusión más pequeño que el material base, el punto de fusión del aluminio es de  $660^{\circ}\text{C}$ , por lo que el punto de fusión del material de aporte debe de ser menor a  $660^{\circ}\text{C}$ .
- Existe el riesgo de perforar la pieza si no se está al tanto del material de aporte y del material base, debido a que el aluminio no cambia de color cuando se le somete a soldadura.
- Se debe evitar soldar a bajas velocidades y con exceso de material de aporte, con el fin de evitar deformaciones y roturas en el intercambiador, debido a que el aluminio puede presentar deformaciones internas y durante la soldadura, al momento en que este se dilata.
- Cuando se realiza la soldadura al aluminio este genera óxido de aluminio, este tiene un punto de fusión entre los  $1\ 200$  a los  $2\ 000^{\circ}\text{C}$ , por lo que el óxido puede evitar la fusión entre el material de aporte y el material base. Por eso se debe realizar un decapado químico por medio de ácidos clorhídricos, sulfúricos o fosfóricos. Después de la soldadura se debe aplicar un baño de agua limpia al intercambiador, a modo de eliminar cualquier rastro de químicos utilizados en el decapado.



- Es importante realizar una limpieza de las piezas antes de empezar a soldar, debido a que cualquier agente externo puede afectar la resistencia de la soldadura o bien provocar concentración de esfuerzos. Para esto se pueden utilizar disolventes alcalinos que no generen vapores tóxicos. Se puede limpiar las superficies con un trapo mojado con alcohol o acetona dejando las superficies secas, de lo contrario aparecerán poros afectando la apariencia de los materiales y la resistencia de la soldadura.
- Para los metales de aportación se pueden utilizar varillas como alambres o electrodos. Para la selección del alambre es importante tener en cuenta la composición de los materiales del intercambiador. En este caso, el intercambiador estará formado únicamente por aluminio puro, si en dado caso el aluminio que se consiga tiene algún tipo de aleación es importante definirla antes de la soldadura porque en base a esto se hace la selección del alambre a utilizar utilizando la tabla XXXI.

Tabla XXXI. **Selección del alambre a utilizar**

Designación	Composición química
ER 1100	Aluminio puro
ER 2319	Aluminio – 6% Cobre – 0,3% Manganeso
ER 4043	Aluminio – 5,2% Silicio
ER 4047	Aluminio – 12% Silicio
ER 4145	Aluminio – 10% Silicio – 4% Cobre
ER 5183	Aluminio – 4,5% Magnesio – 0,65% Manganeso
ER 5356	Aluminio – 5% Magnesio – 0,3%
ER 5554	Aluminio – 2,9% Magnesio – 0,65% Manganeso
ER 5556	Aluminio – 5% Magnesio – 0,7% Manganeso
ER 5654	Aluminio – 3,5% Magnesio

Fuente: *Solysol*. <http://solysol.com.es/data/documents/soldadura=20aluminio.doc.pdf>. Consulta: marzo de 2015.

En donde ER indica que es alambre o varilla mientras que los números indican la numeración de la aleación según la AA (Aluminum Association). Los alambres más utilizados para soldar aluminio son el ER1100 y ER403, estos son ideales para soldar piezas de varios espesores y son muy utilizados en las industrias de alimentos, lácteos y sistemas refrigeración.

En cuanto a los alambres que contienen magnesio como el ER5356, son utilizados en donde la resistencia a la tracción es importante, como en reparaciones de tanques de combustible. Con base en esto se recomienda utilizar alambre ER1100 y ER403 debido a su aplicación en diferentes grosores.

Para la soldadura oxiacetilénica se recomienda que el contratista tenga soldadores con experiencia comprobable y que presente las pruebas de los ensayos no destructivos realizados a la soldadura.

Los ensayos no destructivos en soldadura se utilizan para encontrar discontinuidades en las mismas, el no tener soldaduras uniformes o soldaduras con grietas pueden llegar a presentar fugas en el intercambiador y pérdida de transferencia de calor. Al igual que para el aluminio, existen ensayos no destructivos y la selección de estos dependerá del contratista y de los materiales a soldar.

Los ensayos visuales necesitan de personal calificado y el resultado únicamente permite conocer imperfecciones superficiales en el cordón de soldadura, por lo tanto este debe ir acompañado de otros ensayos no destructivos. Los líquidos penetrantes se utilizan para acero, aluminio y aleaciones de cobre, bronce y latón.

Este es uno de los más usados en la soldadura debido a su bajo costo, rapidez en que brinda resultados y permite inspeccionar a totalidad la soldadura, es necesario apegarse a la Norma AWS D1.1 y seguir los procedimientos y criterios de aceptación de los ensayos de líquidos penetrantes. El ensayo de partículas magnéticas como se explicó anteriormente se aplica para metales ferrosos, debido a que el material es aluminio esta prueba no debería de ser presentada por el contratista.

El ensayo de radiografía es una de las técnicas más efectivas para detectar fallos en los cordones de soldadura, sin embargo no detecta fácilmente los defectos en cordones de poco espesor. El ensayo de ultrasonido al igual que el de radiografía es efectivo y bastante utilizado debido a que brinda resultados de fallas en las superficies y en partes profundas del cordón de soldadura, pero al igual que de radiografía es poco efectivo en soldaduras de poco espesor y con falta de uniformidad.

Por estas razones se recomienda que el contratista brinde resultados de las pruebas no destructivas por alguno de los métodos de radiografía o ultrasonido acompañado de un ensayo de líquidos penetrantes, de esta forma el ensayo de líquidos penetrantes complementa las deficiencias de los ensayos de radiografía y ultrasonido.

No se recomienda el ensayo de partículas magnéticas debido a que el material a soldar no es ferroso, de la misma forma no se recomienda únicamente utilizar el ensayo visual si este no va acompañado de un ensayo de líquidos penetrantes.

#### **4.2.3. Selección de mangueras**

El intercambiador de calor deberá tener una entrada y una salida de agua, las cuales se harán por medio de mangueras, por lo que es importante establecer las especificaciones de las mismas. Para la selección de mangueras se debe tomar en cuenta el diámetro y la presión de la tubería por donde circula el agua. El diámetro de la tubería se estableció en el capítulo 3, en donde el diámetro es de 8 cm, con el propósito de validar la dimensión de esta manguera se procede al cálculo de la misma.

Para esto se debe utilizar un nomograma de capacidad de flujo que determinará el tamaño adecuado de la manguera, el cual se encuentra situado en el anexo 4, se debe considerar el flujo en galones por minuto y la velocidad del agua en pies por segundo.

El flujo que se definió en el capítulo 3 es de 5,98 galones por minuto y la velocidad del flujo es de 2,42 pies por segundo, con esta información se procede a conectar el borde de la izquierda con el borde de la derecha del nomograma de capacidad de flujo, para determinar el tamaño adecuado de la manguera.

Según el anexo 4 el diámetro interno adecuado para la manguera debe ser de 2 pulgadas. Para determinar las características de la manguera es necesario utilizar el catalogo del proveedor que dará la manguera, para este caso se utilizará el catálogo del proveedor de mangueras industriales Hidrotrenz presentado en el anexo 5.

Con base en la información obtenida se define que se necesita:

- Manguera para impulsión de aire, agua y líquidos no corrosivos
- Superficie externa lisa con impresión de tela fina
- Trenzas de hilado de poliéster
- Temperaturas de trabajo entre -30 a 82 °C
- Diámetro interno de 51 mm
- Diámetro externo de 63 mm
- Presión de trabajo de 5 bar
- Peso de 1,35 kg por cada metro

#### 4.2.4. Tubería de agua

Para la entrada de agua a las mangueras, se necesita una tubería que sea la encargada de suministrar el agua proveniente de la tubería principal hacia las mangueras establecidas anteriormente. Para esto basta con sacar dos tubos de la tubería principal en forma recta, como se muestra en la figura 44, la distancia desde la tubería de agua hacia la extrusora es de 4 metros. La presión a la cual se maneja el agua en las tuberías de Polytec es de  $6 \text{ kg/cm}^2$ , el diámetro interno de la tubería de agua es de 51 mm y es importante definir qué material se utilizará para las tuberías.

Figura 46. Tubería de agua Polytec



Fuente: Departamento de Extrusión, Polytec.

Existen varios materiales para la fabricación de tuberías de agua, en este caso se utilizará tubería de hierro galvanizado, que es el material que actualmente tiene la tubería de Polytec, por su alta dureza y resistencia a la corrosión. Este el mejor material, debido a que las tuberías de PVC no son recomendables para el transporte de agua a temperaturas altas, ya que pueden llegar a deformarse, tomando en cuenta que la tubería debe de transportar agua a temperaturas bajas y luego de pasar por la transferencia de calor del intercambiador debe de transportar agua a altas temperaturas.

Existe también el material de CPVC que a diferencia del PVC soporta agua a altas temperaturas, sin embargo su uso es aplicado a calderas. También se debe tomar en cuenta la dureza del agua, ya que con base en la dureza del agua se necesitara un material que sea más resistente a la corrosión y debido a que el agua suministrada a la tubería de Polytec no es potable, surge la necesidad de utilizar tubería de hierro galvanizado, en cuanto a la vida útil de la tubería ambos tienen una vida útil de 50 años.

Con esta información se procede a determinar la caída de presión de la tubería, debido a que es un tramo recto el cálculo es bastante sencillo, se utiliza la ecuación de Darcy-Weisbach y se sustituyen los valores conocidos.

$$\Delta P = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2 * g}$$

Donde

$\Delta P$  = caída de presión

L = longitud de la tubería (4 m)

D = diámetro interno de la tubería (0,051 m)

V = velocidad del agua en el interior de la tubería (0,74 m/s)

$g = \text{gravedad (9,81 m/s}^2\text{)}$

$f = \text{factor de fricción de Darcy – Weisbach}$

El único factor desconocido es la fricción, para esto es importante definir ciertas características del flujo, como el número de Reynolds para determinar si el flujo es laminar o turbulento, mediante la siguiente ecuación.

$$Re = \frac{v * D}{\vartheta}$$

En donde  $\vartheta$  es la viscosidad cinemática del agua. Sustituyendo los valores conocidos se encuentra el número de Reynolds de 37 477,66, valor que se debe comparar con la tabla XXXII:

Tabla XXXII. **Características del flujo**

$Re < 2\,000$	Régimen laminar
$2\,000 < Re < 4\,000$	Zona de transición
$Re > 4\,000$	Régimen turbulento

Fuente: elaboración propia.

Según el resultado obtenido de la ecuación del flujo, se determina que el flujo es turbulento, por lo que la forma para el cálculo del factor de fricción difiere de los flujos en régimen laminar. Para el factor de fricción se debe tener en cuenta la rugosidad absoluta del material a utilizar por ser un factor que interviene en el flujo del fluido, la tabla XXXIII presenta la rugosidad para diferentes materiales.



Tabla XXXIII. **Rugosidad en materiales**

Material	E (mm)
Plástico (PE, PVC)	0,0015
Tubos de latón o cobre	0,0015
Fundición revestida de cemento	0,0024
Fundición con revestimiento bituminoso	0,0024
Fundición centrifugada	0,003
Hierro forjado	0,09
Hierro galvanizado	0,24
Madera	0,90
Hormigón	3,0

Fuente: *Uclm*.

[http://www.uclm.es/area/ing\\_rural/Hidraulica/Temas/TablaRugosidadAbsolutaMateriales.pdf](http://www.uclm.es/area/ing_rural/Hidraulica/Temas/TablaRugosidadAbsolutaMateriales.pdf).

Consulta: marzo de 2015.

