



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Aplicación de la termografía infrarroja como método de inspección no destructivo para el mantenimiento predictivo del proceso de extrusión de tubería en PVC.**

**Didier Aldana Rodríguez**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de ingeniería, Departamento Mecánica y Mecatrónica  
Bogotá, Colombia  
2017



# **Aplicación de la termografía infrarroja como método de inspección no destructivo para el mantenimiento predictivo del proceso de extrusión de tubería en PVC.**

**Didier Aldana Rodríguez**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:  
**Magister en Ingeniería Mecánica**

Director: Juan Hernando Reyes Pacheco  
Ingeniero Metalúrgico  
Candidato a Doctor en Ciencia Y Tecnología de Los Materiales  
Profesor asociado departamento de Mecánica y Mecatrónica

Línea de Investigación:  
Ensayos No Destructivos

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de ingeniería, Departamento Mecánica y Mecatronica  
Bogotá, Colombia

2017



## **Agradecimientos**

Agradezco a la Empresa Tuboplex S.A. por abrirme sus puertas y permitir el desarrollo de este proyecto, que contribuye a disminuir la amplia brecha que aún persiste entre empresa y universidad.

Agradezco a María Ofelia Rodríguez de Aldana quien facilitó parte de los recursos económicos para la adquisición del equipo termográfico, fundamental para el desarrollo de la tesis.

Agradezco al Ingeniero Juan Hernando Reyes Pacheco por la profunda orientación en el desarrollo del proyecto, quien además me brindó una valiosa guía durante todo el proceso.

## Resumen

Los ensayos no destructivos han experimentado un gran desarrollo en las últimas décadas debido a su aplicación en el mantenimiento predictivo y el control de calidad. Este documento describe con detalle el procedimiento de inspección por Termografía Infrarroja (IRT) bajo el Estándar ASTM E 1934-99a, de una extrusora de tubería en PVC en la Empresa Tuboplex S.A, partiendo desde los principios físicos de la radiación infrarroja y los aspectos técnicos del ensayo. Se inspeccionaron los componentes eléctricos y mecánicos de la extrusora, así como muestras de producto terminado y producto en proceso, obteniendo termogramas que permitieron diagnosticar el estado de los componentes y evaluar las discontinuidades del producto. Los termogramas se analizaron con el software especializado FLIRTools. Fueron evaluadas 7 muestras de tubería de las cuales cuatro (4) eran muestras de producto terminado y tres (3) muestras de producto en proceso, que presentaban diversas discontinuidades como poros, agujeros, grietas, deformación, degradación y mala conformación entre otros. Se visualizó la afectación de los procesos de transferencia de calor y patrones de radiación, por causa de las discontinuidades superficiales y subsuperficiales. Se realizaron los modelos térmicos de dos extrusoras, los cuales permitieron entender los procesos térmicos generados en los componentes y se cuantificaron los flujos de calor internos y externos. Se usó la IRT como herramienta de mantenimiento predictivo, puesto que se analizaron los componentes según su nivel de criticidad, se evaluaron térmicamente las anomalías encontradas y se realizaron pronósticos del comportamiento de la temperatura.

**Palabras clave:** Termografía infrarroja (IRT), Termograma, Emisividad, Temperatura Reflejada, Transferencia de Calor, Conductividad Térmica, Difusividad Térmica.

## Abstract

Non-destructive testing has experienced great development in the last decades due to its application in predictive maintenance and quality control. This document describes in detail the Infrared Thermography (IRT) inspection procedure of a PVC pipe extruder under ASTM standards, based on the physical principles of infrared radiation and the technical aspects of the test. This technique is fast, non-contact, safe and is considered a useful and versatile tool. The electrical and mechanical components of the extruder were inspected, as well as samples of finished product and product in process, obtaining thermograms that allowed to diagnose the state of the components and to evaluate the discontinuities of the product. The thermograms were analyzed with the specialized FLIRTools software. Six pipe samples were evaluated, of which four (4) were samples of finished product and two (2) samples of product in process, which had different discontinuities such as pores, holes, cracks and poor conformation among others. The effects of heat transfer processes and radiation patterns of surface and subsurface discontinuities were visualized. The thermal model of the extruder was realized, which allowed to understand the thermal processes generated in the components and quantified the internal and external heat flows. IRT was used as a predictive maintenance tool, since component failures were analyzed according to their criticality level, the anomalies found were thermally evaluated and temperature prognostics were performed.

**Key words:** Infrared thermography (IRT), Thermogram, Emissivity, Reflected Temperature, Heat Transfer, Thermal Conductivity, Thermal Diffusivity.

## Tabla de Contenido

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA</b> .....	<b>5</b>
<b>1.1 PRINCIPIOS FÍSICOS</b> .....	<b>5</b>
1.1.1 Ondas electromagnéticas .....	5
1.1.2 Propagación de las ondas .....	5
1.1.3 Luz visible en el espectro electromagnético .....	6
1.1.4 Cuerpo negro .....	6
1.1.5 Magnitudes y Unidades Radiométricas (SI) .....	8
1.1.6 Radiación infrarroja .....	9
1.1.7 Energía .....	10
1.1.8 Temperatura y calor .....	11
1.1.9 Balance de energía .....	12
1.1.10 Mecanismos de transferencia de calor .....	12
<b>1.2 PRINCIPIOS DE TERMOGRAFÍA INFRARROJA</b> .....	<b>23</b>
1.2.1 Tipos de termografía .....	24
1.2.2 Inspecciones directas e indirectas .....	26
1.2.3 Monitoreo de condición con termografía .....	26
1.2.4 Criterios de evaluación de la gravedad de la temperatura .....	28
1.2.5 Aspectos importantes para toma de termogramas .....	29
<b>2. PROCESO DE EXTRUSIÓN DE TUBERÍA DE PVC</b> .....	<b>35</b>
<b>2.1 PVC</b> .....	<b>35</b>
2.1.1 Propiedades del PVC .....	35
<b>2.2 EXTRUSIÓN DE PVC</b> .....	<b>35</b>
2.2.1 Mezclado .....	36
2.2.2 Tolva .....	37
2.2.3 Tornillo de extrusión .....	37
2.2.4 Barril de extrusión .....	38
2.2.5 Resistencias calefactoras .....	38



---

2.2.6 Conjunto barril, tornillo y resistencia -----	39
2.2.7 Motor principal -----	41
2.2.8 Cabezal -----	41
2.2.9 Tina de enfriamiento -----	43
2.2.10 Halado, marcación y corte -----	43
2.2.11 Acampanador -----	44
2.2.12 Control Automatizado -----	45
2.2.13 Diagrama de bloques proceso de extrusión -----	45
<b>2.3 TIPOS DE TUBERÍA -----</b>	<b>45</b>
2.3.1 Tubería de PVC Hidráulica -----	46
2.3.2 Tubería sanitaria -----	46
2.3.3 Tubería ventilación -----	46
2.3.4 Tubería Conduit -----	47
<b>2.4 DISCONTINUIDADES COMUNES EN LA TUBERÍA DE PVC -----</b>	<b>47</b>
2.4.1 Aspectos generales mecánicos y térmicos de los defectos y/o discontinuidades -----	47
2.4.2 Marcas discontinuas en la superficie -----	48
2.4.3 Burbujas -----	48
2.4.4 Dimensiones desiguales en los diámetros -----	49
2.4.5 Porosidad -----	49
2.4.6 Degradación -----	50
2.4.7 Piel de tiburón y abaumbamiento -----	50
2.4.8 Ovalamiento -----	51
<b>3. MODELO TÉRMICO Y MATEMÁTICO DE UNA EXTRUSORA -----</b>	<b>52</b>
<b>3.1 CONSIDERACIONES TÉCNICAS PARA EL MODELO TÉRMICO-----</b>	<b>52</b>
<b>3.2 SUPOSICIONES PARA EL MODELO TÉRMICO DE LAS EXTRUSORAS -----</b>	<b>53</b>
<b>3.3 MODELO EXTRUSORA DE TUBERÍA CONDUIT (LÍNEA 1)-----</b>	<b>54</b>
3.3.1 Perfil de temperatura de las zonas de calentamiento y enfriamiento -----	55
3.3.2 Modelo térmico de las zonas de calentamiento 1 a 8 -----	55
3.3.3 Modelo térmico de la zona 9 -----	61
3.3.4 Modelo térmico tina de enfriamiento -----	63

---

<b>3.4 MODELO TÉRMICO EXTRUSORA DE TUBERÍA SANITARIA (LÍNEA 2)</b> .....	<b>67</b>
3.4.1 Características del conjunto barril, tornillo y calefactores .....	67
3.4.2 Perfil de temperatura de las zonas de calentamiento de la línea 2 .....	68
3.4.3 Modelo térmico de las zonas de calentamiento 1 a 8 .....	68
3.4.4 Modelo térmico tina de enfriamiento línea 2 .....	71
<b>3.5 COMPARACIÓN DE LOS MODELOS DE LAS LÍNEAS 1 Y 2</b> .....	<b>72</b>
3.5.1 Comparación del perfil de temperaturas .....	72
3.5.3 Comparación del flujo de calor por convección en la tina de enfriamiento .....	74
<b>4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL</b> .....	<b>75</b>
<b>4.1 ANÁLISIS TÉRMICO DE DISCONTINUIDADES EN TUBERÍAS DE PVC</b> .....	<b>76</b>
4.1.1 Consideraciones y características de las mediciones .....	77
4.1.2 Termogramas de defectos superficiales y subsuperficiales de producto terminado .....	77
4.1.3 Termogramas de defectos superficiales de producto en proceso .....	82
<b>4.2 INSPECCIÓN DE LOS COMPONENTES DE LA EXTRUSORA DE LA LÍNEA 1 DE EXTRUSIÓN</b> .....	<b>84</b>
4.2.1 Análisis de criticidad .....	85
4.2.2 Procedimiento de inspección bajo el Estándar ASTM E 1934-99a .....	86
4.2.3 Comparación con el modelo térmico .....	100
<b>5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>105</b>
<b>5.1 CONCLUSIONES</b> .....	<b>105</b>
<b>5.2 RECOMENDACIONES</b> .....	<b>107</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>110</b>
<b>ANEXO A: Glosario</b> .....	<b>113</b>
<b>ANEXO B : Estado del arte de la documentación técnica vigente para la aplicación de termografía infrarroja</b> .....	<b>115</b>
<b>ANEXO C. Elementos del procedimiento para inspección por termografía infrarroja según estandar ASTM E-1934-99a</b> .....	<b>122</b>
<b>ANEXO D. Reportes de mantenimiento línea 1 de extrusión de la Empresa Tuboplex</b> .....	<b>125</b>
<b>ANEXO E: Ficha técnica línea 1 de extrusión</b> .....	<b>127</b>

## Lista de figuras

Figura 1-1 Espectro electromagnético -----	6
Figura 1-2 Curva ley de Wien -----	8
Figura 1-3 Espectro infrarrojo -----	9
Figura 1-4 Emisión electromagnética de los diferentes colores -----	10
Figura 1-5 Transformación de energía eléctrica en térmica -----	11
Figura 1-6 Ejemplo de convección forzada -----	15
Figura 1-7 Emisividad según material -----	19
Figura 1-8 Absorción de IR -----	21
Figura 1-9 Transmisión de IR -----	21
Figura 1-10 Patrón de radiación de cargas desbalanceadas. -----	28
Figura 1-11 Resoluciones térmicas -----	29
Figura 1-12. Paletas de colores-----	30
Figura 1-13 Influencia del enfoque en la medición de la temperatura -----	31
Figura 1-14. Sintonización (Thermal Tuning) -----	31
Figura 1-15. Situación de medición -----	32
Figura 1- 16. Emisividad de un sistema -----	33
Figura 1-17 Campo de visión -----	34
Figura 2-1 Extrusora, con indicación de sus elementos _____	36
Figura 2-2 Sección transversal de una extrusora _____	36
Figura 2-3 Tolva línea 1 de extrusión de la Empresa Tuboplex _____	37
Figura 2-4 Tornillos de extrusión _____	37
Figura 2-5 Barril de extrusora _____	38
Figura 2-6 Estructura de las resistencias calefactoras _____	39
Figura 2-7 Conjunto Barril- resistencias línea 1 Empresa Tuboplex _____	41
Figura 2-8 Motor principal de la extrusora línea 1 Empresa Tuboplex _____	41
Figura 2-9 Partes del cabezal de una extrusora _____	42
Figura 2-10 Adaptador y cabezal línea 1 de extrusión Empresa Tuboplex _____	43
Figura 2- 11 Tina de enfriamiento línea 1 de extrusión Empresa Tuboplex _____	43
Figura 2-12 a) Halador; b) Sierra cortadora _____	44

Figura 2-13 Acampanador línea 1 de extrusión Empresa Tuboplex _____	44
Figura 2- 14 RAC eléctrico línea 1 de extrusión Empresa Tuboplex _____	45
Figura 2-15 Diagrama de bloques proceso de extrusión. _____	45
Figura 2-16 Partes principales de la tubería _____	46
Figura 2-17 Tipos de tubería estándar según uso _____	47
Figura 2-18 Detalle de la tubería Conduit _____	47
Figura 2-19 Marcas en tubería Conduit. _____	48
Figura 2-20 Burbujas en tubería de PVC _____	49
Figura 2-21 Poros en la tubería sanitaria de PVC _____	49
Figura 2-22 Degradación en la tubería Conduit _____	50
Figura 2- 23 Piel de tiburón en tubería de PVC _____	51
Figura 3-1 Perfil de temperaturas para carga más alta del proceso -----	55
Figura 3-2 Esquema modelo térmico -----	56
Figura 3-3 Flujo de calor por radiación $Q_4$ . -----	59
Figura 3-4 Flujo de calor $Q_4$ vs $A_a$ .-----	60
Figura 3-5 Flujo de calor $Q_4$ vs $A_a$ .-----	60
Figura 3-6 Flujo de calor $Q_5$ . -----	61
Figura 3-7 Zona 9 línea 1 de extrusión Tuboplex S.A. -----	62
Figura 3-8 Modelo térmico del sistema tubo-tina -----	63
Figura 3-9 Perfil de temperaturas para carga más alta del proceso de la línea 2. -----	68
Figura 3-10 Flujo de calor por radiación $Q_4$ vs Temperatura de las zonas. -----	69
Figura 3-11 Flujo de calor $Q_4$ vs $A_a$ línea 2. -----	70
Figura 3-12 Flujo de calor $Q_5$ en la línea 2. -----	70
Figura 3-13 Comparación del perfil de temperaturas de las líneas de extrusión 1 y 2. -----	73
Figura 3-14 Comparación de flujo de calor ( $Q_4$ ) líneas de extrusión 1 y 2. -----	73
Figura 3- 15 Comparación de flujo de calor $Q_5$ líneas 1 y 2 _____	74
Figura 4-1 a) Imagen visual muestra 1; b) Termograma muestra1. _____	78
Figura 4-2 a) Imagen visual muestra 2; b) Termograma muestra 2. _____	79
Figura 4-3 a) Imagen visual muestra 3; b) Termograma muestra 3. _____	80
Figura 4-4 a) Imágenes visuales muestra 4; b) Termogramas muestra 4. _____	81
Figura 4-5 a) Imagen visual muestra 5; b) Termograma muestra 5. _____	82
Figura 4-6. a) Imagen visual muestra 6; b) Termograma muestra 6. _____	83

## Lista de tablas

Tabla 1-1 Radiometrías _____	8
Tabla 1-2 Tipos de ondas _____	9
Tabla 1- 3. Conductividad de los metales _____	13
Tabla 1- 4. Emisividades según material _____	19
Tabla 1-5 Condiciones detectables en sistemas mecánicos usando termografía infrarroja _____	27
Tabla 1- 6. Criterios de aceptación eléctricos _____	29
Tabla 3-1. Especificaciones tubería Conduit y Sanitaria en la Empresa Tuboplex. _____	53
Tabla 3-2. Dimensiones y valores nominales de las 4 zonas del barril. _____	54
Tabla 3-3. Dimensiones y valores nominales de las zonas entre adaptador y el cabezal. _____	54
Tabla 3-4. Flujo de calor por Zona de calentamiento de la línea de extrusión 1 _____	58
Tabla 3- 5. Dimensiones y valores nominales de las 4 zonas del barril _____	67
Tabla 3- 6. Dimensiones y valores nominales de las zonas entre adaptador y el cabezal _____	67
Tabla 3-7. Flujos de calor del modelo térmico de la línea 2. _____	69
Tabla 4-1. Tubos defectuosos primer trimestre del año Empresa Tuboplex.-----	76
Tabla 4-2. Criterios de evaluación de la criticidad -----	85
Tabla 4- 3. Criticidad de mantenimiento para componentes de la línea 1 de extrusión-----	86
Tabla 4- 4. Límites de aproximación a partes energizadas de equipos -----	91

## Lista de Símbolos y abreviaturas

### Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
$A$	Amplitud de onda	1	Ec. 1.2
$c$	Velocidad de la luz	$\frac{m}{s}$	
$C_f$	Coeficiente de fricción	1	Ec. 1.14
$E$	Energía	J	
$f$	Frecuencia	Hz	Sec. 1.2
$F$	Fuerza		
$h$	Coeficiente de convección	$\frac{W}{m^2 \cdot C}$	
$\hbar$	constante de Planck	J	Ec. 1.5
$I$	Energía Radiada	$\frac{W}{m^2}$	Sec. 1.3.1
$m$	Masa	Kg	Sec. 1.7.2
$Nu$	Numero de nusselt	1	Sec. 1.7.2.1
$k$	Constante conductividad térmica	$\frac{W}{m \cdot C^\circ}$	Sec. 1.7.1.1
$Q$	Tranferencia de calor	J	Ec. 1.7
$Re$	Número de Reynolds	1	
$T$	Temperatura	$C^\circ, K$	Ec. 1.4
$v$	Velocidad de propagación	$\frac{m}{s}$	Ec. 1.1
$w$	Frecuencia Angular	$rad$	Ec. 1.2

## Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
$\alpha$	absorbencia	1	Ec. 1.3
$\sigma$	Constante de Stefan Boltzman	$\frac{W}{m^2 K^4}$	Ec. 1.4
$\varepsilon$	Emisividad	1	Sec. 1.8.1
$\rho$	Densidad	$\frac{kg}{m^3}$	Sec. 1.1.10.1
$\lambda$	Longitud de onda	m	Sec. 1.2
$\mu$	Viscosidad Dinámica	$\frac{kg}{m \cdot s}$	Ec. 1.17

## Abreviaturas

### Abreviatura Término

NTC	Norma Técnica Colombiana
IR	Radiación Infrarroja
IRT	Termografía Infrarroja
ASTM	American Society of Testing Materials
ISO	International Standardization Organization
Pymes	Pequeña y mediana empresa
Ec.	Ecuación
Sec.	Sección





## INTRODUCCIÓN

La Empresa Tuboplex S.A tiene como misión la fabricación de tubería y uniones en PVC para satisfacer la demanda del mercado colombiano, con base en las necesidades técnicas de las diversas clases de construcciones civiles. Cuenta actualmente con cuatro (4) líneas de extrusión y una (1) de coextrusión, que generan una producción anual aproximada de cuatro mil (4.000) toneladas de tubería de PVC, de las cuales doscientas (200) toneladas (5% de la producción) presentan defectos y deben ser reprocesadas. Las cuatro líneas de extrusión de la empresa fueron construidas con partes y diseños de componentes por encargo con obra de mano nacional, excepto los conjuntos barril-tornillo que fueron importados de Alemania.

En los últimos 30 años la termografía infrarroja ha probado ser una herramienta eficaz para el mantenimiento predictivo. La termografía tiene fundamento en el hecho que en el momento que la temperatura de un equipo se incrementa, indica que algo anormal está sucediendo en su operación. Esta temperatura está relacionada con un aumento de energía térmica y de radiación infrarroja, la detección de esta radiación infrarroja ayuda a evaluar problemas existentes de una manera rápida, segura y sin tener que interrumpir el funcionamiento normal del equipo [3]. La termografía infrarroja es una técnica bastante utilizada en Evaluación No Destructiva (END), este éxito está relacionado con la gran variedad de procesos y eventos que puede abarcar y la rapidez con la cual se obtienen termogramas (imágenes térmicas) para monitorear la condición o estado de máquinas y/o componentes [4].

Actualmente la termografía es utilizada con éxito para la investigación, caracterización de materiales y el monitoreo de condición en varias ramas de la industria [5] tales como: monitoreo de condición de equipo y componentes eléctricos [6-8], monitoreo de maquinaria industrial [9-11], diagnóstico de uniones soldadas [12-13], diagnósticos de componentes y materiales de la industria aeroespacial [14-15], caracterización y análisis de materiales metálicos[16], incluso tiene aplicación en la industria alimentaria, la maderera, la construcción y otros sectores no industriales como el sector salud [17-20]. En la industria plástica la termografía es usada para la evaluación de adhesivos plásticos, caracterización de materiales plásticos [21] y para la evaluación de diversos materiales plásticos una vez manufacturados [22].

En la investigación del estado del arte de la aplicación de la termografía como monitoreo de condición del proceso de extrusión de PVC, no se halló literatura sobre este tema particular en las diversas bases de datos (ScienceDirect, ResearcGate, ProQuest, Scopus, AcademicsGoogle entre otros). La aplicación de esta técnica no tiene precedentes en las empresas dedicadas a la extrusión de PVC en Colombia, principalmente por desconocimiento de la existencia de la técnica, el manejo de los equipos, costos de este y conocimiento técnico necesario. Por lo tanto esta investigación presenta una innovación incremental en la aplicación de Ensayos No Destructivos en la industria manufactura de plásticos.

Las extrusoras de la Empresa Tuboplex tienen un índice elevado de operatividad (24 horas al día de lunes a sábado) que envejece rápidamente los componentes y mecanismos, motivo por el cual la confiabilidad mecánica se ve comprometida en picos altos de producción. La Empresa Tuboplex se enfoca netamente en el mantenimiento correctivo de fallas eléctricas y mecánicas imprevistas, con costos elevados de mantenimiento. Estas fallas pueden producir diversas discontinuidades en los tubos de PVC, como burbujas, ovalidad, degradación, poros, agujeros, rugosidad, marcas y grietas.

Cuando un lote no cumple con los requisitos de calidad deben ser reciclados y reprocesados disminuyendo la calidad del material e incurriendo en mayores gastos. Actualmente la empresa no cuenta con un programa de mantenimiento preventivo o predictivo, por lo tanto no es posible anticiparse a las fallas en los sistemas y componentes de las cinco líneas de extrusión. La empresa en ocasiones debe detener la producción para cambiar y/o reparar piezas una vez ocurrido el problema. De esta problemática surge la siguiente pregunta de investigación: ¿La inspección por termografía infrarroja permitiría evaluar discontinuidades en la tubería de PVC y posibles fallas en los componentes mecánicos y eléctricos de una extrusora de PVC?.

Para el desarrollo de esta investigación se plantearon los siguientes objetivos específicos, que se desarrollaron satisfactoriamente: Consultar y estudiar el estado del arte de la normatividad vigente para el uso de termografía infrarroja a nivel industrial; estudiar y realizar el modelo térmico de dos de las cuatro líneas de extrusión de PVC de la empresa; estudiar y

analizar los principios físicos de la técnica de termografía infrarroja que se aplicarán para la inspección del proceso de extrusión de PVC en la empresa; realizar un análisis térmico de las discontinuidades en la tubería generadas por el proceso de fabricación (particularmente deformación, degradación, porosidad, agujeros, rugosidad, marcas y grietas) ;elaborar un procedimiento de inspección termográfica para dos líneas de extrusión de la Empresa Tuboplex S.A, con base en el Estándar ASTM E 1934-99a como plan de mantenimiento predictivo sugerido.

El documento está estructurado en cinco (5) capítulos que describen la aplicación del método de inspección no destructivo de termografía infrarroja como herramienta del mantenimiento predictivo para el proceso de extrusión de tubería en PVC en la Empresa Tuboplex. El capítulo 1 inicia con la descripción de los principios físicos de la radiación infrarroja y los mecanismos de transferencia de calor, porque el entendimiento y la apropiación de estos conceptos facilitan y aseguran la calidad del proceso de inspección. Así mismo en este capítulo se explica con detalle los aspectos teóricos y técnicos de la termografía infrarroja, los tipos en los que se divide, la forma de aplicarla y las implicaciones en la precisión y confiabilidad en los datos que tiene una adecuada elección y uso del equipo. Conocer los aspectos técnicos de la inspección por termografía infrarroja es tan importante como conocer los principios físicos, ya que articular estos dos aspectos de manera sinérgica, asegura una adecuada implementación de la técnica y resultados confiables. El capítulo 2 describe de manera sucinta el proceso de extrusión e ilustra los componentes principales de una línea de extrusión de tubería Conduit (tubería para cableado eléctrico). El capítulo también relaciona y describe las discontinuidades que se presentan en la tubería de PVC, con un corto análisis de causalidad mecánica de estas discontinuidades o defectos. El capítulo 3 presenta modelos térmicos de las líneas 1 y 2 de extrusión de la Empresa Tuboplex, con el propósito de correlacionar matemáticamente las variables temperatura (T) y flujo de calor (Q) presentes en el proceso de extrusión. También con el objeto de comparar el comportamiento de las variables de interés según el producto manufacturado. En el capítulo 4 los termogramas obtenidos durante el procedimiento de inspección y su ulterior análisis, permiten determinar y/o diagnosticar, indicaciones y/o anomalías presentes en la muestra o componente bajo estudio. Así mismo se analizan y plasman en los reportes, los diagnósticos y recomendaciones sobre las indicaciones, hallazgos y/o anomalías encontradas. Los datos cuantitativos obtenidos en los termogramas

4 Aplicación de la termografía infrarroja como método de inspección no destructivo para el mantenimiento predictivo del proceso de extrusión de tubería en PVC.

---

y los pronósticos realizados, servirán como insumo para el inicio de la implementación de un programa de mantenimiento predictivo.

Los anexos socializan los términos técnicos necesarios para la comprensión de los capítulos desarrollados en el documento. Así mismo contienen un estado del arte de la documentación técnica donde se relacionan y describen de los estándares y normas internacionales, que actualmente rigen los procesos de inspección para la aplicación de la termografía infrarroja. También contienen una ficha técnica de una extrusora y el historial de mantenimiento de los últimos semestres.

# 1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

## 1.1 PRINCIPIOS FÍSICOS

### 1.1.1 Ondas electromagnéticas

Las ondas electromagnéticas se producen por la perturbación de un campo electromagnético y se caracterizan porque sus campos eléctrico y magnético, oscilan en planos perpendiculares entre sí. También se reflejan, refractan y comportan como las ondas de luz.

### 1.1.2 Propagación de las ondas

El estudio de la propagación de las ondas utiliza como punto de partida, las ecuaciones de la mecánica Newtoniana [23]. En el estudio las ondas se caracterizan por la longitud de onda y la frecuencia:

- La longitud de onda  $\lambda$ : Es la distancia entre dos puntos máximos sucesivos.
- La frecuencia  $f$ : Es el número de ciclos que se repiten en un segundo y se expresa en ciclos por segundo (Hz).

La velocidad de propagación de onda, se da mediante la ecuación:

$$v = \lambda f \quad \text{Ec.(1-1)}$$

Una onda que se desplaza en la dirección positiva del eje X a lo largo de una cuerda estirada, está determinada por la ecuación:

$$y(x, t) = A \cdot \text{sen}(wt - x) \quad \text{Ec.(1-2)}$$

Donde:

$y(x, t)$ : Es el desplazamiento transversal a partir de su posición de equilibrio en el instante  $t$  de un punto con coordenada  $x$  sobre la cuerda.

$A$ : Es el máximo desplazamiento o amplitud

$w$ : Frecuencia angular, igual a  $2\pi f$ .

### 1.1.3 Luz visible en el espectro electromagnético

Dentro del espectro electromagnético (ver figura 1-1) hay una región que constituye la luz visible, la retina humana es sensible a las ondas electromagnéticas que se encuentren dentro de este dominio. Al llegar ondas de estas longitudes de onda a nuestros ojos dan la sensación de luz [24]. Los parámetros de la luz visible se encuentran en el rango:

$$\lambda: 400 \text{ a } 700 \text{ nm } (400 * 10^{-9} \text{ a } 700 * 10^{-9} \text{ m})$$

$$f: 750 \text{ a } 430 \text{ THz } (7.5 * 10^{14} \text{ a } 4.3 * 10^{14} \text{ Hz})$$

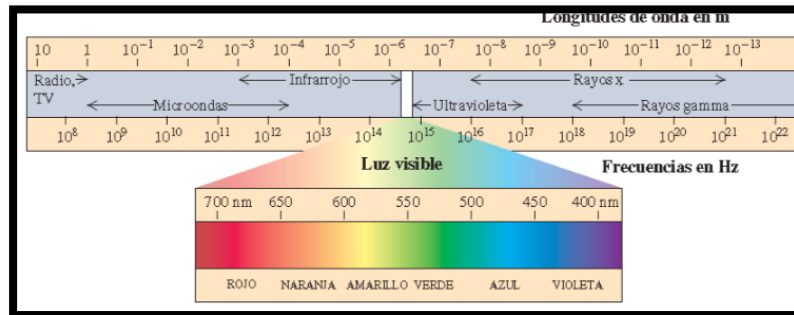


Figura 1-1 Espectro electromagnético [25].