Con esta tabla se utiliza la rugosidad absoluta de 0,24 para hierro galvanizado, se divide dentro del diámetro de la tubería y se encuentra la rugosidad relativa, valor que servirá para encontrar la caída de presión. El valor correspondiente es el siguiente:

$$Rugosidad\ relativa = \varepsilon/d = 0,24\ mm/51\ mm = 0,0045$$

Con la rugosidad relativa y el número de Reynolds, se utiliza el diagrama de Moody, presentado en el anexo 6, y se obtiene el factor de fricción de 0,04. Con este valor se procede a determinar la caída de presión de la tubería.

$$\Delta P = 0,04 * \frac{4}{0,051} * \frac{0,74^2}{2(9,81)} = 0,08\ mca * \frac{1\ bar}{10,2\ mca} = 0,007\ bar$$

Según el dato anterior y sabiendo que es un tubería recta, la caída de presión es muy pequeña y puede considerarse despreciable en la selección de la tubería.

#### **4.2.5. Prueba de fugas del intercambiador de calor**

Es importante establecer que la estanqueidad se refiere a no tener fugas en el intercambiador de calor, y para esto existe un procedimiento el cual debe de ser realizado antes que el intercambiador sea instalado. La prueba consiste en ingresar presión al intercambiador de calor con un líquido incompresible dentro del mismo a una temperatura de 40 grados centígrados, en donde el intercambiador no se encuentre en funcionamiento y sin ningún tipo de energía que le sea suministrado.

Junto con esto, se debe de tener un manómetro que indique la presión a la cual se está sometiendo el ensayo, es recomendable que se someta a un 10 % más de la presión normal de trabajo. En este caso, la presión normal de trabajo según el capítulo 3 es de  $6 \text{ kg/cm}^2$ , por lo que la presión a la cual se debe de someter el intercambiador es de  $6,6 \text{ kg/cm}^2$ .

El tiempo bajo el cual se someterá el intercambiador dependerá del contratista, se recomienda que se aplique un tiempo de 1 hora, durante este periodo se deben registrar las presiones que sean reportadas en intervalos establecidos. Es decir, se registrará la presión cada 5 minutos durante una hora, el principal propósito de realizar esta práctica es realizar gráficos de control acerca de las presiones con el fin de que el contratista demuestre que el intercambiador trabaja bajo control en condiciones superiores a la presión de trabajo.

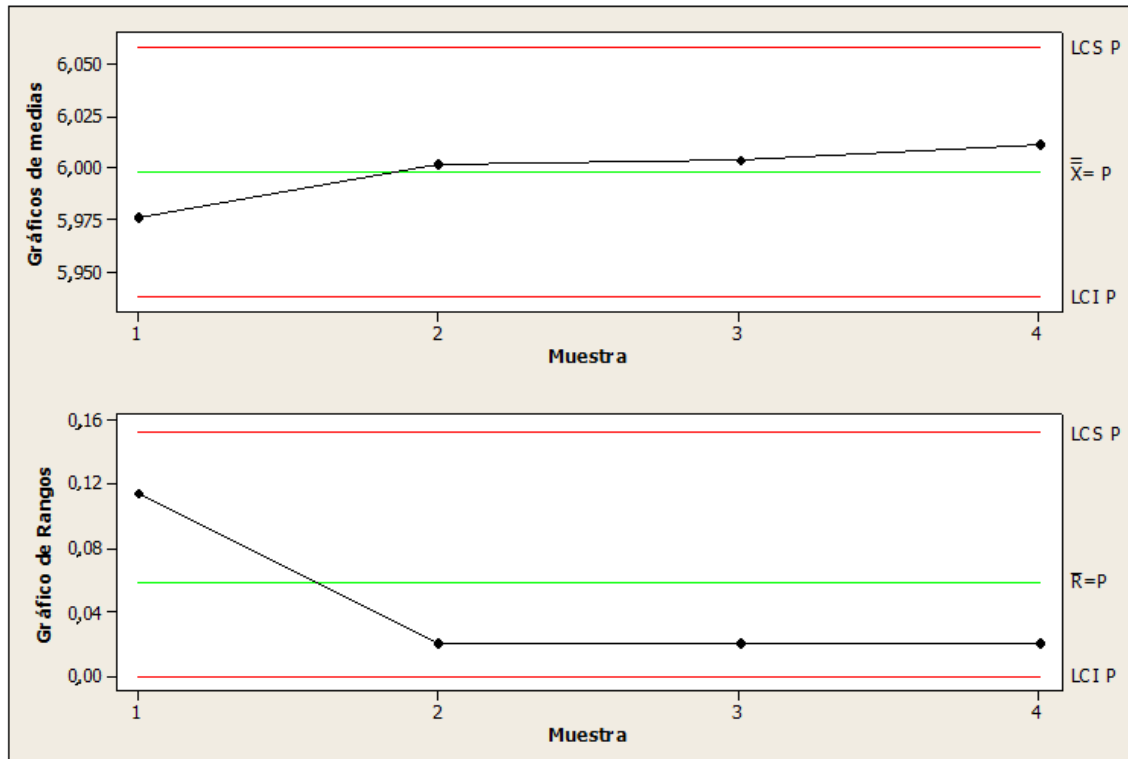
Los siguientes gráficos son un ejemplo de cómo se debería aplicar los gráficos de control en la prueba de estanqueidad del intercambiador de calor, el método de elaboración de los gráficos es el mismo descrito en el capítulo 3. En la tabla XX se muestran los datos tomados, en donde la columna tiempo son los minutos en los cuales se registraron los datos y la columna de presión nos indica el valor mostrado a ese determinado tiempo.

Tabla XXXIV. **Ejemplo de gráficos de control para la prueba de estanqueidad**

Tiempo (min)	Presión
5	p1
10	p2
15	p3
20	p4
25	p5
30	p6
35	p7
40	p8
45	p9
50	p10
55	p11
60	p12

Fuente: elaboración propia.

Figura 47. Gráficos de control, prueba de estanqueidad



Fuente: elaboración propia.

La figura 45 muestra el comportamiento de los datos de la tabla XX, en donde se identifica que únicamente los primeros 15 minutos la media de los datos estuvo por debajo del límite central y que el rango estuvo por arriba del límite central, por lo que se debe de analizar estos primeros datos, aún así los gráficos muestran variables trabajando bajo control.

De la misma forma, se le debe aplicar una prueba de estanqueidad a las tuberías a conectar en el sistema del agua de Polytec y el procedimiento es parecido al del intercambiador. Se debe aplicar a la tubería una presión 1,5 veces mayor a la presión máxima de servicio y se debe de aplicar 2 veces por 10 minutos en un periodo de media hora, después de la media hora la presión no debe de haber descendido en más  $0,61 \text{ kg/cm}^2$  y no deben de aparecer fisuras ni goteras, los gráficos de control también son aplicables a esta prueba.

Realizar pruebas neumáticas también es una buena práctica para identificar fugas en tuberías, el procedimiento es bastante parecido al descrito anterior, en donde las tuberías se les aplica presión a  $1,75 \text{ kg/cm}^2$  durante 10 minutos, tiempo en el cual si existe una fuga se denotará en alguna pérdida de presión o algún tipo de goteo.

Luego se aumenta la presión en valores de  $1,75 \text{ kg/cm}^2$  durante 5 minutos hasta llevarlo a la presión de trabajo manteniéndolo en esa presión alrededor de 10 minutos, por último se lleva la presión hasta el valor de  $7,03 \text{ kg/cm}^2$  y se mantiene esa presión durante 24 horas. Se recomienda aplicar los mismos controles establecidos en la prueba de fugas descrita anteriormente.

#### **4.3. Instalación del intercambiador de calor**

La instalación del intercambiador de calor lo realizará el personal de mantenimiento de Polytec, por lo que es necesario que el contratista se encuentre presente para que se ejecuten las mejores prácticas y evitar daños al dispositivo. Para esto se debe establecer las herramientas a utilizar, los procedimientos adecuados para el montaje de los elementos, procedimientos adecuados de soldadura y capacitación del personal que será el que estará a cargo de verificar el funcionamiento y operación del mismo.

#### **4.3.1. Herramientas y materiales**

Una vez que se han determinado todos los elementos necesarios para la construcción del intercambiador de calor, es necesario tener claro las herramientas y materiales necesarios, los cuales son:

- Boquillas de soldadura
- Mangueras y reguladores para el oxígeno y acetileno
- Cilindros de oxígeno y acetileno
- Material de aporte ER 1100
- Martillo de goma
- Mangueras para la entrada y salida de agua
- Cabeceros
- Panal con los tubos y aletas comprimidos
- Sierra
- Estructura de aluminio para conectar el intercambiador con la turbina
- Tuberías de hierro galvanizado

#### **4.3.2. Procedimientos para el montaje**

El montaje del intercambiador se hará en el siguiente orden:

- Soldadura de tuberías de hierro galvanizado (45 minutos)
- Acople de mangueras en tuberías de hierro galvanizado (20 minutos)
- Acople de mangueras y conductos hacia el intercambiador (15 minutos)
- Pruebas en extrusión (20 minutos)

### **4.3.3. Procedimiento de soldadura**

Antes de soldar las tuberías de hierro galvanizado hacia la tubería de agua de Polytec, es necesario que se tomen en cuenta los siguientes pasos.

- Para evitar la explosión del acetileno se puede suministrar una masa porosa de arena a la botella de acetileno.
- Todos los elementos que se encuentren alrededor de los cilindros, deben estar libre de grasas, aceites, lubricantes, cobre, plata, mercurio y cualquier líquido inflamable, para evitar la combustión.
- Se debe de verificar que los cilindros tengan válvulas de seguridad, con el fin de evitar la entrada de alguna llama a los cilindros debido al mal uso.
- Se debe verificar que los sopletes tengan un sistema de anti retroceso para garantizar el paso del gas en una sola dirección.
- Se realiza una limpieza química en los elementos a soldar del intercambiador, debido al óxido de aluminio que pueda desprender el material. Se debe de procurar hacer una limpieza exhaustiva con agua caliente ó fría al finalizar la soldadura para evitar residuos químicos en el intercambiador.

- Al momento de realizar el encendido, se debe dar primero salida al combustible y después al oxígeno, regulando a modo de que se llegue a la llama neutra. Se puede aplicar una llama carburante regulando el soplete a modo de brindar más combustible, siempre y cuando no se presente la formación de óxidos en el intercambiador.
- Debido a los espesores tan pequeños entre las aletas y los tubos, es necesario hacer la soldadura mediante el método clásico, es decir que el material de aporte se sitúa por delante de la boquilla.
- Se debe verificar que la boquilla no esté sucia y el soplete en mal estado, para evitar el retroceso de la llama.
- Se debe tener el cuidado de no golpear los cilindros, exponerlos al sol, ni calentarlos con llama. Se deben tener en ambientes por debajo de los 50 °C y en lugares ventilados, por lo que la soldadura no puede realizarse en el área de extrusión, sino en un área de mantenimiento siempre y cuando se tengan controlados los agentes detallados en el apartado 2.

Para la ejecución de la soldadura se debe tomar en cuenta la experiencia del soldador, es importante que el soldador esté certificado por algún tercero, con el propósito de que no se efectúen cordones de soldadura deficientes que puedan generar algún tipo de falla durante el funcionamiento del intercambiador de calor. Es por esto que se deben elegir a soldadores que tengan experiencia que pueda ser comprobable por medio de alguna calificación, algunas de las calificaciones que se realizan para determinar la habilidad de un soldador son las siguientes, y la selección del mismo dependerá del ente certificador.



- Prueba del doblado: en esta prueba se le dice al soldador que una dos piezas de metal, posterior a esto la pieza soldada es sometida a una fuerza de flexión, el principal objetivo es que la pieza soldada no llegue a la rotura bajo la presión ejercida.
- Prueba radiográfica: utiliza la radiación a través de algún material y parte de la energía que le es transferida se ve opaca debido a las diferencias de espesores, densidades o algún tipo de discontinuidad.

Una vez que se obtenga la experiencia, del soldador mediante alguna de estas pruebas, es necesario saber bajo que posición trabajará, con el fin de establecer si bajo ciertas condiciones la soldadura seguirá siendo uniforme, con base en el material a soldar así será la nomenclatura que se le asigne al soldador.