### 1.1.4 Cuerpo negro

Es una superficie ideal que absorbe toda la energía incidente desde el exterior y emite toda la energía incidente desde el interior. La materia caliente emite radiación continua de energía desde su superficie, esta energía radiante es transportada por ondas electromagnéticas que al incidir sobre la superficie de un cuerpo, pueden ser reflejadas, transmitidas o absorbidas. En un cuerpo, la energía que se absorbe es igual a la cantidad de energía que el cuerpo emite [24]. En la naturaleza no existe una superficie con las características de un cuerpo negro, ya que cualquier superficie siempre refleja parte de la energía transmitida sobre su superficie; se usa este cuerpo ideal como referencia y/o para la medición de ciertas propiedades ópticas y térmicas de los materiales de ingeniería [23]. Un balance de energía respecto a un receptor en el cual la energía incidente total es la unidad, está dada por la ecuación:

$$\alpha + t + r = 1 \quad \text{Ec.(1-3)}$$

Donde:

$\alpha$ : Fracción absorbida de la energía incidente (Absorbencia)

$t$ : Fracción transmitida de la energía incidente (Transmisividad)

$r$ : Fracción reflejada de la energía incidente (Reflexividad)

**1.1.4.1 Ley de Stefan – Boltzman.** Expresa que la energía de radiación emitida por un cuerpo negro por unidad de tiempo y por unidad de área superficial fue determinada de manera experimental en 1879, y se expresa como [26]:

$$I = \sigma T^4 \quad \text{Ec.(1-4)}$$

Donde:

$I$ : Energía radiada ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

$\sigma$ : Constante de Stefan-Boltzman =  $5.67051 \cdot 10^{-8} \text{ w}/\text{m}^2\text{K}^4$ .

$T$ : Temperatura de la superficie (K)

**1.1.4.2 Ley de radiación de Planck.** Expresa que la intensidad de la radiación emitida por un cuerpo negro que está a una temperatura absoluta  $T$  y a una longitud de onda  $\lambda$ , se determinada por [6]:

$$I(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)} \quad \text{Ec.(1-5)}$$

Donde:

$\hbar$ : Constante de Planck= $6.626069 \times 10^{-34} \text{ J}$

$c$ : Velocidad de la luz

$K$ : Constante de Boltzman =  $1.38065 \cdot 10^{-23} \text{ J}/\text{K}$

$T$ : Temperatura absoluta.

$\lambda$ : Longitud de onda.

**1.1.4.3 Ley de Wien.** Expresa que el área total bajo una curva de longitud de onda vs energía a una determinada temperatura, representa la potencia promedio radiada total por unidad de área superficial y es proporcional a  $T^4$ . Como se puede observar en la figura 1-2, a mayor temperatura el pico se vuelve más alto. Al hallar el producto entre la longitud de onda del pico de la curva y su temperatura, el producto es constante. A partir de esta ley, es posible conocer la temperatura de un objeto que se encuentre a cierta distancia [26].

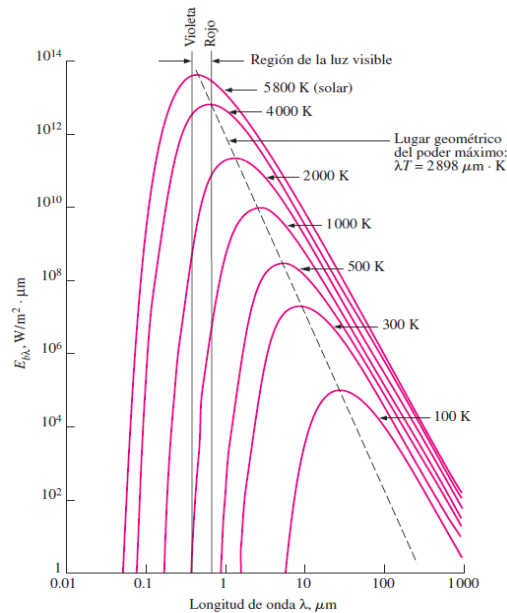


Figura 1-2 Curva ley de Wien [27].

La ley de Wien explica por qué los cuerpos a elevada temperatura, generan principalmente radiación infrarroja de onda corta, mientras que los que se encuentran a baja temperatura, lo hacen solamente en forma de radiación infrarroja de onda larga [26].

### 1.1.5 Magnitudes y Unidades Radiométricas (SI)

La radiación infrarroja se expresa en las magnitudes y unidades relacionadas en la tabla 1-1

Tabla 1-1 Radiometrías [26].

Magnitud	Unidad
Flujo radiante	Vatio (W)
Intensidad radiante	Vatio por estereorradián (W/sr)
Irradiancia <sup>1</sup>	Vatio por metro cuadrado (W/m <sup>2</sup> )
Dosis	Julio por metro cuadrado (J/m <sup>2</sup> )
Radiancia <sup>2</sup>	Watio por estereorradián metro cuadrado (W/sr m <sup>2</sup> )

<sup>1</sup> La irradiancia es la magnitud utilizada para describir la potencia incidente por unidad de superficie de todo tipo de radiación electromagnética. En unidades del sistema internacional se mide en W/m<sup>2</sup>. (DicLib.com, 2016).

<sup>2</sup> Los cuerpos calientes emiten radiación térmica en todo el espectro electromagnético, sobre todo en la zona del infrarrojo. (DicLib.com, 2016).



### 1.1.6 Radiación infrarroja

La radiación infrarroja o radiación térmica es un tipo de radiación electromagnética de mayor longitud de onda que la luz visible, pero menor que la de las microondas y no es visible al ojo humano. Todo cuerpo que se encuentre a una temperatura superior a la temperatura del cero absoluto, emite energía térmica en forma de radiación infrarroja (En la escala Celsius el cero absoluto corresponde aproximadamente a 273°C por debajo de cero). La radiación térmica es diferente de las otras formas de radiación, como los rayos x, los rayos gamma, las microondas, las ondas de radio y de televisión, las cuales no están relacionadas con la temperatura [26]. Comprende desde los 760 nm, limitando con el color rojo en la zona visible del espectro, hasta los 13.000 nm, limitando con las microondas como se muestra en la figura 1-3. La cantidad y la longitud de onda de la radiación emitida dependen de la temperatura y los materiales del objeto considerado.

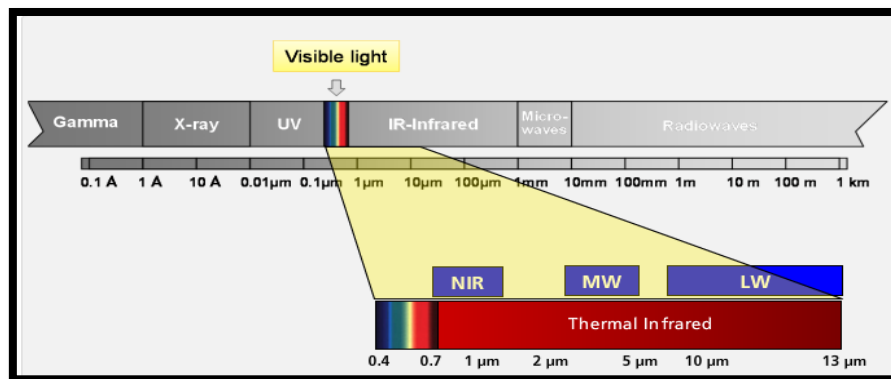


Figura 1-3 Espectro infrarrojo [28]

La radiación infrarroja cubre tres bandas de longitud de onda diferentes y se relacionan en la tabla 1-2.

Tabla 1-2 Tipos de ondas [26]

Tipo de onda	Radiación	Longitud de onda
Onda corta	IR <sup>3</sup> - A	760-2000 nm
Onda media	IR - B	2000-4000 nm
Onda larga	IR - C	4000-13000 nm

<sup>3</sup> IR: Infrarrojo

A diferencia de la luz visible el color del material no afecta las emisiones de radiación térmica como se observa en la figura 1-4, que ilustra que todas las radiaciones son iguales en los distintos colores siendo esta únicamente función de la temperatura.

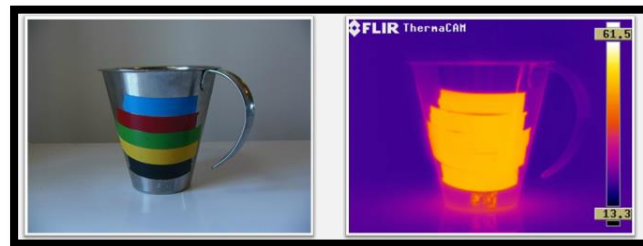


Figura 1-4 Emisión electromagnética de los diferentes colores [28].

### 1.1.7 Energía

Energía es la capacidad para hacer trabajo y puede tomar varias formas tales como: Energía eléctrica, química, mecánica y calor. Si se introduce energía en un sistema este incrementará el movimiento de sus moléculas y se calentará, de otro lado si se toma energía de un sistema este se enfriará. La energía puede tomar varias formas y puede cambiar de una a otra. Puede transformarse en energía calórica lumínica, eléctrica, mecánica, química, nuclear, sonido y energía térmica [27].

**1.1.7.1 Transformación de energía mecánica en térmica.** La energía mecánica se transforma en energía térmica, a través de movimiento continuo, fricción, presión y choques de partículas.

**1.1.7.2 Transformación energía eléctrica en térmica.** Cada vez que la corriente eléctrica fluye en un material, se genera calor por la resistencia de los materiales conductores. Esto se puede ilustrar con una bombilla eléctrica como ejemplo (Ver figura 1-5).

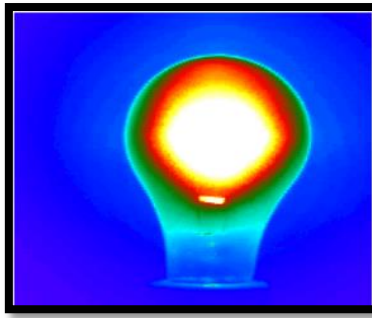


Figura 1-5 Transformación de energía eléctrica en térmica [8].

### 1.1.8 Temperatura y calor

La temperatura es indicador de que tan rápido se mueven y vibran los átomos y moléculas de un cuerpo o sustancia. Se mide en grados Celsius, Fahrenheit o Kelvin, a menos temperatura se mueven o vibran menos las moléculas.

El calor es una forma de energía que es transferida a causa de una diferencia de temperaturas y está asociada con el movimiento aleatorio de los átomos y moléculas. Fluye siempre de una región de mayor temperatura a una de menor temperatura. Cuando se agrega calor a un objeto la energía se acumula como energía interna e incrementa la temperatura de los objetos. La cantidad de calor requerido para aumentar la temperatura de una cantidad de materia depende de la masa del material, del cambio de temperatura y de una propiedad del material llamada capacidad calorífica<sup>4</sup> [27].

La energía se puede transferir hacia una masa dada, o desde esta, por dos mecanismos: calor ( $Q$ ) y trabajo ( $W$ ). Una interacción energética es transferencia de calor si la fuerza impulsora es una diferencia de temperatura, de lo contrario es trabajo. La cantidad de calor transferido por unidad de tiempo se llama razón de transferencia del calor y se denota por  $\dot{Q}$ . La razón de transferencia del calor por unidad de área se llama flujo de calor  $\dot{q}$  [27].

---

<sup>4</sup> Capacidad de un cuerpo para almacenar calor

### 1.1.9 Balance de energía

La primera ley de la termodinámica o el balance de energía para cualquier sistema que pasa por cualquier proceso se puede expresar como:

$$E_{ent} - E_{sal} = \Delta E_{sist} \quad \text{Ec.(1-6)}$$

Cuando un sistema cerrado<sup>5</sup> estacionario comprende sólo transferencia de calor y no hay interacciones de trabajo a través de su frontera, la relación de balance de energía se reduce a:

$$Q = mc_v \Delta T \quad \text{Ec.(1-7)}$$

Donde:

$Q$ : Cantidad de calor o cantidad transferencia neta de calor hacia el sistema desde éste

$m$ : Masa del sistema

$c_v$ : Calor específico a volumen constante

$\Delta T$ : Diferencia de la temperatura.

La mayoría de sistemas que se pueden caracterizar y/o modelar a través de un balance energético y/o de calor en el área de interés, a través de la siguiente relación:

$$Q_{entrante} - Q_{saliente} + E_{gen} = \Delta E_{térmica} \quad \text{Ec.(1-8)}$$

Donde:

$E_{gen}$  = Generación de calor (conversión de las energías química, nuclear y eléctrica en energía térmica)

### 1.1.10 Mecanismos de transferencia de calor

Hay 3 formas básicas de transferir calor de un objeto a otro. La más común es la conducción, en la cual el calor se conduce directamente por contacto. La otra es la convección en donde

---

<sup>5</sup> Sistema de masa fija

la transferencia se realiza por el movimiento de un fluido como el agua o el aire [27]. Finalmente hay transmisión de calor por radiación, la cual se produce a través de radiación de ondas electromagnéticas.

**1.1.10.1 Transferencia de calor por Conducción.** Es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas; esto puede ocurrir en sólidos, líquidos y gases, pero es el único modo de transferencia en los sólidos; en los gases la conducción se debe a las colisiones y a la difusión de las moléculas durante su movimiento aleatorio [27]. Cuando el calor viaja de un punto a otro por conducción se debe a un gradiente de temperaturas y la velocidad de conducción depende de la conductividad y difusividad térmica del material.

- **Conductividad térmica.** La conductividad térmica ( $k$ ) es una medida de la capacidad de un material para conducir calor, un valor elevado para la conductividad térmica indica que el material es un buen conductor del calor y un bajo valor indica que el material es un aislante. Los cristales y metales puros tienen las conductividades térmicas más elevadas, los gases y los aislantes, las más bajas [27].

Las conductividades térmicas de los materiales varían con la temperatura, la variación de la conductividad térmica sobre ciertos rangos de temperatura es despreciable para algunos materiales, pero significativa para otros; es práctica común evaluar la conductividad térmica ( $k$ ) a la temperatura promedio y tratarla como constante en los cálculos [27]. Las conductividades térmicas ( $K$ ) de algunos metales se muestran en la tabla 1-3.

Tabla 1- 3. Conductividad de los metales [27].

Sustancia	K (w/m K)	Sustancia	K (w/m K)
Mercurio	8.3	Aluminio	205
Plomo	34.7	Cobre	385
Acero	50.2	Plata	406
Latón	109		

- **Difusividad térmica.** Se define como la rapidez con la que se difunde la temperatura en un material, esta puede concebirse como la razón entre el calor conducido a través de un material y el calor almacenado por unidad de volumen.

$$\alpha = \frac{\text{Calor conducido}}{\text{Calor almacenado}} = \frac{k}{\rho C_p} \quad \text{Ec.(1-9)}$$

Donde:

$\rho C_p$  = Calor almacenado por unidad de volumen

$C_p$  = Calor almacenado por unidad de masa

Entre mayor sea la difusividad térmica, más rápida es la propagación del calor hacia el medio. Un valor pequeño de la difusividad térmica significa que, en su mayor parte, el calor es absorbido por el material y una pequeña cantidad de ese calor será conducido todavía más [8].

Los átomos de las regiones más calientes tienen en promedio más energía cinética que sus vecinos más fríos, así que los empujan y les dan algo de su energía (los átomos no se mueven, la energía sí). Los electrones llevan energía de las regiones más calientes de un metal a las más frías. La velocidad de la conducción de calor a través de un medio depende de la configuración geométrica de este, su espesor y el material de que esté hecho, así como la diferencia de temperatura a través de él [27]. La velocidad está dada por la **Ley de Fourier de la conducción del calor** la cual indica que la razón de conducción del calor en una dirección es proporcional al gradiente de temperatura en esa dirección.

$$\dot{Q}_{COND} = -kA \frac{dT}{dx} \quad \text{Ec.(1-10)}$$

Donde:

$k$ : Conductividad térmica del material (ver tabla 1-3)

$A$ : Área transversal

$\frac{dT}{dx}$ : Gradiente de temperatura con respecto a la ubicación

**1.1.10.2 Transferencia de calor por convección.** Es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacentes que están en movimiento y

comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluidos entre más rápido es el movimiento de un fluido, mayor es la transferencia de calor por convección, en ausencia de cualquier movimiento masivo de fluido, la transferencia de calor entre una superficie sólida y el fluido adyacente es por conducción [27].La convección puede ser natural o forzada. El flujo de calor por convección esta modelado por **la Ley de Newton del enfriamiento**:

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_{\infty}) \quad \text{Ec.(1-11)}$$

Donde:

$h$  : Coeficiente de transferencia de calor por convección

$A_s$ : Área superficial a través de la cual tiene lugar la transferencia de calor por *convección*

$T_s$ : Temperatura de la superficie

$T_{\infty}$ : Temperatura del fluido suficientemente alejado de la superficie (en la superficie la temperatura del fluido es igual a la del sólido).

- **Convección natural Y forzada.** La convección natural es aquella que se da por el movimiento libre de fluidos como el aire y el agua en ambiente natural y no es causada por algún agente externo. La convección forzada se da cuando se aplica un estímulo externo al sistema por ejemplo un ventilador o un secador como se ilustra en la figura 1-6

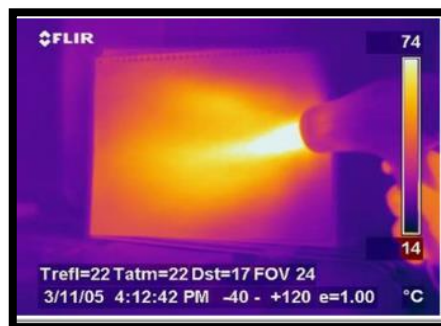


Figura 1-6 Ejemplo de convección forzada [28].

La transferencia de calor por convección y conducción en una capa de fluido se pueden relacionar a través del coeficiente o numero adimensional de Nusselt.

- **Número de Nusselt.** El número de Nusselt representa el mejoramiento de la transferencia de calor a través de una capa de fluido como resultado de la convección en relación con la conducción a través de la misma capa. En una capa de fluido de espesor  $L$  y diferencia de temperatura  $\Delta T = T_2 - T_1$ , la transferencia de calor a través de la capa de fluido será por convección cuando la capa tenga algún movimiento con  $\dot{q}_{\text{conv}} = h\Delta T$  y por conducción cuando la capa de fluido esté inmóvil con  $\dot{q}_{\text{cond}} = k\frac{\Delta T}{L}$ . Al dividir ambas ecuaciones se obtiene:

$$\frac{\dot{q}_{\text{conv}}}{\dot{q}_{\text{cond}}} = \frac{h\Delta T}{k\frac{\Delta T}{L}} = \frac{hL}{k} = \text{Nu} \quad \text{Ec.(1-12)}$$

Donde:

$h$ : Coeficiente de convección

$k$ : Conductividad térmica

Entre mayor sea el número de Nusselt, más eficaz es la convección [27].

Otros conceptos adicionales relevantes para caracterizar específicamente procesos de convección forzada son: La capa límite térmica, Número de Prandtl, Número de Reynolds, y la diferencia entre flujo laminar y turbulento.

- **Capa límite térmica.** Se desarrolla cuando un fluido a una temperatura específica fluye sobre una superficie que está a una temperatura diferente. Esta capa límite obedece a la región del flujo sobre la superficie en la cual la variación de la temperatura en la dirección normal a la superficie es significativa. Dado que la velocidad del fluido tendrá una fuerte influencia sobre el perfil de temperaturas, el desarrollo de la capa límite de la velocidad en la relación con la térmica tendrá un fuerte efecto sobre la transferencia de calor por convección [27].
- **Número de Prandtl.** La mejor manera de describir el espesor relativo de las capas límite de velocidad y la capa térmica es a través de Número de Prandtl, el cual es adimensional y está definido como:



$$Pr = \frac{\text{Difusividad molecular de la cantidad de movimiento}}{\text{Difusividad molecular del calor}} = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu C_p}{k} \quad \text{Ec.(1-13)}$$

Donde:

$\mu$ : Viscosidad dinámica

$C_p$ : Calor específico

$k$ : Conductividad térmica

- **Flujo laminar y turbulento.** Un flujo laminar es caracterizado por líneas suaves de corriente y un movimiento altamente ordenado; en el caso contrario es turbulento y se caracteriza por fluctuaciones en la velocidad y un movimiento altamente desordenado. Generalmente se tienen flujos laminares a bajas velocidades dependiendo de la viscosidad<sup>6</sup> del fluido [29]. Por ejemplo el flujo de los fluidos altamente viscosos, como los aceites a bajas velocidades, comúnmente es laminar. El flujo de fluidos de baja viscosidad, como el aire a altas velocidades, es turbulento.
- **Número de Reynolds.** La transición de flujo laminar a turbulento depende de la configuración geométrica de la superficie, de la aspereza superficial, de la velocidad del flujo, de la temperatura de la superficie y del tipo de fluido. El régimen de flujo depende principalmente de la razón de las fuerzas de inercia a las fuerzas viscosas en el fluido [29]. El número de Reynolds es una cantidad adimensional y se expresa para el flujo externo como:

$$Re = \frac{\text{Fuerzas de inercia}}{\text{Fuerzas viscosas}} = \frac{\rho V L_c}{\mu} \quad \text{Ec.(1-14)}$$

Donde:

$V$ : Es la velocidad corriente superior (equivalente a la velocidad de la corriente libre para una placa plana),

$L_c$ : Es la longitud característica de la configuración geométrica

$\mu$ : es la viscosidad dinámica del fluido.

---

<sup>6</sup> Resistencia interna del fluido al movimiento; capacidad de un líquido para fluir (depende de la temperatura)

A números de Reynolds bajos, el fluido se considera laminar ( $R_e < 5 \times 10^5$ ) y en el caso contrario turbulento ( $5 \times 10^5 < R_e < 10^7$ ).

**1.1.10.3 Transferencia de calor por radiación.** La transferencia de calor por radiación depende de las ondas electromagnéticas. A temperaturas de 20°C, casi toda la energía se transporta en ondas de infrarrojo, con longitudes de onda mayores que la luz visible. Al aumentar la temperatura, las longitudes de onda se desplazan hacia valores más cortos. A 800°C un cuerpo emite suficiente radiación visible como para verse “al rojo vivo”, aunque aún a esta temperatura la mayor parte de la energía se transporta en ondas de infrarrojo. A 3.000 ° C la radiación contiene suficiente luz visible para que el cuerpo se vea incandescente. En cualquier caso la emisión de radiación infrarroja de un material dependerá de su valor de emisividad. Cuando un objeto incrementa su temperatura su emisión infrarroja también aumenta junto con la intensidad de la radiación. Cuando esa radiación IR alcanza un cuerpo, puede absorberse, transmitirse o reflejarse dependiendo de la naturaleza del cuerpo.

- **La emisividad.** La emisividad es la capacidad que tiene un cuerpo para radiar energía infrarroja comparada con el cuerpo negro, sus valores están entre 0 y 1. Un emisor perfecto tendría un valor de 1 y un reflector perfecto un valor de 0. La emisividad suele ser mayor para superficies oscuras que claras. Una superficie de cobre lisa tiene un valor  $\varepsilon = 0.3$ , en una negra  $\varepsilon = 1$  [28]. El acabado superficial que tenga un material, también va a influir en el valor de la emisividad, si el acabado superficial es mejor, la emisividad es menor, lo mismo ocurre con el recubrimiento que presente el material. En la figura 1-7 se observa que entre más rugosa sea la superficie más alta es la emisividad, las superficies pulidas, brillantes y suaves tienen baja emisividad, las superficies sometidas a chorro de arena y/o superficies arañadas tiene alta emisividad.

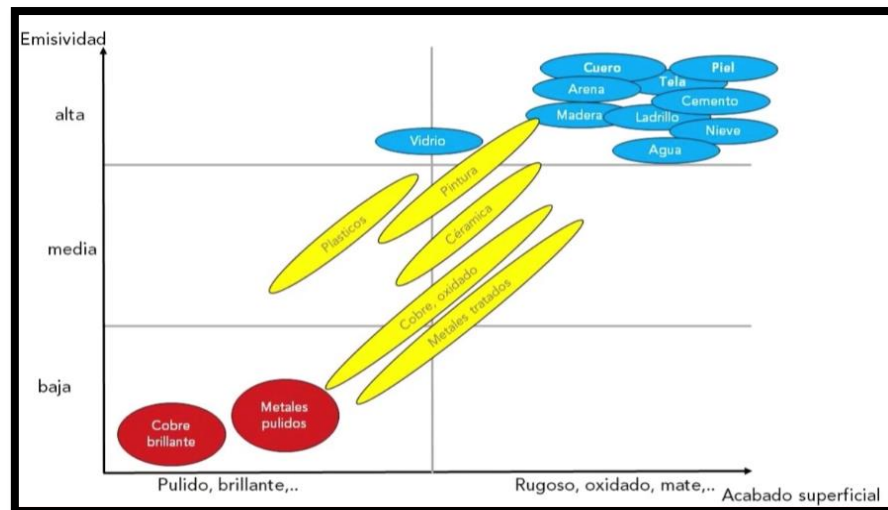


Figura 1-7 Emisividad según material [28].

La tabla 1-4 relaciona los valores de emisividad en los materiales de ingeniería más comunes.

Tabla 1- 4. Emisividades según material [30].

Material (Temperatura del material)	Emisividad	Material (Temperatura del material)	Emisividad
Acero laminado en frío	0.75-0.85	Hierro con costra de fundición	0.8
Acero oxidado	0.78	Hierro con costra de laminación	0.77
Acero superficie tratada térmicamente	0.52	Hierro de fundición oxidado	0.64
Algodón	0.77	Hierro Gris Pintado u oxidado	0.66
Aluminio laminado sin tratamiento	0.04	Hierro esmerilado	0.24
Aluminio muy pulido	0.09	Hormigón	0.93
Aluminio muy oxidado	0.2	Ladrillo	0.93
Aluminio no oxidado	0.02	Latón oxidado	0.61
Arcilla	0.91	Madera	0.94
Caucho blando gris	0.89	Mármol blanco	0.95
Cobre deslustrado	0.04	Papel	0.97
Cobre oxidado	0.76	Pintura azul sobre aluminio	0.78
Cobre laminado	0.64	Pintura blanca	0.95
Cobre pulido	0.03	Pintura de transformadores	0.95
Corcho	0.7	Pintura negra mate	0.97
Cristal	0.94	Poliestireno, Polietileno	0.95
Cromo	0.08	plomo	0.43
Goma dura	0.94	porcelana	0.92
Granito	0.45	PVC	0.92

- **Reflexión.** El mecanismo de reflexión de la radiación infrarroja es el mismo que para la luz visible. La reflexión sigue la norma “ángulo de entrada” = “ángulo de salida”. Es importante tener en cuenta que las superficies pueden no reflejar la luz visible y la radiación IR en la misma medida. El grado de reflexión depende de las características de la superficie reflectante.
- **Absorción.** La absorptividad ( $\alpha$ ) es otra de las propiedades importantes con respecto a la radiación térmica de una superficie, la cual es la fracción de la energía de radiación incidente sobre una superficie que es absorbida por esta. Al igual que la emisividad, su valor está definido en el intervalo  $0 \leq \alpha \leq 1$ . En general, tanto  $\varepsilon$  como  $\alpha$  de una superficie dependen de la temperatura [27]. El flujo de calor absorbido en un material se puede determinar por la relación:

$$\dot{Q}_{absorbida} = \alpha \dot{Q}_{incidente} \quad \text{Ec.(1-15)}$$

Esta relación describe la velocidad a la cual una superficie absorbe la radiación, para las superficies opacas la parte de la radiación incidente no absorbida por la superficie se refleja. La diferencia entre las velocidades de la radiación emitida por la superficie y la radiación absorbida por la misma es la transferencia neta de calor por radiación, si la velocidad de absorción de la radiación es mayor que la de emisión, se dice que la superficie está ganando energía por radiación; de lo contrario, se dice que la superficie está perdiendo energía por radiación [27].

La radiación IR pasa fácilmente a través de los gases, pero se detiene con líquidos y sólidos como vidrio, agua, madera, ladrillo y plástico (Ver figura 1-8).