Para el caso de Polytec se necesita que sea soldadura en tubería por lo que existe la clasificación 1G, 2G, 5G, 6G y 6GR. Con base en las condiciones bajo las cuales trabajará el soldador, se necesita un soldador que sea 6G, es decir que la soldadura se realice en tuberías inmóviles con ejes inclinados a 45 °C, esta se puede hacer en plana, vertical y bajo techo.

#### **4.3.4. Acoplamiento de tuberías y mangueras**

Para acoplar las tuberías se necesita únicamente dos tubos como los descritos en la sección 4.2.4, uno para el ingreso del fluido y otro para la salida del mismo. Las perforaciones en las tuberías principales se pueden hacer mediante soldadura de tipo cortante con boquillas para corte, se debe tener el cuidado de realizar las aberturas con el diámetro requerido de 63 mm.

La unión con las tuberías se puede realizar mediante soldadura, es importante que se siga el procedimiento de soldadura establecido en la sección anterior. Las mangueras se pueden unir a las tuberías de hierro galvanizado mediante acoples o cinchos que hagan la sujeción entre los elementos. Los acoples deben tener el diámetro requerido a modo de evitar fugas durante la operación.

Al momento de la instalación se debe recordar que la temperatura ambiente es mucho mayor a la temperatura de la tubería por lo que generará condensado. Las tuberías se encuentran a una distancia de 3 metros de altura, al existir condensado dejará caer gotas al suelo de la planta, actualmente Polytec no cuenta con algún tipo de aislante para esta tubería y esto, desde el punto de vista de seguridad e higiene industrial, puede ocasionar accidentes por lo que se recomienda de aislar la tubería recubriéndola con algún tipo de material.

Los materiales que se utilizan como aislantes son la coquilla de espuma elastomérica, coquilla de lana mineral y la coquilla de polietileno. La diferencia entre temperaturas entre la tubería y el medio ambiente de extrusión no demanda un alto aislamiento térmico, por consiguiente la coquilla que se seleccionará es la de polietileno, debido a que esta tiene un costo y aislamiento térmico bajo en comparación de las otras.

Para determinar el espesor del material a utilizar se debe de tomar en cuenta la temperatura de trabajo y el diámetro interno de la coquilla el cual es el diámetro externo de la tubería, que en nuestro caso es de 63 mm. La temperatura de trabajo es de 33,36 °C según el capítulo 3 en la sección 3.4.5, con esta información se utiliza la tabla XXXIII para determinar el espesor del material a utilizar.

Tabla XXXV. **Características de coquilla**

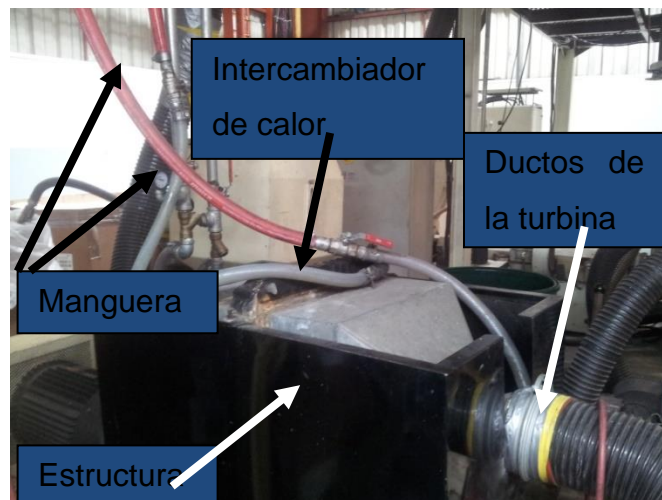
Diámetro interno de la coquilla		Espesor(mm) según temperatura de fluido		
Pulgadas	Mm	40 a 65	66 a 101	102 a 120
1/2	21	25	25	25
3/4	27			
1	34			
1 1/4	42	30	30	40
1 1/2	48			
2	60			
2 1/2	76			
3	89			
4	114	40	40	50
5	140			
6	169			
8	219			

Fuente: *Armacell*. [http://www.armacell.com/WWW/armacell/ACwwwAttach.nsf/ansFiles/001-003-004-E\(E\).pdf/\\$File/001-003-004-E\(E\).pdf](http://www.armacell.com/WWW/armacell/ACwwwAttach.nsf/ansFiles/001-003-004-E(E).pdf/$File/001-003-004-E(E).pdf). Consulta: junio de 2015.

Con base en la tabla anterior se necesita una coquilla con espesor de 30 mm, y se seleccionará como material el polietileno debido a que es el más económico.

Las mangueras deben ser unidas al radiador mediante acoples, la manguera que llevará el fluido hacia el intercambiador deberá ser acoplada en donde se encuentra el depósito de entrada del fluido y la manguera de salida del lado del depósito del fluido de salida. Hecho esto se le debe de acoplar al intercambiador la estructura la cual lleva los ductos de la turbina y la base para mantener al intercambiador parado, como se muestra en la figura 44.

Figura 48. **Mangueras y ducto**



Fuente: Departamento de Extrusión, Polytec.

Las principales características que se necesitan para la implementación del intercambiador de calor se presentan a continuación:

- Manguera para impulsión de agua de poliéster, temperatura de trabajo de -30 a 82 °C, diámetro interno de 51 mm y externo de 63 mm, presión de trabajo de 5 bar.
- Soldadura oxiacetilénica con material de aporte alambre ER1100.

- Tuberías de agua de 4 metros de largo de hierro galvanizado con diámetro interno de 50 mm, caídas de presión despreciable.
- Coquillas de polietileno para aislar la tubería con espesor de 30 mm.

#### **4.3.5. Capacitación**

Instalado el intercambiador de calor, el contratista debe proporcionar toda la información correspondiente al cuidado y mantenimiento del intercambiador de calor. Es necesario que durante la instalación del intercambiador de calor este presente el contratista junto con el personal de mantenimiento de Polytec que se describió en el capítulo 3, con el propósito de que el contratista identifique las prácticas usuales realizadas en Polytec que sirvan para que este brinde retroalimentación acerca de las mismas en una capacitación formal.

Una vez que se hayan terminado las actividades de la instalación del intercambiador de calor, es necesario realizar una capacitación acerca del funcionamiento del mismo, las condiciones bajo las cuales debe operar, qué hacer en caso de detectar fallos en los elementos, cuales deben ser las condiciones del agua que se deben de suministrar para alargar la vida del intercambiador, cómo se debe realizar el mantenimiento, a qué elementos se le deben establecer controles, entre otros.

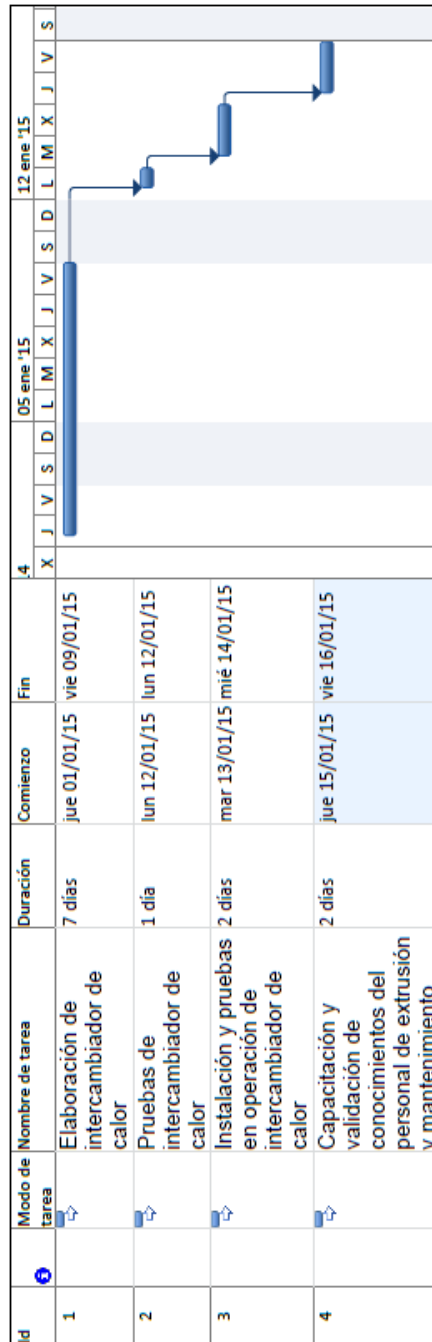
La capacitación debe ser realizada por el contratista y que tenga experiencia comprobable, se recomienda que se realice para todo el personal de mantenimiento del área de extrusión, para aprovechar el tiempo sin en dado caso se realice un réplica del proyecto para las demás extrusoras que no cuentan con un sistema de enfriamiento, o bien si alguna de las personas capacitadas ya no continúa laborando en la empresa.

De la misma forma, se recomienda capacitar al supervisor de la extrusora 21 y al operador de máquina para que sepan los procedimientos adecuados en caso se presenten fallas en el equipo. Una vez capacitado el personal es necesario realizar una validación de los conocimientos adquiridos, por lo que es necesario que el contratista someta al personal a una prueba, ya sea de carácter teórico o práctico.

Para la instalación, capacitación y entrenamiento se dispone de un tiempo estimado que se determinó en el capítulo 3 como una semana para la instalación y capacitación del personal, por lo que se debe programar lo mejor posible las actividades a modo de no sobrepasar dicho tiempo y que se eleven los costos de la propuesta. Para esto se determinó el diagrama de Gantt, en la figura XX con el fin de identificar la duración del proyecto.

En la etapa de las pruebas del intercambiador de calor, se recomienda que se encuentre presente el personal que recibirá en la capacitación del contratista, con el fin de que el personal conozca más acerca del dispositivo y lo asimile de una mejor manera con la parte teórica. Actualmente, Polytec cuenta con una sala de capacitaciones con capacidad para 60 personas, por lo que la capacitación se realizaría dentro de dicha instalación.

Figura 49. Diagrama de Gantt, actividades intercambiador de calor



Fuente: elaboración propia, empleando Project.





## **5. SEGUIMIENTO Y MEJORA CONTINUA**

Para mantener los beneficios que brinda el intercambiador de calor a la empresa, es necesario establecer las actividades necesarias para preservar la vida del intercambiador lo más que se pueda mediante un mantenimiento adecuado. De la misma forma, es necesario llevar a cabo planes con base en los resultados que se obtengan de la propuesta, estandarizando los efectos positivos y controlando el nuevo desempeño de la extrusora 21.

### **5.1. Seguimiento**


Una vez implementado el intercambiador de calor es necesario llevar los registros necesarios que indiquen el comportamiento del intercambiador y si ha existido un aumento del 33 % en la eficiencia de la extrusora, junto con esto se debe verificar la base de datos del Departamento de Calidad a modo de identificar que el defecto por calibre haya disminuido.

El formato necesario se presenta en la figura 48, en la parte en donde se encuentra el título “datos orden”, se encuentran distintos campos que son necesarios para lograr hacer una relación entre la base de datos de calidad y la velocidad de la máquina. Por ejemplo, el campo orden y corrida es un campo que ayuda a la calidad debido a que indica qué producto se trabajó y permite realizar ejercicios de trazabilidad brindando información acerca de la máquina, el turno y el operador que estuvo involucrado en el trabajo.

De la misma forma los campos del título “temperatura anillo” indicará la temperatura promedio a la cual estará trabajando el anillo, la cual es la temperatura que el intercambiador estará proporcionando. Junto con este campo se relaciona el campo de velocidad, en donde la temperatura y la velocidad tienen relación como se demostró en el capítulo 3.

Para tener controles con respecto al funcionamiento del intercambiador y el defecto por calibre, es necesario establecer cartas de control de rangos, con el fin de identificar puntos que se encuentren fuera de los límites de control e identificar las causas de las variaciones. Los gráficos de control de rangos se deben aplicar debido a que las muestras no son mayores a 10, según la figura 48, de la misma forma permitirá monitorear la variabilidad de la característica de calidad de interés, en este caso el calibre. Los límites de control en este punto deben ser establecidos para las temperaturas, calibre y velocidad.