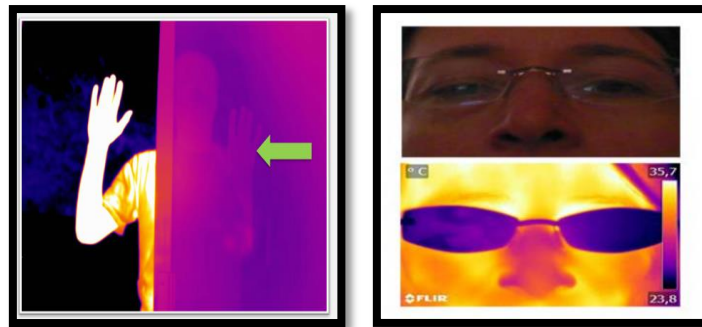


Figura 1-8. Absorción de IR [28].

- **Transmisión.** La radiación IR pasa fácilmente a través de los gases y la materia volátil, como aire, niebla, humo. (Parte superior de la figura 1-9). También pasa a través de algunos sólidos finos, por ejemplo una lámina de plástico, mas no a través de solidos gruesos y densos (Parte inferior de la figura 1-9). Algunos materiales son transparentes a la energía infrarroja y la cámara termográfica no recibe energía de objetos ubicados al otro lado de este material. Afortunadamente la mayoría de los materiales de ingeniería que se analizan para monitoreo de condición son opacos y no transparentes. Por ejemplo las ventanas estándar de vidrio son opacas a la radiación infrarroja y las cámaras infrarrojas no pueden ver a través del vidrio. Sin embargo, el vidrio transmite calor, como se ilustra en la parte izquierda de la figura 1-8, la ventana conduce el calor del interior al exterior y esta si puede ser detectada por termografía.

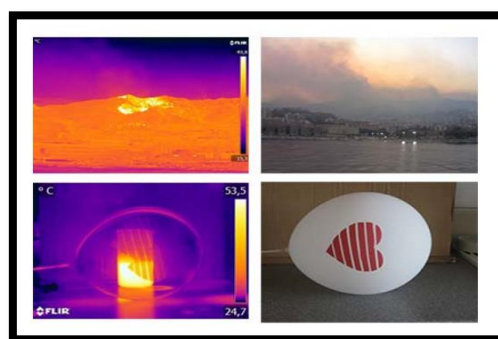


Figura 1-9. Transmisión de IR [28].

- **Relaciones matemáticas de la transferencia de calor por radiación.** La radiación suele considerarse como un fenómeno superficial para los sólidos que son opacos a la radiación térmica (como los metales), ya que las radiaciones emitidas por las regiones interiores de un material de ese tipo nunca pueden

llegar a la superficie, y la radiación incidente sobre esos cuerpos suele absorberse en unas cuantas micras hacia adentro de dichos sólidos [27]. La razón máxima se determina con la relación de Stefan Boltzman.

$$\dot{Q}_{emitida} = \varepsilon \sigma A_s T_s^4 \quad \text{Ec.(1- 16)}$$

Donde:

$\sigma$  = Constante de Stefan-Boltzman ( $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ )

$\varepsilon$  = Emisividad de la superficie ( $0 \leq \varepsilon \leq 1$ )

$A_s$ : Area Superficial

$T_s$ : Temperatura superficial

La razón de la radiación de energía desde una superficie es proporcional a su área A, y aumenta rápidamente con la temperatura. La razón también depende de la naturaleza de la superficie, esta dependencia se describe con la emisividad. El calor es transmitido por emisión y absorción, del elemento más caliente al elemento más frío. A diferencia de la conducción y la convección, la transferencia de energía por radiación no requiere la presencia de un medio. La transferencia de energía por radiación es la más rápida (a la velocidad de la luz) [27].

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{alred}^4) \quad \text{Ec.(1- 17)}$$

Donde:

$T_{alred}$ : Temperatura alrededor de la superficie

La radiación suele ser significativa con relación a la conducción o a la convección natural, pero despreciable con relación a la convección forzada. En la mayor parte de los casos, un gas entre dos superficies sólidas no interfiere con la radiación y actúa de manera efectiva como el vacío, por otra parte, los líquidos suelen ser fuertes absorbentes de radiación [27].

## 1.2 PRINCIPIOS DE TERMOGRAFÍA INFRARROJA

Es una técnica que permite medir y determinar a distancia, la distribución de temperaturas en un cuerpo a través de la detección y cuantización de radiación infrarroja que este emite. La termografía infrarroja se basa en la medición de la distribución de energía térmica radiante (calor) emitida desde una superficie objetivo y convertida a un mapa de diferencias de intensidad de radiación (superficie mapa de temperatura) o termograma. Por lo tanto, la termografía requiere una comprensión de calor, la temperatura y los diversos tipos de transferencia de calor.

La energía térmica está presente con el funcionamiento de todas las máquinas, por lo tanto la temperatura puede ser un parámetro clave para controlar el rendimiento, la condición de y el diagnóstico de problemas de maquinaria. IRT es una tecnología ideal para hacer esta monitorización de la temperatura, ya que proporciona imágenes térmicas completas de una máquina o un componente sin contacto físico, requiere poca configuración y proporciona los resultados en un período muy corto de tiempo. Es importante determinar qué es lo que realmente una cámara termográfica puede ver. Como se mencionó anteriormente los materiales radian energía infrarroja como una función de la temperatura y la emisividad, entonces la cámara ve emisiones de la superficie de los materiales.

El ensayo de termografía constituye una situación mucho más compleja de lo que se piensa. Esta complejidad tiene varias causas: la física misma de la medición, la complejidad del sistema observado, la existencia de transferencias de calor entre este sistema y el medioambiente que lo rodea y la existencia de otras posibles fuentes de calor diferentes al objeto inspeccionado [4]. Se puede decir que la medición termográfica es una sinergia entre los siguientes tres aspectos:

- El operador y el equipo de medición para realizar la termografía (Personal calificado y características metrológicas de la cámara).
- Constitución del sistema observado y del medioambiente circundante (Estructuras, materiales, propiedades mecánicas y diseño. Temperatura ambiente).
- Modelamiento térmico de los procesos de transferencia de calor (fuentes de calor, procesos de radiación, convección y conducción).

### 1.2.1 Tipos de termografía

Hay varios métodos de aplicación de la termografía infrarroja y depende de las necesidades y el alcance de la aplicación. Puede ser cuantitativa o cualitativa y activa o pasiva.

**1.2.1.1 Termografía comparativa cuantitativa.** La técnica cuantitativa requiere la determinación de un valor de temperatura para evaluar la gravedad de la condición de un componente. Este valor se determina mediante la comparación de la temperatura del objetivo con la de los equipos de servicio similar o datos de referencia. Para superficies de alta emisividad, tanto la temperatura  $T$  y la diferencia de temperatura  $\Delta T$ , los valores son generalmente fiables. Los valores de  $T$  y  $\Delta T$  de superficies de baja emisividad son a menudo poco fiables.

El método de termografía comparativa cuantitativa es un método eficaz para evaluar la condición de una máquina o componente mediante la determinación de temperaturas aproximadas. Es muy difícil determinar con precisión las temperaturas reales de un componente utilizando IRT en el campo. Esto se debe a la física de IRT que debe tener en cuenta los múltiples parámetros que permiten una verdadera medición de la temperatura absoluta. Estas consideraciones son: emisividad, reflectividad y transmisividad. Por ende las estimaciones de estas consideraciones se pueden realizar fácilmente para obtener temperatura aproximada de un componente, el cual en la mayoría de los casos, es más que suficiente para determinar la gravedad de una condición adversa.

La técnica de medición comparativa cuantitativa utiliza estimaciones rápidas de emisividad, mediciones de temperatura aparente reflejada y distancia. Los factores de emisividad de los materiales se obtienen a través de la experiencia y/o de la literatura. Una vez los valores de emisividad, las distancias y temperaturas aparentes reflejadas se calculan, estos valores se introducen en la cámara de IRT para hallar un valor de temperatura para cada componente. Es un método que proporciona información útil para determinar la severidad de la condición de un componente.

**1.2.1.2 Termografía comparativa cualitativa.** La medición comparativa cualitativa compara el patrón térmico o el perfil de un componente, con la de un componente idéntico o similar en las mismas condiciones de funcionamiento sin la asignación de valores de temperatura a los



patrones. Esta técnica es rápida y fácil de aplicar, y no requiere ningún ajuste de la cámara termográfica para compensar las condiciones atmosféricas, ambientales o emisividad de la superficie. Aunque el resultado de este tipo de medición puede identificar una deficiencia, no proporciona un nivel de gravedad.

**1.2.1.3 Consideraciones para las técnicas cualitativa y cuantitativa.** En la termografía cuantitativa la determinación de la temperatura de un objetivo utilizando IRT, puede ser difícil debido a los múltiples factores técnicos y ambientales involucrados. Como resultado de ello, las mediciones absolutas IRT se realizan solamente si los valores de temperaturas muy precisas o pequeñas diferencias de temperatura, son críticos para un proceso y/o investigación. Estas determinaciones son realizadas únicamente en condiciones muy controladas. La termografía cuantitativa no se utiliza normalmente para la monitorización de estado. Por otro lado la termografía cualitativa es la técnica más utilizada por la mayoría de las industrias; es muy eficaz en la identificación de los aspectos (hallazgos o anomalías) o puntos calientes en los aparatos eléctricos, las conexiones eléctricas calientes indeseables, fugas o equipos de intercambio de calor de fluido bloqueado y componentes (tubos), las fugas de líquido de recipientes a presión, tuberías y válvulas.

**1.2.1.4 Termografía Activa.** Es aquella donde se estimula la superficie del material con alguna fuente de calor, como lámparas halógenas, resistencias calefactoras, rayos UV, Corriente eléctrica o cualquier otro estímulo externo que eleve la temperatura del material u objeto bajo análisis. Se usa cuando el elemento no produce calor por si mismo, está en reposo o hace parte de un mecanismo sin transferencia de calor asociado.

**1.2.1.5 Termografía Pasiva.** En este caso la radiación sensada por la cámara, es producida o emitida por el objeto bajo inspección sin necesidad de un estímulo externo. Esta radiación generalmente es producto de un proceso de transferencia de calor (Conducción, convección o radiación), producido por rozamiento mecánico, movimiento mecánico continuo, fluidos en movimiento, corriente eléctrica, o cualquier proceso mecánico o eléctrico presente en componente analizado.

**1.2.1.6 Consideraciones para las técnicas pasiva y activa.** La elección de la técnica depende de la aplicación, del alcance de la inspección y de los resultados que se quieren

obtener, así como la precisión requerida. La termografía pasiva tiene aplicación mayormente para el monitoreo de condición de procesos mecánicos, metalúrgicos, eléctricos, construcciones civiles y para diagnóstico médico. Por otro lado la termografía activa tiene mayor aplicación en la caracterización y determinación de espesores de materiales. También se usa para el análisis de defectos superficiales y subsuperficiales como delaminación, grietas y poros, así como la cuantización precisa de datos.

### **1.2.2 Inspecciones directas e indirectas**

La medida directa se realiza cuando no hay aislamiento térmico entre el punto caliente y la IRT o este es muy pequeño. La medida Indirecta se presenta cuando hay significativo aislamiento térmico entre la IRT y el punto caliente.

### **1.2.3 Monitoreo de condición con termografía**

El monitoreo continuo o a intervalos periódicos de la condición y/o estado de una maquinaria, es el objetivo central del mantenimiento preventivo y predictivo, el cual facilita la temprana detección de costosas fallas y permite identificar prioridades de mantenimiento.

**1.2.3.1 Monitoreo de sistemas mecánicos.** Todos los sistemas mecánicos generan energía térmica durante su operación normal, lo que le permite inspeccionarlos a través de la termografía y evaluarlos en condiciones normales de operación. Uno de los más grandes problemas en sistemas mecánicos es la temperatura excesiva, que puede ser generada por fricción, vibraciones, fallas en la refrigeración o bloqueos. Una excesiva cantidad de fricción puede ser causada por desgaste, desalineamiento y falta o exceso de lubricación.

La mayoría de los equipos y los procesos son diseñados para eliminar energía térmica bajo operación normal, la simple identificación de un patrón térmico no implica que el problema haya sido localizado. Una vez que un patrón térmico es obtenido y analizado, una desviación de este patrón puede ser indicativo de un problema en el sistema o proceso. La siguiente tabla resume el proceso y condiciones de sistemas mecánicos que se pueden analizar con termografía infrarroja.

Tabla 1-5 Condiciones detectables en sistemas mecánicos usando termografía infrarroja [8].

APLICACIÓN	CONDICIONES DETECTADAS
Conversores, almohadillas, acopladores, engranajes, correas de transmisión de potencia, ejes de poleas.	Sobrecalentamiento de rodamientos y rodillos, ejes desalineados, fallas de lubricación en poleas y acoplamientos por presión irregular.
Motores.	Sobrecalentamiento de devanados de bobinas y rodamientos, amortiguadores, rotores, bloqueos en líneas de refrigeración, fricción, problemas de contacto en escobillas, rotores.
Bombas, compresores, ventiladores.	Sobrecalentamiento de rodamientos, altas descargas de temperaturas en compresores, altas temperaturas de aceites, válvulas rotas o defectuosas
Equipo pesado, llantas, hidráulicos.	Sobrecalentamiento de frenos, Rodamientos defectuosos, correas, bloqueos de hidráulicos
Accionamientos mecánicos, turbinas, ductos de expulsión	Altas temperaturas de los lubricantes, alta temperaturas de rodamientos, bloqueos de válvulas de drenaje, bloqueos en trampas de gas, fallas en el control de válvulas, distribuciones desiguales de temperaturas en metales, goteras en sellos, prevención de fuego en turbinas, cámara de combustión y tuberías por sobrecalentamiento
Hornos	Perdidas de aislamientos y fugas de gas

- Limitaciones del monitoreo mecánico.** En las aplicaciones mecánicas, la termografía es más útil para localizar el área de un problema que para indicar la causa del sobrecalentamiento. La mayoría de las veces el sobrecalentamiento es producido por un componente que no es visible directamente a la cámara, este calor a veces es conducido o transferido por los materiales hacia la superficie generando un patrón térmico y es allí cuando la cámara térmica puede sensorarlo. Además no hay criterios de aceptación y rechazo mecánicos bajo inspección por IRT claramente definidos por organizaciones internacionales.

**1.2.3.2 Monitoreo de sistemas eléctricos.** La transferencia de calor por conducción que se produce por la corriente fluyendo a través de alambres y componentes eléctricos, generan patrones de radiación característicos que hacen de estos materiales excelentes candidatos para inspección con termografía infrarroja. Por ejemplo si una de las cargas de un sistema presenta una carga mayor que las otras (ver figura 1-10), esta presentará una temperatura más alta, con un característico patrón de radiación. El calor adicional se genera en el punto donde hay mayor resistencia y fluye por conducción al punto más frío del cable generando un

gradiente de temperatura. Los incrementos de temperatura en sistemas aislados son indicadores de problemas graves en algunos casos.