Figura 50. **Formato de seguimiento intercambiador de calor**

		Departamento: Extrusión			Formato datos intercambiador de calor						Máquina: Extrusora 21		
Datos orden					Temperatura Anillo enfriamiento					Variables			
Orden	Corrida	Kg /1000	Ancho película sencilla	Calibre	1	2	3	4	Media	RPM	m/min	Hora	Velocidad (kg/h)

Fuente: elaboración propia.

### **5.1.1. Gráficos de control para las temperaturas**

Conociendo el comportamiento de las temperaturas del anillo de enfriamiento se logrará determinar si el intercambiador se encuentra funcionando de manera normal, es decir que la distribución de los datos de las muestras siguen una distribución de campana de Gauss.

Cuando las temperaturas salgan de los límites de control, se empezarán a detectar defectos en las películas de polietileno y esto se debe a que las temperaturas altas dan inestabilidad a la burbuja, provocando desperfectos físicos y disminuyendo la velocidad.

Al tener puntos fuera de los límites, la apariencia de la película empezará a tomar un aspecto de escama o rugoso, originando desperdicio, por lo que tomar acciones correctivas basándonos en una inspección visual resulta costoso por el desperdicio que este genera, es por esto que se deben implementar cartas de control.

Para dichas cartas es necesario que el operador tome datos de la temperatura del anillo de enfriamiento mediante el termómetro láser, indicado en el capítulo 2. Cada muestra se debe realizar cada 15 minutos durante todo el día, con fin de obtener 7 subgrupos de 4 muestras cada uno, en un turno de 8 horas. Estos datos deben ser registrados en el formato de la figura XX.

Para esto resulta necesario que el Departamento de Cómputo cree un módulo en la estación de piso donde se sitúa la extrusora 21, para que el operador pueda ingresar los valores de las muestras de temperatura y mediante los cálculos realizados en el capítulo 3 la interfaz sea capaz de generar reportes con gráficos de control de la extrusora para que sean sometidos a análisis por el departamento de ingeniería, el asistente o jefe de extrusión.

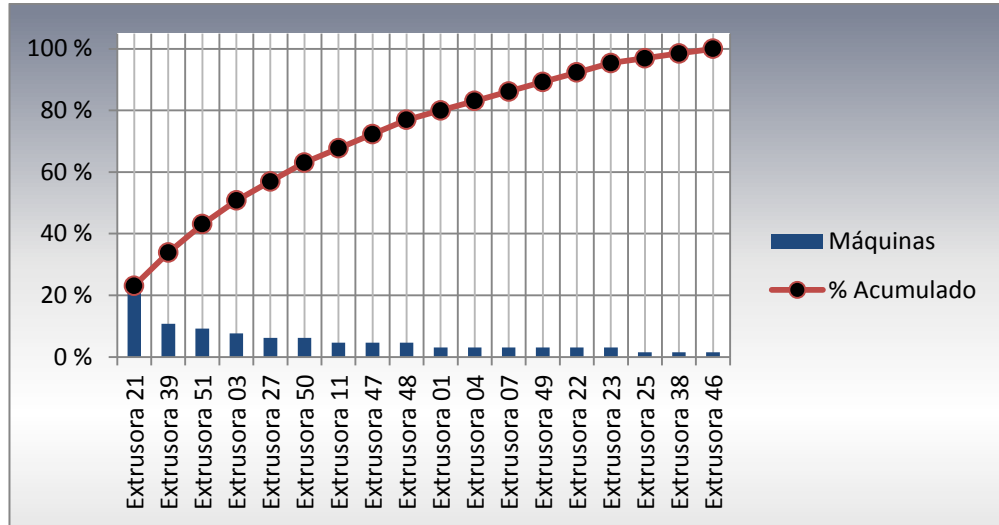
Para garantizar que los datos sean los más reales posibles y reduciendo el error humano, se debe realizar un procedimiento y una capacitación para el operador de la extrusora 21 que contemple los siguientes aspectos:

- El uso correcto del termómetro láser.
- Puntos en los cuales se deben de tomar las temperaturas.
- La forma correcta de llenar el formato de la figura XX.
- La frecuencia con la cual el operador realizará las lecturas.
- La forma correcta de ingresar y registrar las temperaturas en la interfaz que el Departamento de Cómputo generará.
- Se le debe de informar al operador durante la capacitación la importancia de seguir a cabalidad los pasos del procedimiento.

### **5.1.2. Paretos de defectos en las películas**

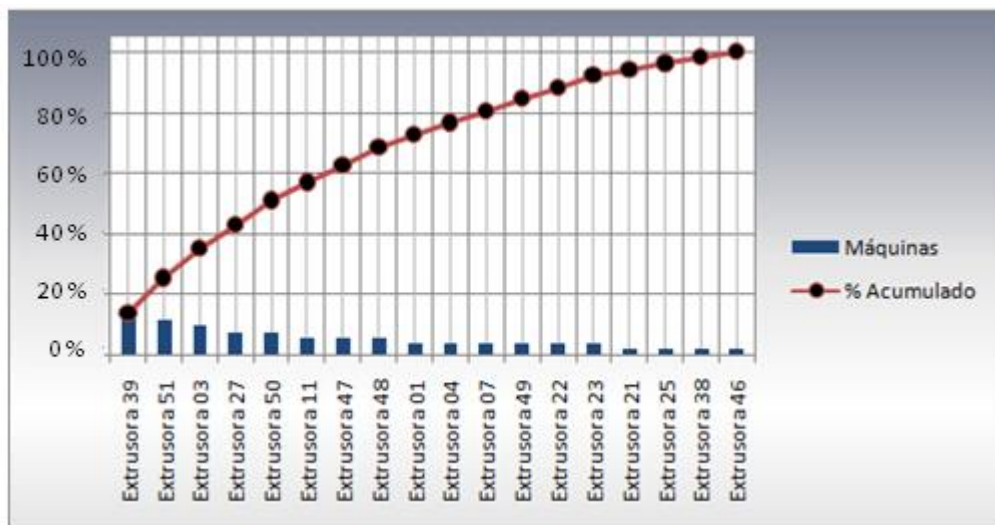
De la misma forma en la que se obtuvo la necesidad de abordar el defecto por calibre en el capítulo 3, se deben llevar los registros de los defectos de las películas en los formatos establecidos por el Departamento de Calidad. Estos deben ser sometidos a análisis cada mes, que es la frecuencia actual a la cual el Departamento de Calidad los realiza, e identificar la posición que ocupe el defecto por calibre. La siguiente figura es un ejemplo del comportamiento esperado del defecto de calibre por máquina.

Figura 51. Pareto de defectos de calibre por máquina, situación actual



Fuente: elaboración propia.

Figura 52. Pareto esperado al cabo de un mes de instalado el intercambiador



Fuente: elaboración propia.

La figura XX muestra el comportamiento esperado de los defectos por calibre en la extrusora 21, la cual bajó de la primera posición a la número quince, por lo que es importante que se le de seguimiento al reporte de defectos de calidad. El departamento encargado de darle seguimiento a dicho reporte es Ingeniería junto con el personal de Calidad. Se debe validar que la información reportada en extrusión concuerde con la presentada en el reporte de calidad.

### **5.1.3. Comparaciones de órdenes de producción**

Con el propósito de validar si el intercambiador de calor brindará los resultados propuestos en el capítulo 3, se debe realizar una comparación de costos de producción de las órdenes que hayan salido antes de la implementación del intercambiador y después del mismo. Para hacer dicho costeo es necesario que el Departamento de Ingeniería realice el análisis comparativo siguiendo la metodología que utiliza Polytec para el costeo de órdenes de producción.

Para realizar el costeo es necesario establecer los siguientes rubros en los cuales se divide el costo de producción según la metodología de Polytec:

- Costos directos (materias primas y mano de obra directa).
- Costos indirectos (energía eléctrica, depreciación y seguros).
- Gastos indirectos de fabricación (sueldos, salarios y gastos de los departamentos administrativos de planta).
- Gastos de administración, ventas y financieros (sueldos, salarios y gastos de administración, ventas y préstamos).

Una vez determinado el criterio bajo el cual se determinará el costo de producción, es necesario establecer los valores para dichos rubros, como se muestra en la tabla XXXVI. Es importante establecer que estos valores son determinados mediante un prorrateo realizado por el Departamento de Contabilidad que sigue un criterio según los gastos reportados durante el año 2014, dichos datos son actualizados año con año.

Tabla XXXVI. **Valores del costo de producción**

Rubro	Cantidad en quetzales por hora (extrusora-21)
Mano de obra directa	Q 10,82
Costos indirectos	Q 30,93
Gastos indirectos de fabricación	Q 27,89
Gastos de administración ventas y financieros	Q 31,17

Fuente: elaboración propia.

Estos valores servirán para hacer el análisis comparativo una vez que se haya implementado el intercambiador de calor. Para realizar esta comparación es necesario extraer de la base de datos de producción la cantidad de kilogramos y el tiempo reportado para órdenes de producción reportadas en un determinado periodo. La XXXVII muestra el escenario esperado junto con la situación actual de las órdenes de producción de junio de 2014.

Tabla XXXVII. Comparación de costos entre situación actual y propuesta

Situación actual									Propuesta		
Orden	Kg	Tiempo de producción (h)	M.O directa (Q/h)	Costos indirectos (Q/h)	GF (Q/h)	GAVF (Q/h)	Costo Total (Q)	Q/kg	Tiempo de producción esperado	Costo Total	Q/kg
94615	2 974,60	43,50	Q 10,82	Q 30,93	Q 27,89	Q 31,17	Q 4 385,24	Q 1,47	32,71	Q 3 297,67	Q 1,11
94641	424,60	6,00	Q 10,82	Q 30,93	Q 27,89	Q 31,17	Q 604,86	Q 1,42	4,51	Q 454,85	Q 1,07
94761	2 770,00	60,75	Q 10,82	Q 30,93	Q 27,89	Q 31,17	Q 6 124,21	Q 2,21	45,68	Q 4 605,36	Q 1,66
94842	19,80	0,50	Q 10,82	Q 30,93	Q 27,89	Q 31,17	Q 50,41	Q 2,55	0,38	Q 37,90	Q 1,91
94920	514,00	15,50	Q 10,82	Q 30,93	Q 27,89	Q 31,17	Q 1 562,56	Q 3,04	11,66	Q 1 175,03	Q 2,29
94932	372,61	7,50	Q 10,82	Q 30,93	Q 27,89	Q 31,17	Q 756,08	Q 2,03	5,64	Q 568,56	Q 1,53
94936	1 762,80	55,17	Q 10,82	Q 30,93	Q 27,89	Q 31,17	Q 5 561,35	Q 3,15	41,48	Q 4 182,10	Q 2,37
95119	1 043,60	28,00	Q 10,82	Q 30,93	Q 27,89	Q 31,17	Q 2 822,68	Q 2,70	21,06	Q 2 122,63	Q 2,03
95207	1 138,80	25,00	Q 10,82	Q 30,93	Q 27,89	Q 31,17	Q 2 520,25	Q 2,21	18,80	Q 1 895,21	Q 1,66
95208	479,00	10,00	Q 10,82	Q 30,93	Q 27,89	Q 31,17	Q 1 008,10	Q 2,10	7,52	Q 758,08	Q 1,58
95300	2 866,40	61,50	Q 10,82	Q 30,93	Q 27,89	Q 31,17	Q 6 199,82	Q 2,16	46,25	Q 4 662,22	Q 1,63
95497	385,40	10,00	Q 10,82	Q 30,93	Q 27,89	Q 31,17	Q 1 008,10	Q 2,62	7,52	Q 758,08	Q 1,97
95535	2 474,80	65,00	Q 10,82	Q 30,93	Q 27,89	Q 31,17	Q 6 552,65	Q 2,65	48,88	Q 4 927,55	Q 1,99
95536	1 192,40	36,83	Q 10,82	Q 30,93	Q 27,89	Q 31,17	Q 3 713,17	Q 3,11	27,70	Q 2 792,28	Q 2,34
95741	3 173,60	83,00	Q 10,82	Q 30,93	Q 27,89	Q 31,17	Q 8 367,23	Q 2,64	62,42	Q 6 292,10	Q 1,98
95743	2 998,00	56,00	Q 10,82	Q 30,93	Q 27,89	Q 31,17	Q 5 645,36	Q 1,88	42,11	Q 4 245,27	Q 1,42
95754	625,20	14,00	Q 10,82	Q 30,93	Q 27,89	Q 31,17	Q 1 411,34	Q 2,26	10,53	Q 1 061,32	Q 1,70
95756	203,60	4,50	Q 10,82	Q 30,93	Q 27,89	Q 31,17	Q 453,65	Q 2,23	3,38	Q 341,14	Q 1,68
95771	574,80	12,83	Q 10,82	Q 30,93	Q 27,89	Q 31,17	Q 1 293,73	Q 2,25	9,65	Q 972,87	Q 1,69
95772	988,00	21,50	Q 10,82	Q 30,93	Q 27,89	Q 31,17	Q 2 167,42	Q 2,19	16,17	Q 1 629,88	Q 1,65
95777	254,20	3,50	Q 10,82	Q 30,93	Q 27,89	Q 31,17	Q 352,84	Q 1,39	2,63	Q 265,33	Q 1,04
95800	1 960,60	41,83	Q 10,82	Q 30,93	Q 27,89	Q 31,17	Q 4 217,22	Q 2,15	31,46	Q 3 171,32	Q 1,62
<b>Total</b>	<b>29 423,83</b>	<b>662,42</b>	<b>Q 10,82</b>	<b>Q 30,93</b>	<b>Q 27,89</b>	<b>Q 31,17</b>	<b>Q 66 778,22</b>	<b>Q 2,27</b>	<b>498,13</b>	<b>Q 50 216,74</b>	<b>Q 1,71</b>

Fuente: elaboración propia.