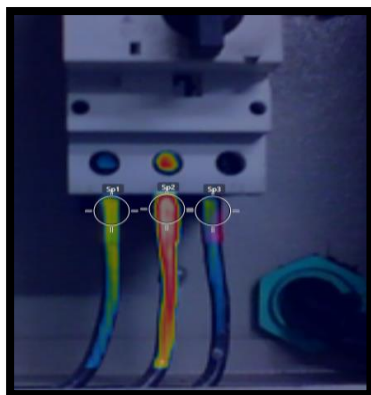


Figura 1-10 Patrón de radiación de cargas desbalanceadas.

#### 1.2.4 Criterios de evaluación de la gravedad de la temperatura

Al aplicar IRT para la monitorización de estado y diagnóstico de máquinas y sus componentes relacionados, se recomienda que se establezcan criterios de evaluación de la gravedad de anomalías en la temperatura.

**1.2.4.1 Criterios de diferencia de temperatura.** Las temperaturas de referencia y los criterios de evaluación deben basarse en las temperaturas históricas o estadísticamente derivadas de máquinas o grupos de máquinas, cuando están en la condición "ideal" de funcionamiento. Los criterios de evaluación deben basarse en las temperaturas establecidas por los fabricantes, de elementos o grupos de equipos o de componentes similares. Se debe entender que estos criterios no deben aplicarse universalmente a tipos de máquinas similares debido a las variaciones locales en la aplicación, proceso, el medio ambiente, ciclo de trabajo, etc.

**1.2.4.2 Criterios de temperatura máxima permitida.** Se pueden utilizar criterios de temperatura máxima absoluta admisible, con base en los datos publicados para identificar anomalías del sistema mecánico. Hay dos categorías de criterios, los de material y los de diseño. Los criterios materiales se utilizan cuando la integridad del propio material es de especial preocupación y es el foco de la supervisión. Los criterios de diseño se utilizan cuando la integridad del diseño es la principal preocupación y es el foco de la supervisión.

Deben ser utilizados porque normalmente incorporan el rendimiento, funcionamiento, fiabilidad, capacidad y la firmeza del material.

**1.2.4.3 Criterios de aceptación eléctricos.** La norma ISO 18434-1 establece criterios de aceptación y rechazo en sistemas eléctricos. La tabla 1-6 es usada para establecer la escala de prioridad de la situación de riesgo basada en el delta de temperatura ( $\Delta T$ ) encontrado en un sistema.

Tabla 1- 6. Criterios de aceptación eléctricos [49].

Para efectos de clasificación de fallas se manejan los siguientes criterios, teniendo en cuenta los criterios de la NETA, * O/S: Temperatura Over Similar – O/A: Temperatura Over/Ambient		
DIFERENCIAL DE TEMPERATURA	CLASIFICACIÓN	CONDICIÓN
1°C – 10°C O/A ó < 3°C O/S	En buen estado	BUENO
11°C–20°C O/A y 3°C a 15°C O/S	Probable deficiencia	ACEPTABLE
21°C–40°C O/A y >15°C O/S	Deficiencia	INSATISFACTORIA
>40°C O/A y >15°C O/S	Deficiencia mayor	PELIGROSA

### 1.2.5 Aspectos importantes para toma de termogramas

Hay ciertos aspectos técnicos básicos que se deben entender y manejar para la toma adecuada, precisa y eficaz de termogramas para su posterior análisis.

**1.2.5.1 Resolución térmica.** Un mayor número de píxeles permitirá distinguir detalles más pequeños. A una resolución más alta, mayor capacidad para ver objetivos a distancias más largas, una mejor precisión de medición de objetivos pequeños y por lo tanto se podrá encontrar más problemas, mejorar el diagnóstico con un mejor detalle de la imagen y detectar problemas que de otro modo que no pasarían desapercibidos [28] como se observa en la figura 1-11.

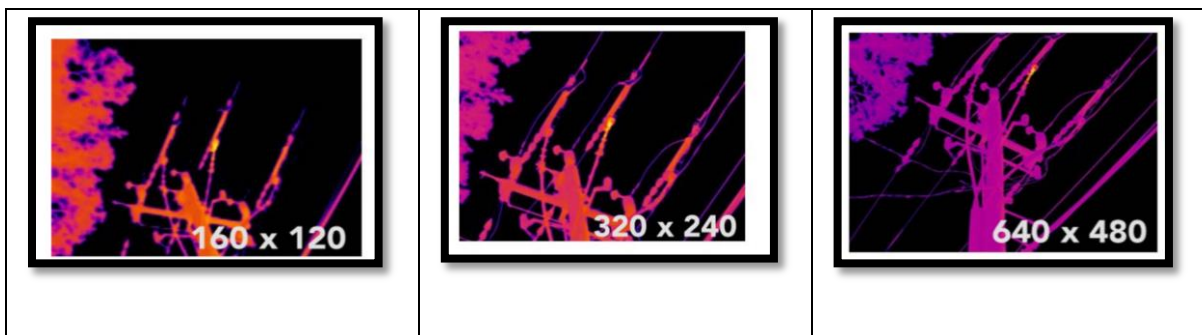


Figura 1-11 Resolución térmica [28].

**1.2.5.2 Selección de la paleta de color.** Las paletas de colores proveen un color superpuesto sobre la imagen real correspondiente a isotermas y gradientes de temperatura, que ayuda a discernir los niveles de variación de esta [28]. Las paletas disponibles más comunes en la termografía infrarroja son: Hierro (iron), arcoíris (rainbow) y escala de grises (gray) ver figura 1-12. Las mediciones de temperatura son las mismas independientemente de la paleta que se escoja.

- **Paleta Hierro.** Es la más popular por la buena relación entre la definición espacial (capacidad para reconocer los objetos en la escena) y la sensibilidad termal (capacidad para discriminar entre temperaturas).
- **Paleta Arcoíris.** Provee mejor definición y sensibilidad termal que otras paletas a expensas de los detalles y definición espacial de los elementos, por lo tanto no es fácil reconocer lo que se está viendo o encontrar pequeños detalles. Así mismo es más difícil enfocar correctamente por las mismas razones.
- **Paleta Escalas de grises.** Gris es una gran paleta para observar detalles espaciales en la imagen y se hace mucho más fácil reconocer objetos, aunque no es llamativa estéticamente desde el punto de vista de la imagen.

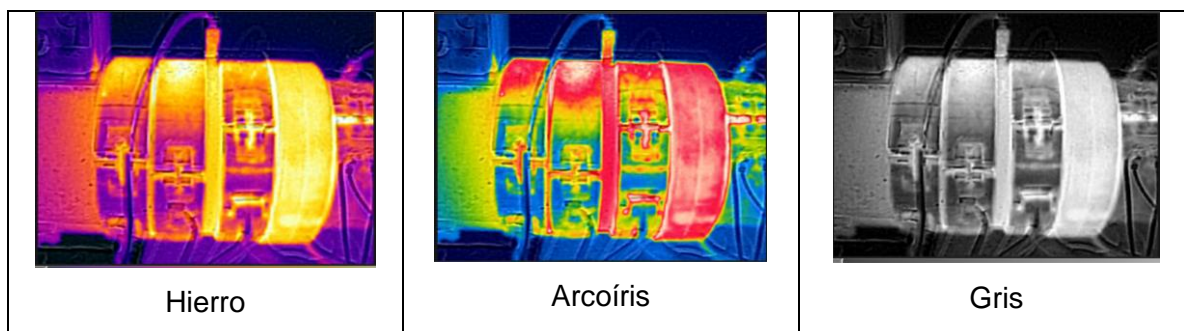


Figura 1-12. Paletas de colores.

**1.2.5.3 Enfoque.** Como cualquier cámara una infrarroja debe ser enfocada para obtener buenos resultados ya que imágenes fuera de foco proveen medidas incorrectas. En la figura 1-13 se ilustra cómo afecta la temperatura un enfoque incorrecto (diferencia de 5 °C), esto debe hacerse al momento de la medición ya que una vez tomado el termograma no es posible cambiar el enfoque [28].

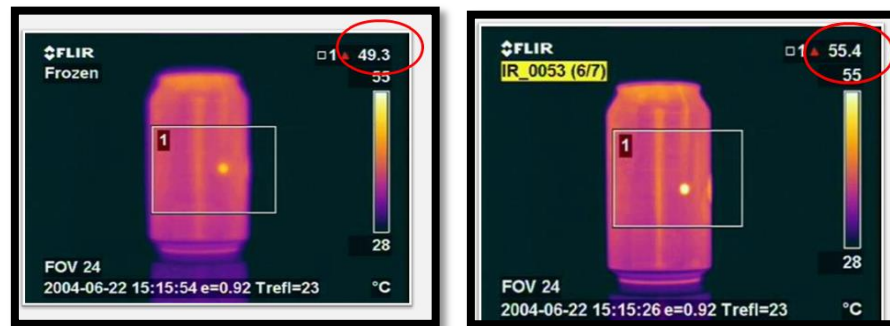


Figura 1-13 Influencia del enfoque en la medición de la temperatura [8].

**1.2.5.4 Nivel e intervalo.** El rango de temperatura define las medidas mínimas y máximas que se pueden tomar con la cámara IR (hay cámaras de distintos rangos), el objeto a medir debe estar dentro del rango de temperatura de la cámara. El intervalo es una parte o franja dentro del rango de temperatura, que puede ser ajustado con la cámara o con el software y define el contraste térmico de la imagen (ver. figura 1-14). El nivel es el punto medio del intervalo y define el brillo de la imagen [28]. A este proceso de modificar el intervalo y el nivel se le llama sintonización, sin la apropiada sintonización térmica, algunas anomalías o discontinuidades pueden ser no observables en el termograma.

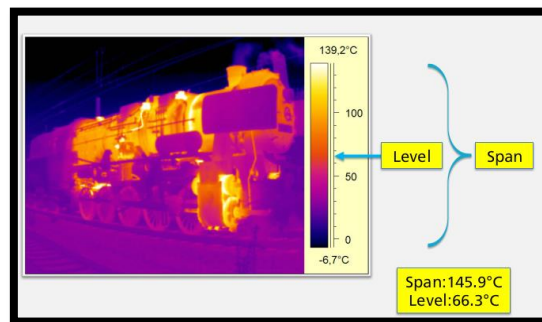


Figura 1-14. Sintonización (Thermal Tuning) [8].

**1.2.5.5 Temperatura de medición.** La cámara recibe radiación que se produce directamente desde el objeto inspeccionado e indirectamente por reflejos desde las fuentes circundantes a él. Sólo la radiación emitida por el propio objeto ( $W_\epsilon$ ) está relacionada con la temperatura de la superficie del cuerpo (ver figura 1-15) y la radiación reflejada se denomina temperatura aparente reflejada ( $T_{Refl}$  o  $W_p$ ) [28].

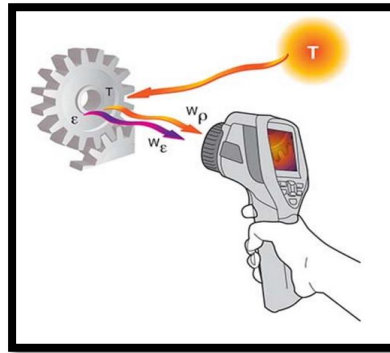


Figura 1-15. Situación de medición [8].

- **Temperatura Aparente Reflejada (RAT).** Una temperatura aparente es la temperatura no compensada leída por una cámara de los objetos alrededor que reflejan sobre el punto a evaluar. La temperatura no compensada comprende las emisiones desde el objeto más la temperatura reflejada del alrededor y es importante tenerla en cuenta al momento de tomar termogramas, puesto que pueden dar medidas incorrectas generalmente mayores a las reales [28]. Como la cámara ve la energía que es reflejada por objetos circundantes como la emitida por el objeto bajo inspección, se debe diferenciar cual es cual y compensar apropiadamente. La temperatura aparente reflejada es un parámetro importante para usar en conjunto con la emisividad, son parámetros necesarios para realizar mediciones correctas.
- **Emisividad en la medición de temperatura.** Materiales con altos valores de emisividad son fáciles de interpretar y medir es decir se puede confiar en lo que se ve, por otro lado, materiales con bajos valores de emisividad reflejan bastante de la radiación de los alrededores y generalmente no permiten diagnósticos realistas, es decir no se puede confiar en el termograma obtenido. Esto se explica mejor con el siguiente ejemplo: en el sistema de la figura 1-16 hay tres diferentes superficies: el acero, la cinta plástica negra y el papel con el código de barras, son tres materiales distintos a la misma temperatura.



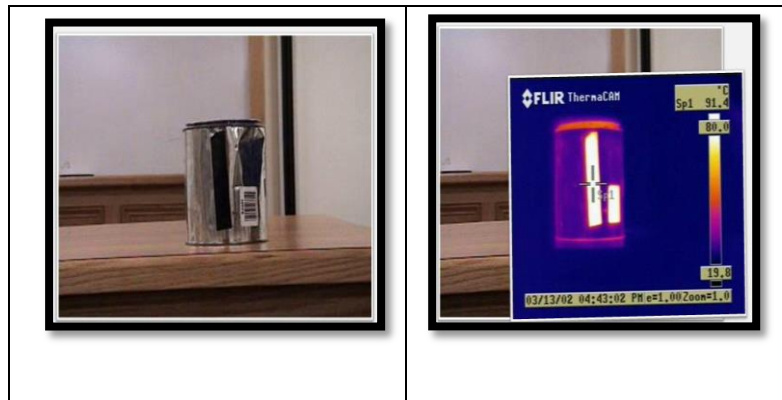


Figura 1- 16. Emisividad de un sistema [28].

Al examinar con la cámara termográfica hay una gran diferencia entre la temperatura de la cinta y la etiqueta de papel respecto a la del acero, esto se debe a la baja emisividad del acero pulido comparada con la alta emisividad de la cinta aislante y la etiqueta de papel. Esto puede causar problemas de interpretación y de medición si no se está familiarizado con la emisividad de los diferentes materiales [28]. Los valores de emisividad según el material se clasifican de la siguiente manera:

- Baja: Metales no recubiertos ni pulidos con emisividad debajo de 0.5.
- Media: Metales oxidados y corroídos con emisividad de 0.5 a 0.85.
- Alta: Materiales no metálicos con emisividad de 0,85, materiales cerámicos y cintas aislantes y cintas eléctricas a 0.95.
- Si la emisividad es baja  $< 0.5$ . No se debe intentar la medida a menos que encuentre un alto punto de emisividad como una cavidad.
- Si la emisividad es media (0.5 a 0.85), se debe tratar de aplicar revestimientos como pinturas o cintas en la medida de lo posible.
- Si la emisividad es alta  $> 0.85$ , Se puede confiar en lo que se observa.