En la tabla XX se presentan los costos y gastos establecidos en la tabla XX, a modo tener un indicador de comparación entre la situación actual y la propuesta se determina el costo por kilogramo de ambos escenarios. Dicho costo por kilogramo debe ser revisado, analizado y determinado mes con mes por el Departamento de Ingeniería a modo de identificar si ha existido algún problema con el intercambiador de calor que genere costos por arriba del esperado y efectuar las medidas correctivas correspondientes.



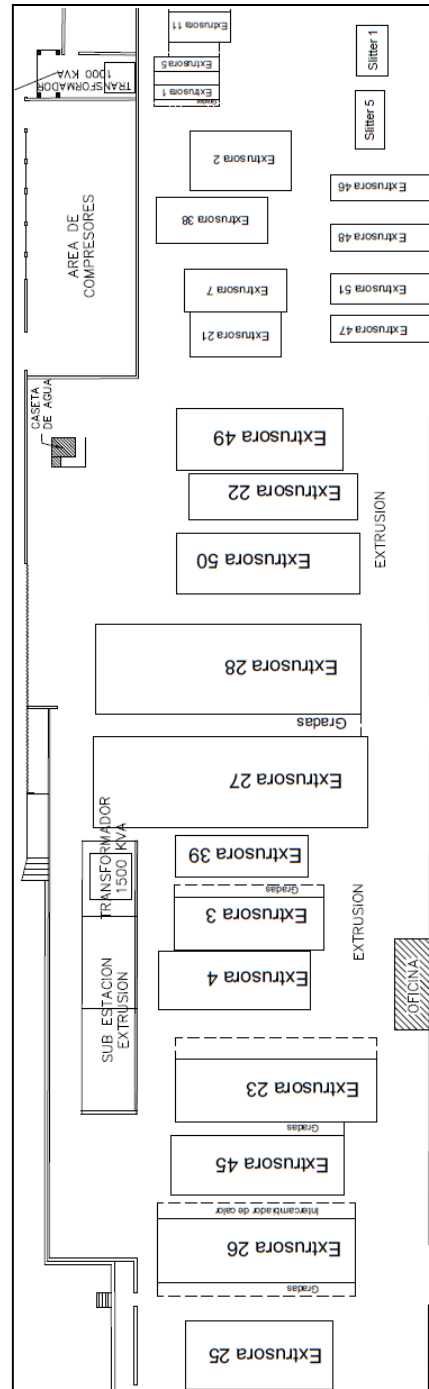
#### **5.1.4. Aplicación de intercambiador en otras extrusoras**

Al momento de analizar los datos tanto de calidad como de producción, se debe de verificar si dichos datos han tenido los resultados deseados para aplicarlos al resto de las extrusoras que no poseen este tipo de sistema de enfriamiento. Para esto es necesario realizar los mismos análisis que se han hecho para la extrusora 21, es decir, se tiene que replicar el mismo proyecto para las demás extrusoras.

Las extrusoras que no cuentan con este sistema de enfriamiento son las que se encuentran en el sector industrial del departamento de Polytec. La figura 51 muestra el Departamento de Extrusión, las extrusoras 21, 7, 38, 2, 47, 51, 48 y 46 son las que se encuentran ubicadas en el área industrial y por lo tanto son las máquinas a las que se recomienda implementar el sistema de enfriamiento, las demás extrusoras se encuentran en el área agrícola comercial y cuentan con tecnologías diferentes en cuanto al control de temperatura de la burbuja.

Las extrusoras 47, 51, 48 y 46 son de las extrusoras más antiguas, según la base de datos de Polytec, y manejan velocidades cercanas a las recomendadas por el fabricante. En este caso se debe analizar si dos extrusoras pueden compartir un intercambiador, con el fin de que no se pierda buena cantidad de transferencia de calor sin lograr aumentar la velocidad de la extrusora significativamente.

Figura 53. Planos del Departamento de Extrusión



Fuente: Departamento de Salud y Seguridad Ocupacional, Polytec.

## **5.2. Mantenimiento del intercambiador de calor**

Una de las cualidades de los intercambiadores de calor es que no necesitan una mano de obra calificada para el mantenimiento del mismo, por lo que el mantenimiento se puede realizar mediante un simple procedimiento por el mismo operador de la máquina o el técnico de mantenimiento designado a la extrusora 21. Los pasos y recomendaciones para el mantenimiento se detallan a continuación:

- Para preservar la vida del intercambiador es importante analizar las entradas al mismo, la primera y más importante es el agua, se debe proveer agua con una baja concentración de dureza, debido a que los químicos y minerales de la misma aceleran la velocidad de corrosión
  
- Para medir la dureza del agua se puede hacer uso de un kit para medir la misma, dicho kit incluye una probeta y distintos tipos de reactivos que sirven para medir las propiedades del agua. Es importante leer las instrucciones del kit de ensayo para determinar qué reactivo mide la dureza del agua, el procedimiento común para medir la dureza se muestra a continuación:
  - El recipiente tiene una marca de 5 ml, este debe ser lavado y llenado hasta la marca.

- Se le debe agregar gota a gota del reactivo destinado a medir la dureza del agua, cada gota representa un grado de dureza, durante el goteo el agua cambiará a color rojo, se debe parar hasta que el agua cambie a color verde y se debe anotar la cantidad de gotas aportadas. Es importante establecer que un grado de dureza equivale a 18 mgCaCo<sub>3</sub>/l con este dato y el apoyo de la tabla 5.1 se obtiene el valor de dureza del agua.

Tabla XXXVIII. **Grado de dureza del agua**

Tipos de agua	mg/l
Agua blanda	≤17
Agua levemente dura	≤60
Agua moderadamente dura	≤120
Agua dura	≤180
Agua muy dura	>180

Fuente: *Wikipedia*. [https://es.wikipedia.org/wiki/Agua\\_dura](https://es.wikipedia.org/wiki/Agua_dura). Consulta: junio de 2015.

- Determinada la dureza del agua se deben establecer las medidas necesarias en dado caso el agua fuera dura. Se recomienda que el agua se encuentre por debajo de los 60 mg/l, de lo contrario se podrían implementar sistemas de destilación de agua en el suministro de agua de las tuberías. Este procedimiento de medición de dureza del agua se recomienda que se realice cada mes.

Luego es necesario analizar la calidad del aire que la turbina de la extrusora envía al intercambiador y para esto es necesario analizar los filtros de la turbina con el propósito de que no lleguen partículas extrañas al intercambiador y puedan dañarlo. La frecuencia con la cual se debe cambiar el filtro de la turbina dependerá de las condiciones del ambiente. En el caso de Polytec, en donde las materias primas no son volátiles, se recomienda que el Departamento de Mantenimiento realice el cambio cada 6 meses según el fabricante.

Para el mantenimiento del intercambiador basta con retirar el intercambiador de las estructuras que lo mantienen unido a las mangueras del anillo de enfriamiento y las mangueras de la turbina. Con el intercambiador afuera se debe lavar la estructura con agua a presión, se debe tener el cuidado de no aplicar mucha presión al agua para no doblar las aletas del intercambiador y provocar grietas o fugas. El agua se debe aplicar al intercambiador de calor en sentido contrario del aire, con el propósito de retirar cualquier tipo de partícula extraña que no haya sido retenida por el filtro de la turbina.

También es una buena práctica aplicar aire comprimido si en dado caso el intercambiador no se encuentra muy sucio, también se puede aplicar aire comprimido después de lavar el intercambiador con agua, con el fin de garantizar que no se acumulen partículas en las aletas del intercambiador a causa de la humedad. De la misma forma se debe hacer circular agua en el intercambiador a modo que salga la suciedad que el intercambiador pudo haber acumulado durante la operación a causa de la dureza del agua.

Una vez realizado el mantenimiento del intercambiador, es necesario realizar las pruebas de fugas o la prueba neumática descrita en el capítulo 4, con el fin de determinar si se originó algún tipo de fisura en los tubos o aletas del intercambiador. Si en dado caso se originó algún tipo de fisura en el intercambiador provocando fugas, es necesario que se aplique soldadura por lo que es necesario que se tenga en consideración todos los puntos establecidos en el capítulo 4 en la sección 4.2.6.1.

Una vez comprobado que el intercambiador no posee fugas y que el funcionamiento es el adecuado, este se debe volver a colocar en la extrusora, siguiendo el procedimiento de montaje establecido en el capítulo 4 sección 4.2.6. Una vez montado el intercambiador se debe evaluar la calidad con la cual se extruye la película de polietileno por medio del equipo de laboratorio de calidad, con el fin de identificar si el intercambiador brinda los resultados deseados.

Se recomienda que las aletas se limpien cada 400 horas de uso además de vaciar el intercambiador y sacar las impurezas del mismo con agua para un periodo de 1 200 horas de uso.

## CONCLUSIONES

1. La implementación de un dispositivo de transferencia térmica en la extrusora 21 es necesaria con base en los resultados encontrados del análisis del diagrama de Pareto, en donde el defecto por calibre representa el 15 % del total de defectos, siendo este el más recurrente.
2. Los procesos que se llevan en la extrusora 21 se encuentran bajo control debido a que durante su funcionamiento no existen datos que salgan de sus límites de control. Sin embargo, existen datos que salen de sus límites de especificación, por ende la variación en el calibre es aportada por cualquiera de las 6M en donde la eme de maquinaria es la causa raíz del mismo.
3. Para que la extrusora 21 eleve su eficiencia en un 33 % es necesario que el diseño del intercambiador de calor cuente con un área del  $0,27 \text{ m}^2$  con 50 aletas, 2 tubos por fila y material de aluminio.
4. La implementación de un intercambiador de calor es una propuesta rentable debido a que su tasa interna de rentabilidad es mucho mayor a la tasa mínima atractiva de rendimiento establecido por la empresa, también su valor presente neto brinda resultados positivos, siendo esta capaz de generar la suficiente cantidad de dinero para recuperar la inversión.

5. Implementado el intercambiador de calor es necesario que se lleven los registros establecidos, para así identificar el comportamiento del intercambiador y la extrusora 21, de la misma forma que se realicen gráficos de control y análisis de Pareto para identificar el porcentaje de participación del defecto por calibre.
6. Implementado el intercambiador de calor se debe de reflejar una baja aproximada de Q 0,56 por kilogramo en el costo por conversión del producto.
7. Es necesario que se lleven a cabo los procedimientos establecidos en el capítulo 5 para el mantenimiento del intercambiador de calor y así evitar producto fuera de estándar.



## RECOMENDACIONES

1. Darle el debido seguimiento a las medidas remedio encontradas en el análisis Ishikawa, esto conlleva el seguimiento de las capacitaciones por medio de lista de asistencias, realizar y asignar encargados para la elaboración de procedimientos en caso de variaciones de calibre, implementar dispositivos que detecten la variación de calibre.
2. Para aumentar la eficiencia de la extrusora y la efectividad del intercambiador de calor, se debe colocar extractores de aire alrededor de la extrusora, de esta forma la temperatura del aire que entra al anillo de enfriamiento sería aproximadamente 13,45 % más baja.
3. Durante todo el proceso de fabricación del intercambiador de calor se deben solicitar a los contratistas todos los ensayos no destructivos que se hayan realizado, a modo de garantizar la calidad del mismo.
4. Exigir la experiencia comprobable y calificación del soldador en cualquier trabajo que se ejecute en el intercambiador de calor, por ejemplo la soldadura o mantenimiento.
5. Llevar un seguimiento de los costos de conversión, analizando el retorno de la inversión y replicar el mismo estudio para las demás extrusoras que no poseen un sistema de enfriamiento.

6. Dar una capacitación acerca del funcionamiento y del propósito del intercambiador de calor, haciendo énfasis en la importancia de mantener el equipo en óptimas condiciones y validar dicha capacitación por medio de una prueba escrita.

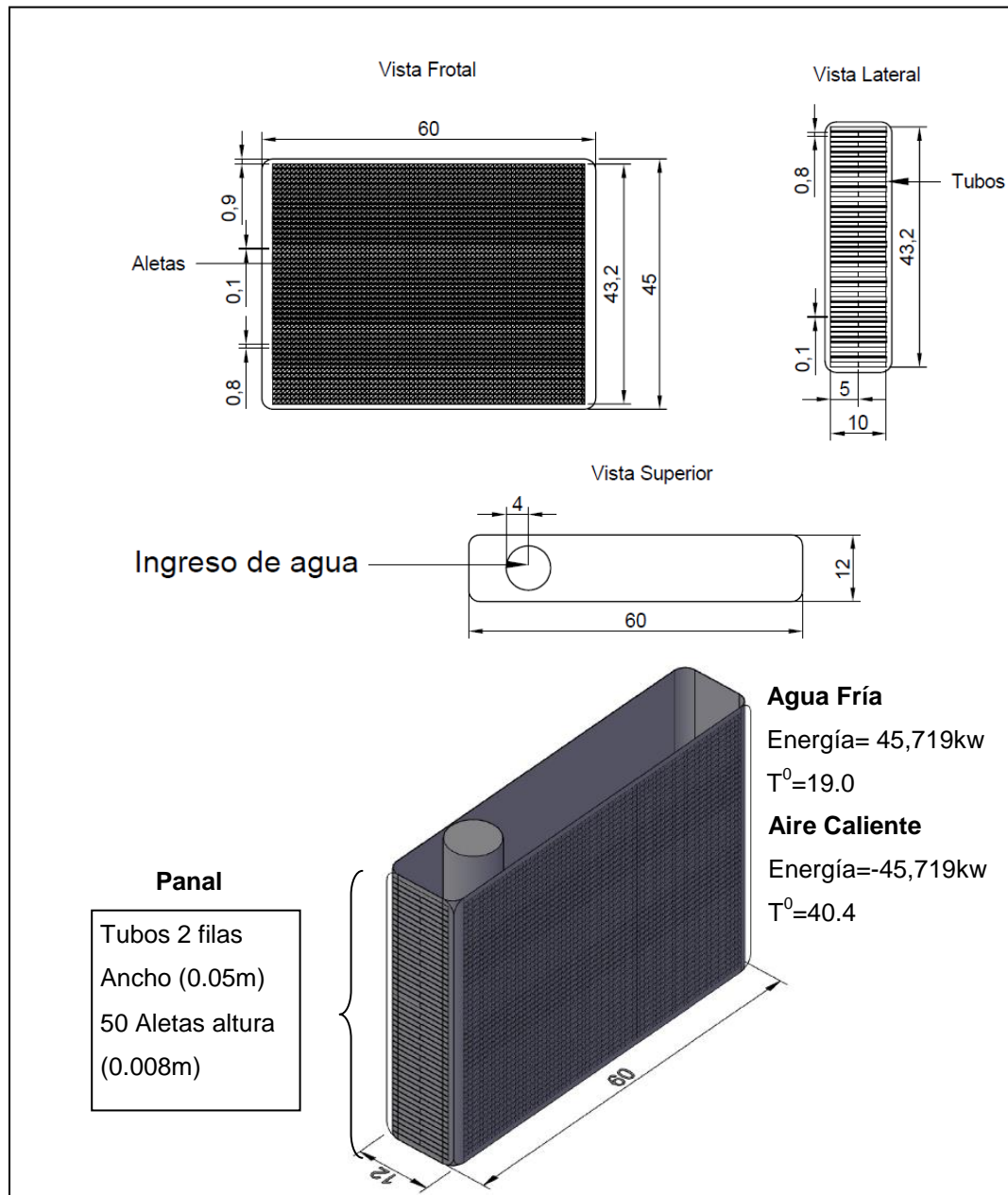
## BIBLIOGRAFÍA

1. BEATRICE, Yolanda. *Optimización del proceso de extrusión y sellado de películas de mezclas de poliolefinas*. Tesis de Ing. en Materiales. Universidad Simón Bolívar, Facultad de Ingeniería, 2007. 70 p.
2. CENGEL, Yunes; BOLES, Michael. *Termodinámica*. 7a ed. México: McGraw-Hill, 2012. 1009 p. ISBN: 9786071507433.
3. CIFUENTES, Roosevelth. *Diseño de una máquina extrusora para la empresa Plastik de occidente*. Tesis de Ing. en Materiales. Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería, 2011. 60 p.
4. GARCÍA, Roberto. *Estudio de métodos y medición del trabajo*. 2a ed. México: McGraw-Hill, 2005. 476 p. ISBN: 9789701046579.
5. GUTIÉRREZ, Humberto. *Calidad total y productividad*. 3a ed. México: McGraw-Hill, 2010. 359 p. ISBN: 9786071503152.
6. MORTON, Jones. *Procesamiento de plásticos*. México: Limusa, 2006. 304 p. ISBN 9789681844349.
7. PÉREZ, et al. *Relación estructura-propiedades en el PEBD*. Revista Iberoamericana de polímeros, (15): 1-18, noviembre 2013.

8. RAMÍREZ, Emmanuel. *Estudio e implementación de un sistema de iluminación y ventilación en el área de extrusión de plástico en la empresa polímeros y tecnología*. Trabajo de graduación Ing. Industrial. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2013. 182 p.
9. RAMOS, Luis. *Extrusión de plásticos*. California: Limusa, 2007. 188 p. ISBN: 9789681845049.
10. REINHEIMER, Carlos. *Radiadores de aluminio vs cobre*. [en línea]. <[www.facorsa.com/.../FACORSA\\_Radiadores\\_AluminioVSCobre](http://www.facorsa.com/.../FACORSA_Radiadores_AluminioVSCobre)>. [Consulta: junio de 2014].
11. SUÉSCUM, Juan. *Mejoramiento de la eficiencia de una extrusora de doble tornillo para fabricación de tubería*. Tesis de Ing. Mecánica. Universidad de Ecuador, Facultad de Ingeniería, 2007. 104 p.
12. WELTY, James. *Transferencia de calor aplicada a la ingeniería*. México: Limusa, 2002. 564 p. ISBN: 9789681806286.

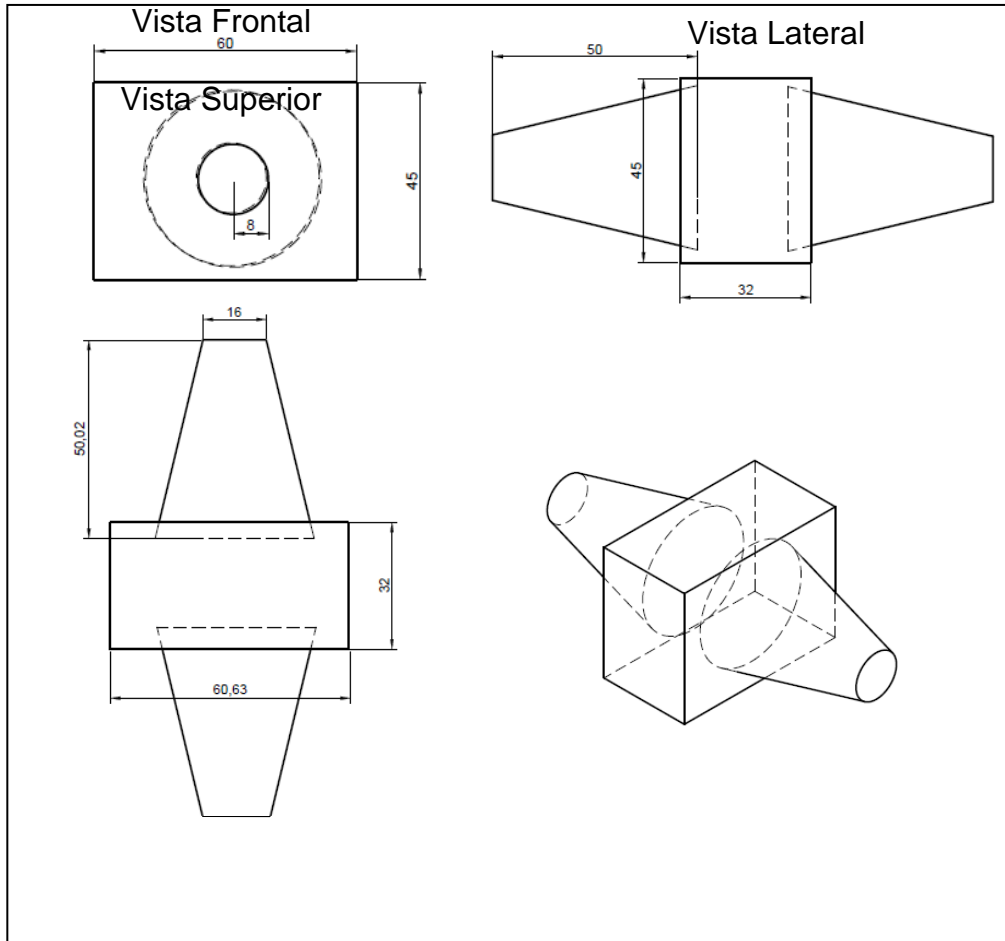
# APÉNDICES

## Apéndice 1. Diseño del intercambiador de calor



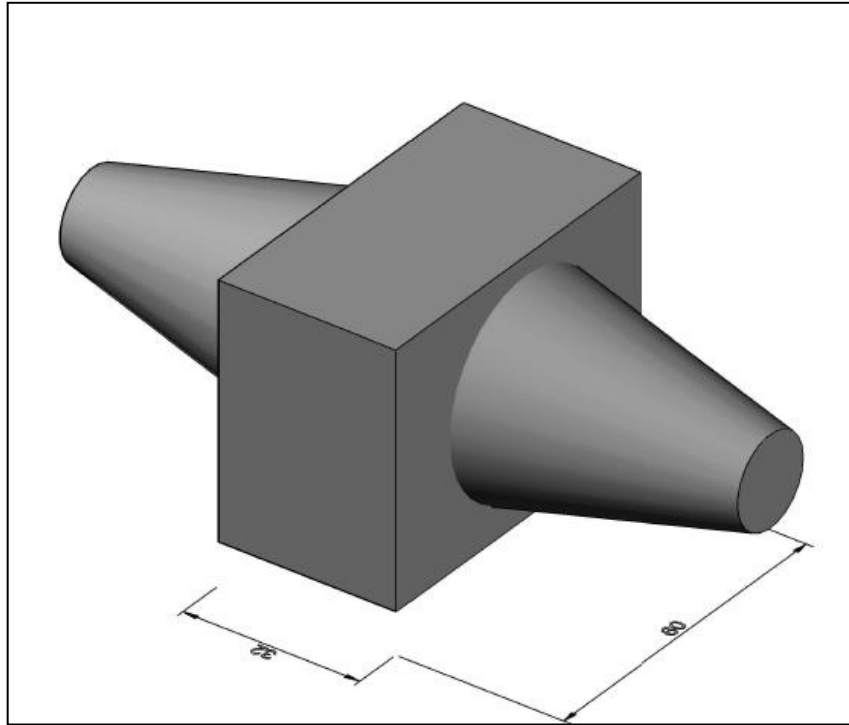
Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