**1.2.5.6 Efectos de la distancia y el tamaño.** Con las cámaras infrarrojas se pueden ver lugares calientes a largas distancias pero no siempre se puede medir su temperatura con precisión, es necesario acercarse lo suficiente al objeto o punto a medir. Las cámaras infrarrojas tienen características ópticas similares a otros dispositivos ópticos como cámaras fotográficas, videograbadoras y telescopios [28].

**1.2.5.7 Campo de visión (FOV).** Se define como el área de visión que abarca la cámara definida por un ángulo sólido. El campo angular de visión de la cámara E5 usada en este trabajo de grado es de  $45^\circ$  x  $34^\circ$  horizontales y verticales respectivamente (Ver figura 1-17). El campo de visión depende de la distancia de la cámara al objeto o la escena tal cual como en las cámaras digitales.

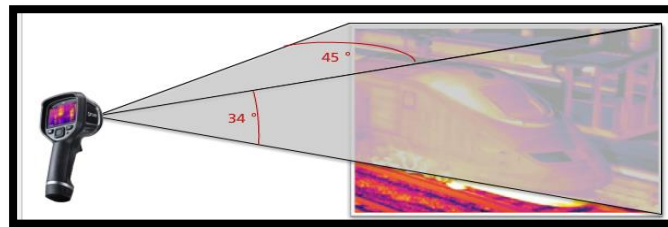


Figura 1-17 Campo de visión [28].

Una imagen está compuesta por miles de píxeles, si se amplifica una imagen, cada píxel se vuelve más distintivo y la imagen pareciera ser más clara. Pero se debe tener en cuenta que un zoom no mejora la habilidad de ver pequeños detalles [28].

## **2. PROCESO DE EXTRUSIÓN DE TUBERÍA DE PVC**

### **2.1 PVC**

El PVC (Policloruro de vinilo) es un polímero con una combinación química de carbono, hidrógeno y cloro. Es un material termoplástico, lo que significa que bajo la acción del calor se reblandece, (Comienza a reblandecer alrededor de los 80°C y se descompone sobre los 150°C) puede así moldearse fácilmente repetidas veces ya que al enfriarse recupera la consistencia inicial y conserva la nueva forma [31]. Es una resina sintética que tiene aspecto de polvo blanco algo fino que se mezcla con ciertos aditivos plastificantes que permiten convertir el material en productos rígidos o flexibles según la ponderación de la composición química y las propiedades mecánicas requeridas en función final del producto [32]. Es reciclable, lo que hace que pueda mezclarse parte de este material reciclado con material virgen para ser aprovechado nuevamente en un proceso. Es la materia prima principal para la fabricación de tubería usada en construcciones civiles.

#### **2.1.1 Propiedades del PVC**

Dentro de las propiedades químicas del PVC resaltan la resistencia a humos y líquidos corrosivos; soluciones ácidas, salinas; solventes y productos químicos. Tiene buena estabilidad dimensional sólo arde en presencia de fuego, si se retira el fuego no sostiene la llama. Posee una alta resistencia al impacto, buena rigidez es dúctil y tenaz. Las propiedades del PVC varían según los aditivos que se agreguen y el peso molecular tiene influencia directa sobre las propiedades mecánicas [31]. El material usado en la Empresa Tuboplex para la fabricación de toda su tubería es: Compuesto de PVC rígido, Tipo II, Grado I tal como lo define la norma NTC 369<sup>7</sup>

### **2.2 EXTRUSIÓN DE PVC**

La extrusora es en una máquina que bombea el PVC en estado sólido a través de un molde con la forma deseada generalmente con una sección con forma regular. El PVC es alimentado a través de una tolva y posteriormente transportada a lo largo de dos tornillos

---

<sup>7</sup> Norma Técnica Colombiana 369: Plásticos. compuestos de policloruro de vinilo rígidos y compuestos de policloruro de vinilo clorado (CPVC).

cónicos helicoidales de acero donde lentamente resulta mezclada, fundida, compactada y homogeneizada para finalmente ser dosificada a través de una boquilla conformadora, que proporciona de manera continua el perfil deseado en el producto final. Ver figuras 2-1 y 2-2.

### 2.2.1 Mezclado

El proceso inicia con la combinación del polímero de PVC con los aditivos y plastificantes, según las características de calidad del tubo y su aplicación (liviano para paredes, semipesado o pesado para edificaciones robustas y placas estructurales). El PVC ingresado a la tolva puede ser pulverizado (reciclado), molido o en forma de resina, según las características deseadas o estipuladas bajo estándares Internacionales como ASTM o normas nacionales como las NTC.

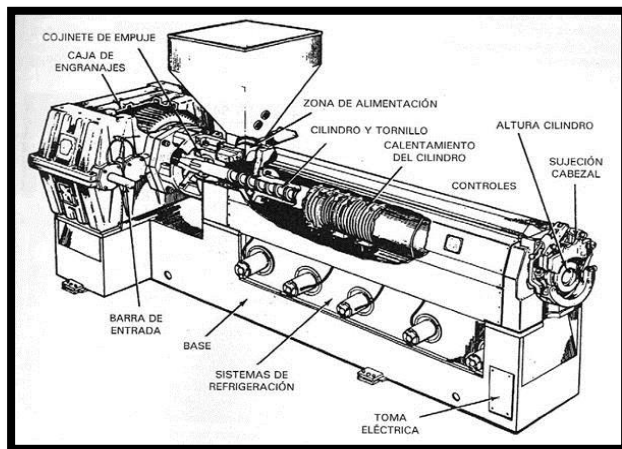


Figura 2-1 Extrusora, con indicación de sus elementos [33].

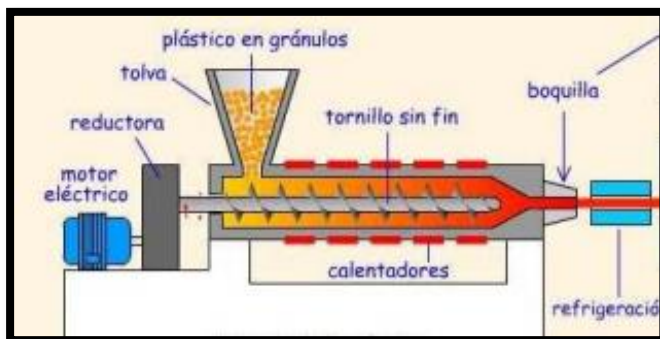


Figura 2-2 Sección transversal de una extrusora [33].

### 2.2.2 Tolva de alimentación

Este elemento alimenta el PVC en estado granular a la extrusora, generalmente es alimentado por una bomba desde un reservorio como se ilustra en la figura 2-3. Una vez el PVC es alimentado otra bomba se encarga de empujarlo hacia el barril. La tolva debe tener un volumen acorde a la capacidad de producción de la extrusora para asegurar su alimentación continua. Es importante que la tolva este sometida a vibración para evitar la acumulación de sedimentos en sus paredes.



Figura 2-3. Tolva línea 1 de extrusión de la Empresa Tuboplex.

### 2.2.3 Tornillo de extrusión

El tornillo de extrusión es el elemento principal de la extrusora, tiene como función transportar, calentar y comprimir el fluido de PVC. Es de forma cónica helicoidal y cuenta con distintas etapas no homogéneas entre sí. Hay extrusoras de un solo tornillo y otras de dos tornillos o tornillos gemelos. La extrusora de un solo tornillo posee deficiencias para extruir polímeros sensibles al calor como el PVC, por tal razón la extrusión de PVC como perfiles y tubería, se realizan únicamente en extrusoras de doble tornillo [32].



Figura 2-4 Tornillos de extrusión [32].

### 2.2.4 Barril de extrusión

Es un cilindro metálico que se encarga de alojar los tornillos de extrusión. Generalmente es construido con una aleación de acero similar a la de los tornillos. El conjunto Tornillo-Barril conforma la cámara de fusión y bombeo de la extrusora. Tiene etapas de refrigeración para controlar su temperatura y tiene una zona de desgasificación para extraer la humedad y gases del PVC antes de entrar a la etapa final de compresión [32]. El barril posee una manguera de bronce, por la cual circula el aceite o agua a bajas temperaturas, con el fin de lograr el enfriamiento de barril de ser necesario.

En los cilindros de extrusión se busca máxima durabilidad, alta transferencia de calor y bajo cambio dimensional con la temperatura. Para extruir materiales como el PVC que se descompone fácilmente al contacto con el acero caliente, generalmente los cilindros y tornillos están fabricados con aleaciones de acero con alto contenido en níquel y molibdeno.

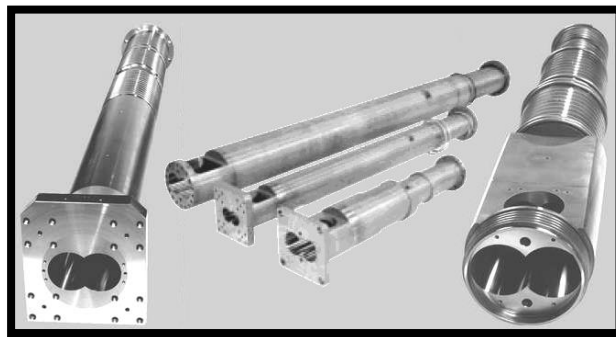


Figura 2-5 Barril de extrusora [32].

### 2.2.5 Resistencias calefactoras

El calentamiento de las capas medias y superficiales del cilindro se realiza a través de bandas o resistencias calefactoras, cuyos valores de potencia de se determinan según la temperatura deseada en cada zona de fusión y compresión del barril. El sistema de calentamiento con resistencias eléctricas suministra entre un 20-30% del calor necesario para fundir la resina, el calor restante se produce por el esfuerzo de corte y la fricción en los tornillos y el cilindro, debidos a las capas del flujo de PVC fundido que circulan adentro del barril [34].

La resistencia en su interior posee un circuito resistivo hecho de espirales de alambre de aleaciones del cobre con otros metales, el cual realiza calentamiento a través de

transferencia de calor por conducción. Están protegidas con una armadura en acero inoxidable que las protege contra los choques externos y el ambiente. Las resistencias envuelven completamente el diámetro de la superficie del cilindro que contiene el fluido de PVC y son colocadas en contacto directo con la superficie [35].

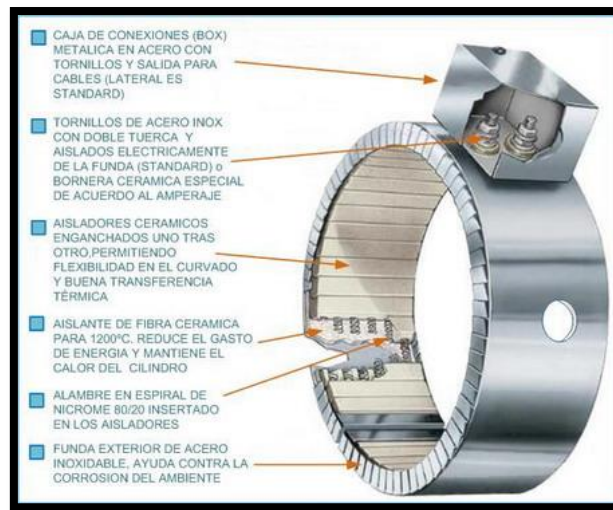


Figura 2-6 Estructura de las resistencias calefactoras [35].

Este tipo de resistencia calefactora se fabrica a medida con diferentes acabados, modelos de sujeción y cajas de protección. Las temperaturas van desde van desde 60°C hasta 520°C. La resistencia interior es una cinta bobinada y aislada con mica para altas temperaturas (700°C) [36]. Las medidas Standard van desde 50 a 460 mm de diámetro y desde 50 a 420 mm de ancho dependiendo de la conexión.

Los voltajes en que fabrican las resistencias son: 24, 42, 48,110, 220,240, 380 y 440 V AC. La Potencia de las resistencias, dependen de las dimensiones y el voltaje de trabajo con un máximo de 4,5 Watt por cm<sup>2</sup> y valores nominales totales de 200 Watts a 5Kw. Se fabrican para conexiones Monofásicas o Trifásicas. Poseen termocuplas para medir y controlar la temperatura sobre la superficie del barril [36].

## 2.2.6 Conjunto barril, tornillo y resistencia

La sección del tornillo, barril y resistencias calefactoras, tiene cuatro funciones principales que son, mezclar, calentar, fundir y presurizar la resina de PVC. El proceso completo se divide en tres etapas: Etapa de alimentación, etapa de compresión y etapa de dosificación

[37]. En la etapa de alimentación inicia el proceso de calentamiento del PVC a través de las resistencias, recibiendo los gránulos desde la tolva y transportándolos con el tornillo a través de la cámara del barril hacia la siguiente etapa que es la de compresión.

En la etapa de compresión se va estrechando la cámara interna del barril para forzar a salir los gases, aumentar la presión y fundir los gránulos de PVC [32], así mismo transporta el PVC fundido hacia la etapa de dosificación. En esta última etapa la masa de plástico fundido alcanza la consistencia y presión requerida para la extrusión. Es importante controlar la temperatura de los tornillos para que el material fluya correctamente y evitar que las capas límite, la capa térmica y la fuerza de fricción (esta aumenta con la temperatura) sobre los tornillos, genere adherencia del material a las superficies. En esta zona se requiere una presión alta que se obtiene creando restricciones de flujo con dispositivos físicos.

De la etapa de dosificación debe salir el PVC con la consistencia correcta. Esta masa debe ser bombeada hacia el siguiente componente de la extrusora a una presión constante [34]. Al final de la etapa de dosificación es común tener un filtro que asegure que el flujo que sale sea un flujo laminar, este filtro generalmente es un disco con perforaciones que adicionalmente aumenta la presión y detiene impurezas.