Apéndice 2. **Diseño estructura del intercambiador de calor**



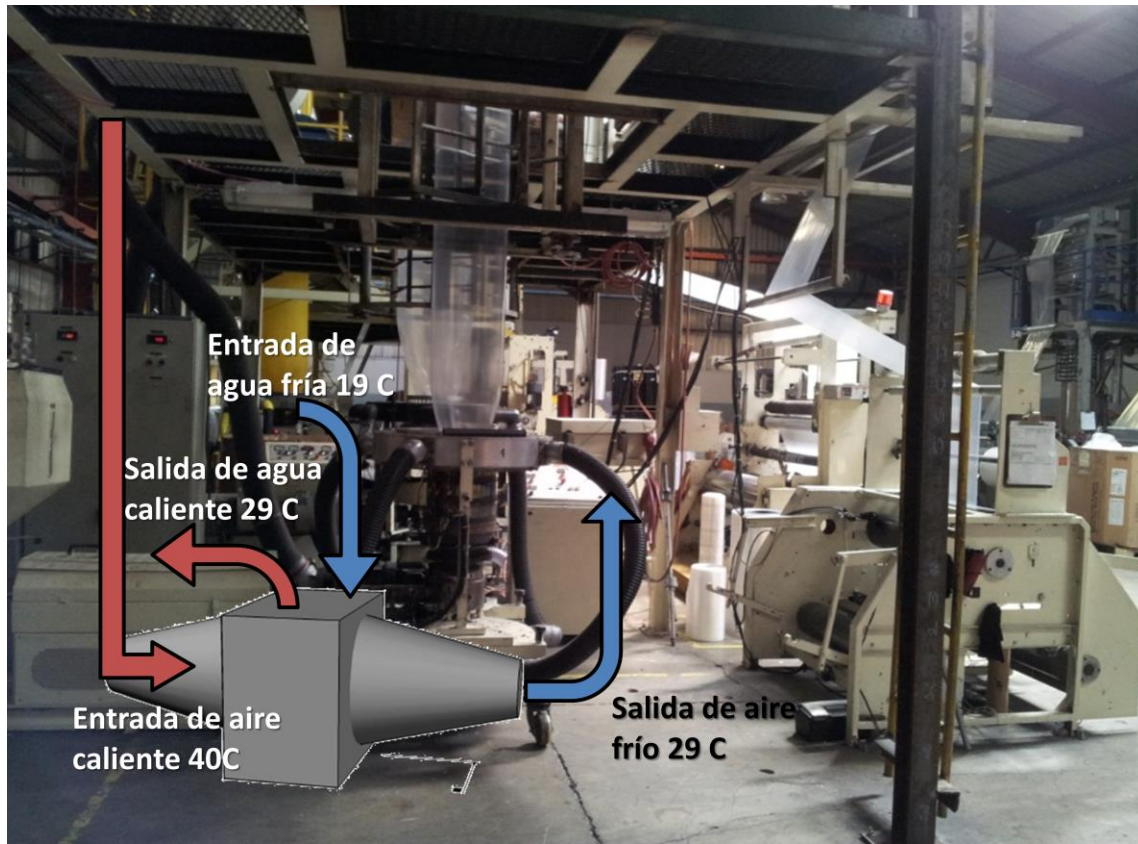
Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

Apéndice 3. **Estructura del intercambiador de calor**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

#### Apéndice 4. Intercambiador en extrusora



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.



## ANEXOS

### Anexo 1. Propiedades del agua en líquido saturado

Propiedades del agua (líquido saturado)\*.

Nota:  $Gr, Pr = \left( \frac{g\beta\rho^2c_p}{\mu k} \right) x^3 \Delta T$

°F	°C	$c_p, \text{kJ/kg}\cdot^\circ\text{C}$	$\rho, \text{kg/m}^3$	$\mu, \text{kg/m}\cdot\text{s}$	$k, \text{W/m}\cdot^\circ\text{C}$	Pr	$\frac{g\beta\rho^2c_p}{\mu k}, \text{1/m}^3\cdot^\circ\text{C}$
32	0	4,225	999,8	$1,79 \times 10^{-3}$	0,566	13,25	
40	4,44	4,208	999,8	1,55	0,575	11,35	$1,91 \times 10^9$
50	10	4,195	999,2	1,31	0,585	9,40	$6,34 \times 10^9$
60	15,56	4,186	998,6	1,12	0,595	7,88	$1,08 \times 10^{10}$
70	21,11	4,179	997,4	$9,8 \times 10^{-4}$	0,604	6,78	$1,46 \times 10^{10}$
80	26,67	4,179	995,8	8,6	0,614	5,85	$1,91 \times 10^{10}$
90	32,22	4,174	994,9	7,65	0,623	5,12	$2,48 \times 10^{10}$
100	37,78	4,174	993,0	6,82	0,630	4,57	$3,3 \times 10^{10}$
110	43,33	4,174	990,6	6,16	0,637	4,04	$4,19 \times 10^{10}$
120	48,89	4,174	988,8	5,62	0,644	3,64	$4,89 \times 10^{10}$
130	54,44	4,179	985,7	5,13	0,649	3,30	$5,66 \times 10^{10}$
140	60	4,179	983,3	4,71	0,654	3,01	$6,48 \times 10^{10}$
150	65,55	4,183	980,3	4,3	0,659	2,73	$7,62 \times 10^{10}$
160	71,11	4,186	977,3	4,01	0,665	2,53	$8,84 \times 10^{10}$
170	76,67	4,191	973,7	3,72	0,668	2,33	$9,85 \times 10^{10}$
180	82,22	4,195	970,2	3,47	0,673	2,16	$1,09 \times 10^{11}$
190	87,78	4,199	966,7	3,27	0,675	2,03	
200	93,33	4,204	963,2	3,06	0,678	1,90	
220	104,4	4,216	955,1	2,67	0,684	1,66	
240	115,6	4,229	946,7	2,44	0,685	1,51	
260	126,7	4,250	937,2	2,19	0,685	1,36	
280	137,8	4,271	928,1	1,98	0,685	1,24	
300	148,9	4,296	918,0	1,86	0,684	1,17	
350	176,7	4,371	890,4	1,57	0,677	1,02	
400	204,4	4,467	859,4	1,36	0,665	1,00	
450	232,2	4,585	825,7	1,20	0,646	0,85	
500	260	4,731	785,2	1,07	0,616	0,83	
550	287,7	5,024	735,5	$9,51 \times 10^{-3}$			
600	315,6	5,703	678,7	8,68			

\* Adaptado al SI de A. I. Brown y S. M. Munce: *Introduction to Heat Transfer*, 3ª ed. McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1958.

Fuente: WARK, Kenneth. *Termodinámica*. p.953.

## Anexo 2. Propiedades del aire a presión atmosférica

Propiedades del aire a la presión atmosférica\*.

Los valores de  $\mu$ ,  $k$ ,  $c_p$  y Pr dependen poco de la presión y se pueden utilizar en un intervalo bastante amplio de presiones

$T$ , K	$\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	$c_p$ , kJ/kg·°C <small><math>\times 1000</math></small>	$\mu \times 10^6$ , kg/m·s	$\nu \times 10^6$ , m <sup>2</sup> /s	$k$ , W/m·°C	$\alpha \times 10^6$ , m <sup>2</sup> /s	Pr
100	3,6010	1,0266	0,6924	1,923	0,009246	0,02501	0,770
150	2,3675	1,0099	1,0283	4,343	0,013735	0,05745	0,753
200	1,7684	1,0061	1,3289	7,490	0,01809	0,10165	0,739
250	1,4128	1,0053	1,5990	11,31	0,02227	0,15675	0,722
300	1,1774	1,0057	1,8462	15,69	0,02624	0,22160	0,708
350	0,9980	1,0090	2,075	20,76	0,03003	0,2983	0,697
400	0,8526	1,0140	2,286	25,90	0,03365	0,3760	0,689
450	0,7333	1,0207	2,484	31,71	0,03707	0,4222	0,683
500	0,7048	1,0295	2,671	37,90	0,04038	0,5564	0,680
550	0,6423	1,0392	2,848	44,34	0,04360	0,6532	0,680
600	0,5879	1,0551	3,018	51,34	0,04659	0,7512	0,680
650	0,5430	1,0635	3,177	58,51	0,04953	0,8578	0,682
700	0,5030	1,0752	3,332	66,25	0,05230	0,9672	0,684
750	0,4709	1,0856	3,481	73,91	0,05509	1,0774	0,686
800	0,4405	1,0978	3,625	82,29	0,05779	1,1951	0,689
850	0,4149	1,1095	3,765	90,75	0,06028	1,3097	0,692
900	0,3925	1,1212	3,899	99,3	0,06279	1,4271	0,696
950	0,3716	1,1321	4,023	108,2	0,06525	1,5510	0,699
1.000	0,3524	1,1417	4,152	117,8	0,06752	1,6779	0,702
1.100	0,3204	1,160	4,44	138,6	0,0732	1,969	0,704
1.200	0,2947	1,179	4,69	159,1	0,0782	2,251	0,707
1.300	0,2707	1,197	4,93	182,1	0,0837	2,583	0,705
1.400	0,2515	1,214	5,17	205,5	0,0891	2,920	0,705
1.500	0,2355	1,230	5,40	229,1	0,0946	3,262	0,705
1.600	0,2211	1,248	5,63	254,5	0,100	3,609	0,705
1.700	0,2082	1,267	5,85	280,5	0,105	3,977	0,705
1.800	0,1970	1,287	6,07	308,1	0,111	4,379	0,704
1.900	0,1858	1,309	6,29	338,5	0,117	4,811	0,704
2.000	0,1762	1,338	6,50	369,0	0,124	5,260	0,702
2.100	0,1682	1,372	6,72	399,6	0,131	5,715	0,700
2.200	0,1602	1,410	6,93	432,6	0,139	6,120	0,707
2.300	0,1538	1,482	7,14	464,0	0,149	6,540	0,710
2.400	0,1458	1,574	7,35	504,0	0,161	7,020	0,718
2.500	0,1394	1,688	7,57	543,5	0,175	7,441	0,730

\* De Natl. Bur. Stand. (U.S.) Circ. 564, 1955.

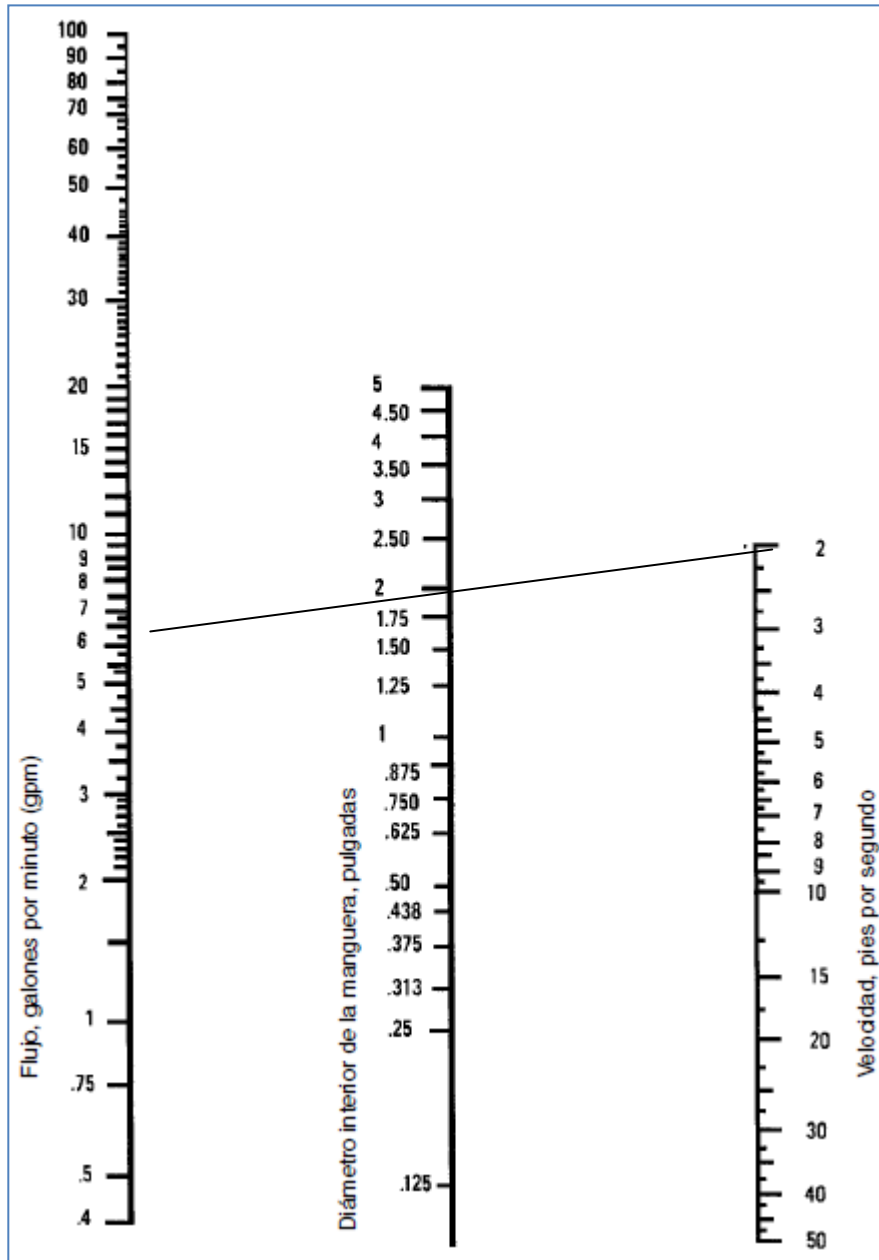
Fuente: WARK, Kenneth. *Termodinámica*. p.931.

### Anexo 3. Constantes para gráficos de control

Constantes para Gráficos de Control																
n	A	A2	A3	c4	1/c4	B3	B4	B5	B6	d2	d3	1/d2	D1	D2	D3	D4
2	2.121	1.880	2.659	0.798	1.253	0.000	3.267	0.000	2.606	1.128	0.853	0.886	0.000	3.686	0.000	3.267
3	1.732	1.023	1.954	0.886	1.128	0.000	2.568	0.000	2.276	1.693	0.888	0.591	0.000	4.358	0.000	2.575
4	1.500	0.729	1.628	0.921	1.085	0.000	2.266	0.000	2.088	2.059	0.880	0.486	0.000	4.698	0.000	2.282
5	1.342	0.577	1.427	0.940	1.064	0.000	2.089	0.000	1.964	2.326	0.864	0.430	0.000	4.918	0.000	2.114
6	1.225	0.483	1.287	0.952	1.051	0.030	1.970	0.029	1.874	2.534	0.848	0.395	0.000	5.079	0.000	2.004
7	1.134	0.419	1.182	0.959	1.042	0.118	1.882	0.113	1.806	2.704	0.833	0.370	0.205	5.204	0.076	1.924
8	1.061	0.373	1.099	0.965	1.036	0.185	1.815	0.179	1.751	2.847	0.820	0.351	0.388	5.307	0.136	1.864
9	1.000	0.337	1.032	0.969	1.032	0.239	1.761	0.232	1.707	2.970	0.808	0.337	0.547	5.394	0.184	1.816
10	0.949	0.308	0.975	0.973	1.028	0.284	1.716	0.276	1.669	3.078	0.797	0.325	0.686	5.469	0.223	1.777
11	0.905	0.285	0.927	0.975	1.025	0.321	1.679	0.313	1.637	3.173	0.787	0.315	0.811	5.535	0.256	1.744
12	0.866	0.266	0.886	0.978	1.023	0.354	1.646	0.346	1.610	3.258	0.778	0.307	0.923	5.594	0.283	1.717
13	0.832	0.249	0.850	0.979	1.021	0.382	1.618	0.374	1.585	3.336	0.770	0.300	1.025	5.647	0.307	1.693
14	0.802	0.235	0.817	0.981	1.019	0.406	1.594	0.398	1.563	3.407	0.763	0.294	1.118	5.696	0.328	1.672
15	0.775	0.223	0.789	0.982	1.018	0.428	1.572	0.421	1.544	3.472	0.756	0.288	1.203	5.740	0.347	1.653
16	0.750	0.212	0.763	0.983	1.017	0.448	1.552	0.440	1.527	3.532	0.750	0.283	1.282	5.782	0.363	1.637
17	0.728	0.203	0.739	0.985	1.016	0.466	1.534	0.459	1.510	3.588	0.744	0.279	1.356	5.820	0.378	1.622
18	0.707	0.194	0.718	0.985	1.015	0.482	1.518	0.475	1.496	3.640	0.739	0.275	1.424	5.856	0.391	1.609
19	0.688	0.187	0.698	0.986	1.014	0.497	1.503	0.490	1.483	3.689	0.733	0.271	1.489	5.889	0.404	1.596
20	0.671	0.180	0.680	0.987	1.013	0.510	1.490	0.503	1.470	3.735	0.729	0.268	1.549	5.921	0.415	1.585
21	0.655	0.173	0.663	0.988	1.013	0.523	1.477	0.516	1.459	3.778	0.724	0.265	1.606	5.951	0.425	1.575
22	0.640	0.167	0.647	0.988	1.012	0.534	1.466	0.528	1.448	3.819	0.720	0.262	1.660	5.979	0.435	1.565
23	0.626	0.162	0.633	0.989	1.011	0.545	1.455	0.539	1.438	3.858	0.716	0.259	1.711	6.006	0.443	1.557
24	0.612	0.157	0.619	0.989	1.011	0.555	1.445	0.549	1.429	3.895	0.712	0.257	1.759	6.032	0.452	1.548
25	0.600	0.153	0.606	0.990	1.010	0.565	1.435	0.559	1.420	3.931	0.708	0.254	1.805	6.056	0.459	1.541





Fuente: *Opty estadística*. [www.optyestadistica.wordpress.com/2008/08/27/tabla-de-constantas-para-graficos-de-control/](http://www.optyestadistica.wordpress.com/2008/08/27/tabla-de-constantas-para-graficos-de-control/). Consulta: enero de 2015.

#### Anexo 4. Nomograma de capacidad de flujo



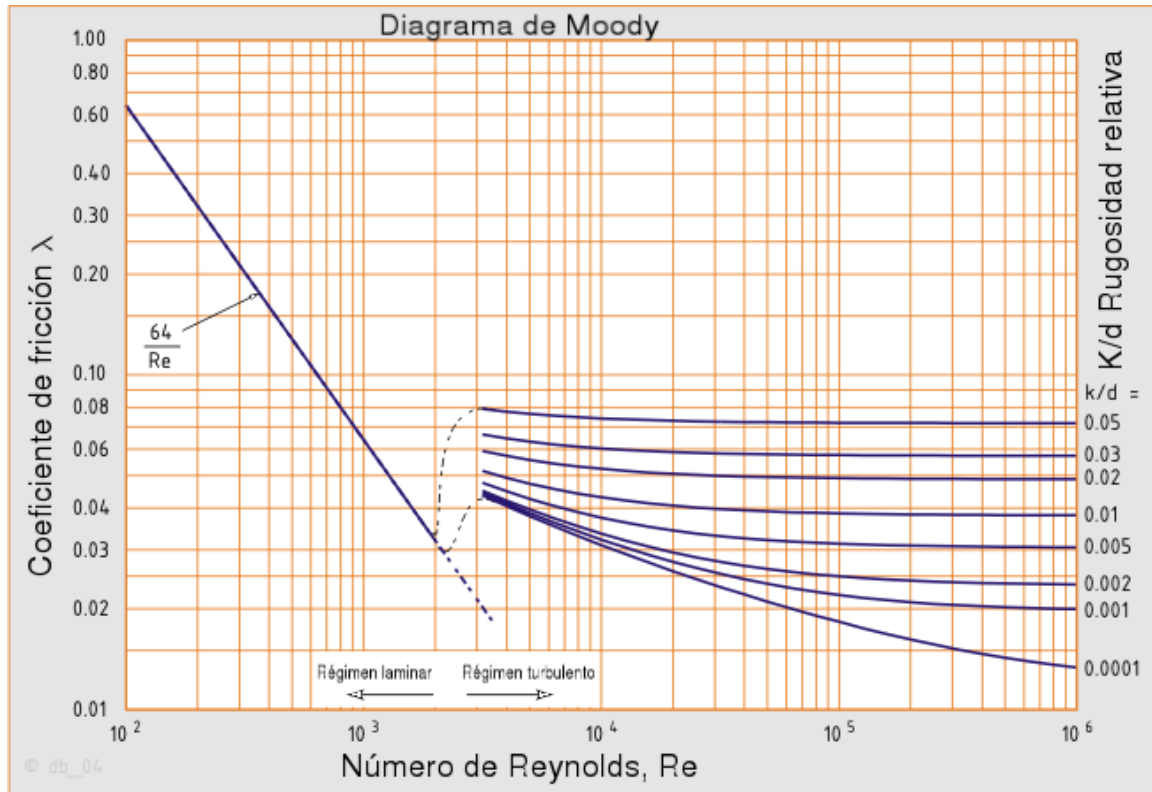
Fuente: *Técnica y ateísmo*. [www.tecnicayateismo.wordpress.com/tag/calculo-de-aire-comprimido/](http://www.tecnicayateismo.wordpress.com/tag/calculo-de-aire-comprimido/). Consulta: marzo de 2015.

## Anexo 5. Características de mangueras

HIDROTRENZ		Aplicaciones	Color externo	Color interno	
<b>Usos</b>	Impulsión de aire, agua y líquidos no corrosivos en general.				
					
<b>Características Generales</b>					
<b>Superficie externa:</b> Lisa con impresión de tela fina. <b>Compuesto interno:</b> SBR - EPDM. <b>Compuesto externo:</b> EPDM. <b>Refuerzo:</b> Trenzas de hilado de poliéster (#2). Temperatura: -30°C / 82°C. K de rotura: 2,5.					
Ø interno (mm)	Ø interno (pulg)	Ø externo (mm)	Presión de Trab. - bar	Presión de Trab. - psi	Peso Kg/Mt
19	3/4	31	5	73	0,567
22	7/8	33	5	73	0,636
25	1	37	5	73	0,705
28	1 1/8	39	5	73	0,775
31,5	1 1/4	44	5	73	0,869
35	1 3/8	46	5	73	0,939
38	1 1/2	50	5	73	1,012
45	1 3/4	56	5	73	1,177
51	2	63	5	73	1,353
57	2 1/4	69	4	58	1,535
63	2 1/2	77	4	58	1,932
76	3	89	4	58	2,559
90	3 1/2	102	4	58	3,292
100	4	117	3	44	4,301

Fuente: *Rc ingeniería*. <http://www.rcingenieria.com.ar/mangueras-hidraulicas-agua-aire.php?id=34>. Consulta: marzo de 2015.

## Anexo 6. Diagrama de Moody



Fuente: *Wikipedia*. [https://es.wikipedia.org/wiki/Diagrama\\_de\\_Moody](https://es.wikipedia.org/wiki/Diagrama_de_Moody). Consulta: marzo de 2015.