En este conjunto se requiere un control de la cantidad de calor que se aplica, ya que si el material se calienta demasiado se puede degradar o hacerse poco viscoso. Por otro lado, si el material se enfría demasiado, la plastificación será insuficiente. Las variaciones en temperatura producen variaciones en flujo de salida [37]. Estas variaciones de temperatura a lo largo conjunto afectan directamente la viscosidad del material fundido, y por lo tanto se tendrán variaciones de flujo de material a la entrada del cabezal, reflejando inconsistencia en la salida del proceso. Normalmente se tiene de dos a seis zonas de calentamiento a lo largo del barril y el cabezal; es necesario tener una medición confiable de temperatura por parte de los equipos de medición. En resumen las variaciones de temperatura en un extrusor afectan los siguientes aspectos:

- Variación de viscosidad en el material fundido de PVC.
- Variación en el flujo de material a la salida del extrusor.
- Variación de presión en el extrusor.



- Calidad en la tubería producto de la extrusión.

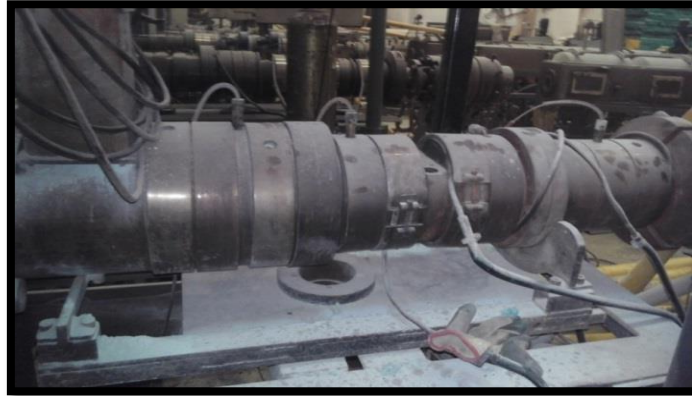


Figura 2-7. Conjunto Barril- resistencias línea 1 Empresa Tuboplex.

### 2.2.7 Motor principal

El motor de la extrusora es el encargado de suministrar la energía necesaria para transportar la resina de PVC a través del barril y el cabezal. Los motores de las líneas de extrusión son eléctricos y operan con voltajes de 220 y 440 V.

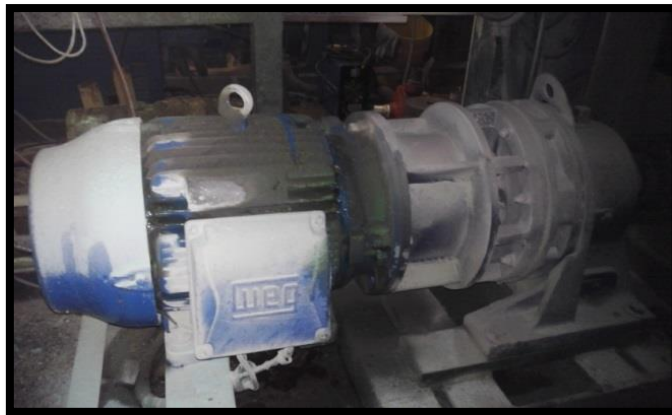


Figura 2-8. Motor principal de la extrusora línea 1 Empresa Tuboplex.

### 2.2.8 Cabezal

Está unido al barril por medio de un adaptador y es el componente encargado de la conformación física y geométrica final del tubo. El cabezal de extrusión suele presentar en el acople entre el barril y el cabezal, un elemento que contribuye a transformar flujos

turbulentos en laminares, denominado torpedo por el aspecto de su geometría y está sujeto por otro componente llamado araña. El cabezal se ilustra en la figura 2-9.

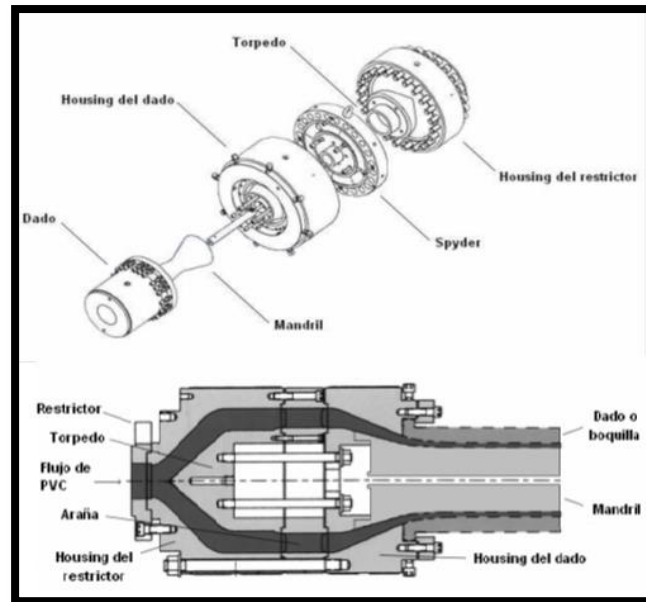


Figura 2-9. Partes del cabezal de una extrusora [32].

**2.2.8.1 Mandril.** Elemento del cabezal que tiene la importante función de dar el diámetro interno a la tubería.

**2.2.8.2 Dado o boquilla.** La boquilla de extrusión es el componente del cabezal encargado de la conformación geométrica final de la resina de PVC, la cual debe fluir con volumen y velocidad uniforme, alrededor de toda la circunferencia de la boquilla, con el fin de lograr espesores uniformes en el tubo.

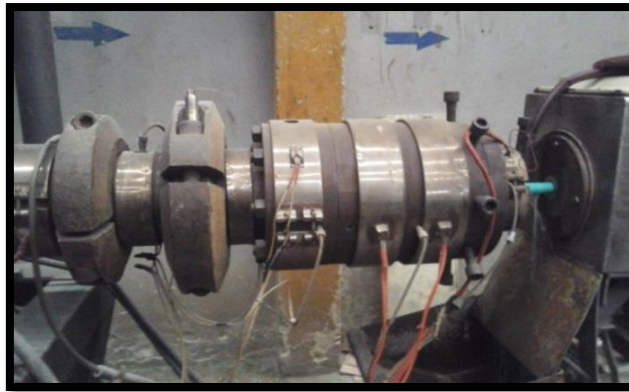


Figura 2-10. Adaptador y cabezal línea 1 de extrusión Empresa Tuboplex.

### 2.2.9 Tina de enfriamiento

La tina con agua se utiliza para refrigerar el tubo por convección forzada con el objeto de solidificar la tubería. Consiste en una cámara cuyo interior está lleno de agua a una temperatura controlada de 15°C, el tubo se transporta a lo largo de la tina y está posee una boquilla adicional, para ayudar a mantener los diámetros de la tubería.



Figura 2- 11. Tina de enfriamiento línea 1 de extrusión Empresa Tuboplex

### 2.2.10 Halado, marcación y corte

Después de la tina el tubo es halado por un mecanismo con rodamientos que mantiene una velocidad uniforme articulada con la velocidad de salida de la extrusora, con el fin de mantener las características mecánicas de la tubería (ver figura 2-12a). Posteriormente el tubo es marcado por distintos métodos de impresión de tinta o a través de láser. Finalmente el tubo es cortado por una sierra automatizada. (Ver figura 2-12b)

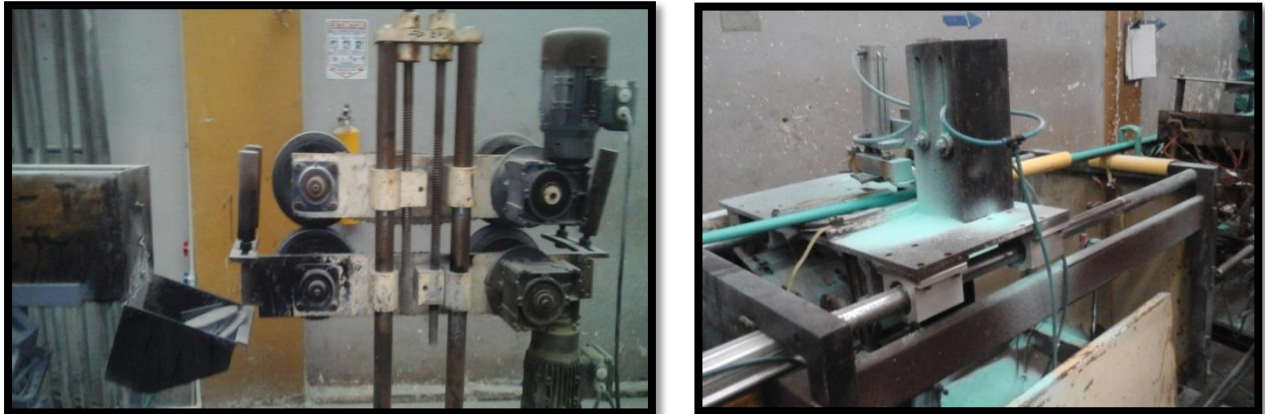


Figura 2-12 a) Halador; b) Sierra cortadora

### 2.2.11 Acampanador

Es la última etapa en la línea de extrusión de tubería Conduit. Se encarga de fabricar la unión en uno de los extremos. Esta unión es de un diámetro superior al del tubo y tiene forma de campana; es una característica específica de la tubería Conduit.



Figura 2-13. Acampanador línea 1 de extrusión Empresa Tuboplex.

### 2.2.12 Control Automatizado

Todas las etapas de extrusión son controladas por automatismos eléctricos y PLC's<sup>8</sup> (Temperaturas de las resistencias, variadores de velocidad, voltajes, sensores y actuadores). La parte eléctrica se concentra en el RAC eléctrico que se muestra la figura 2-14:

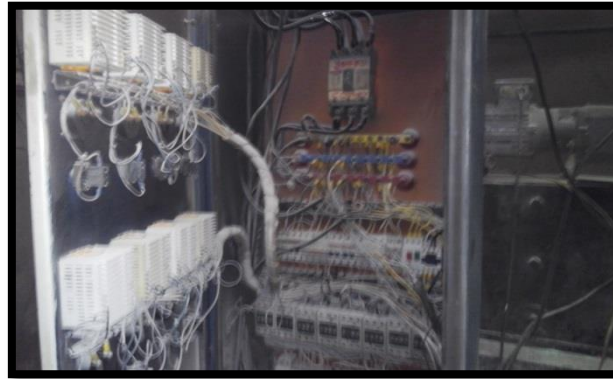


Figura 2- 14. RAC eléctrico línea 1 de extrusión Empresa Tuboplex

### 2.2.13 Diagrama de bloques proceso de extrusión

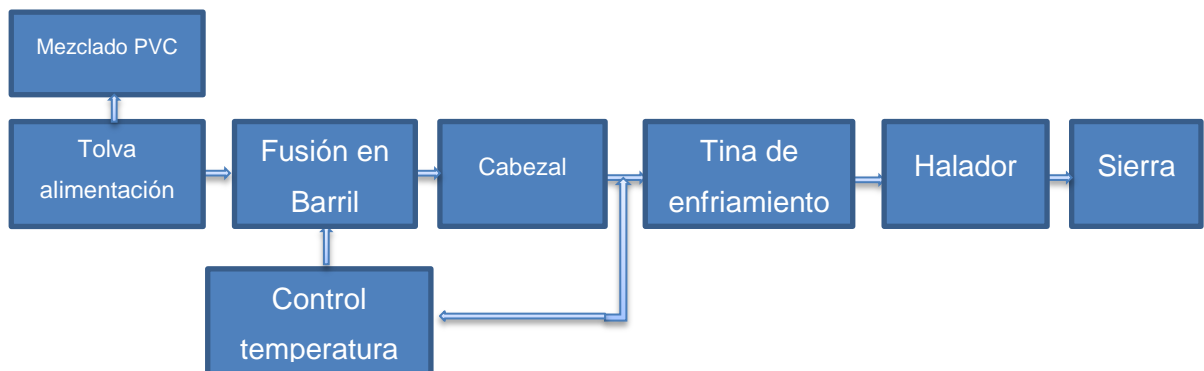


Figura 2-15. Diagrama de bloques proceso de extrusión.

## 2.3 TIPOS DE TUBERÍA

La tubería de PVC pertenece a la clasificación de tuberías Semi-rígidas las cuales poseen cierta capacidad de deformarse, son livianas, pueden soportar medios corrosivos y ligeros desplazamientos sin sufrir daños [32]. Las partes principales de un tubo se ilustran en la figura 2-16.

<sup>8</sup> Controlador Lógico Programable

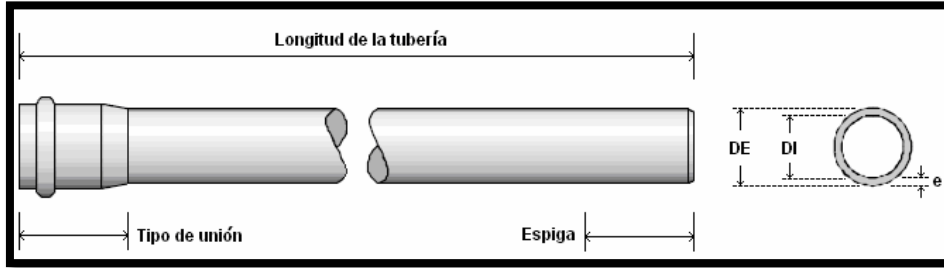


Figura 2-16. Partes principales de la tubería [32].

Hay 4 tipos de tubos de PVC: La tubería hidráulica utilizada en instalaciones con presión, la tubería sanitaria para instalaciones sin presión, tubería de ventilación que transporta fluidos gaseosos y la tubería Conduit usada para alambrado eléctrico. La Empresa Tuboplex fabrica los cuatro tipos.

### 2.3.1 Tubería de PVC Hidráulica

Se utiliza en instalaciones para transportar fluidos a presión. La Empresa Tuboplex fabrica principalmente tubería para la conducción de agua potable clasificados según la RDE<sup>9</sup>. Se fabrican bajo los requisitos de la norma NTC 382<sup>10</sup>. Son de color blanco [38]. Ver figura 2-17

### 2.3.2 Tubería sanitaria

Este tipo de tubería tiene su mayor aplicación en redes de alcantarillado, así como en aplicaciones donde no exista presión alguna. La Empresa Tuboplex fabrica tubería sanitaria para transportar agua residual doméstica, industrial o aguas lluvia, bajo los requisitos de la norma NTC 1087 y los requisitos de la resolución 1166. Son de color amarillo [38]. Ver figura 2-17

### 2.3.3 Tubería ventilación

Los tubos están diseñados para transportar ventilación y complementan los sistemas de presión. Son de color naranja. Ver figura 2-15

---

<sup>9</sup> RDE Relación diámetro espesor (R/E)

<sup>10</sup> Norma Técnica Colombiana 382- Plásticos, Fabricación de Tubos de poli (Cloruro de vinilo) (PVC) clasificados según la presión (serie RDE).

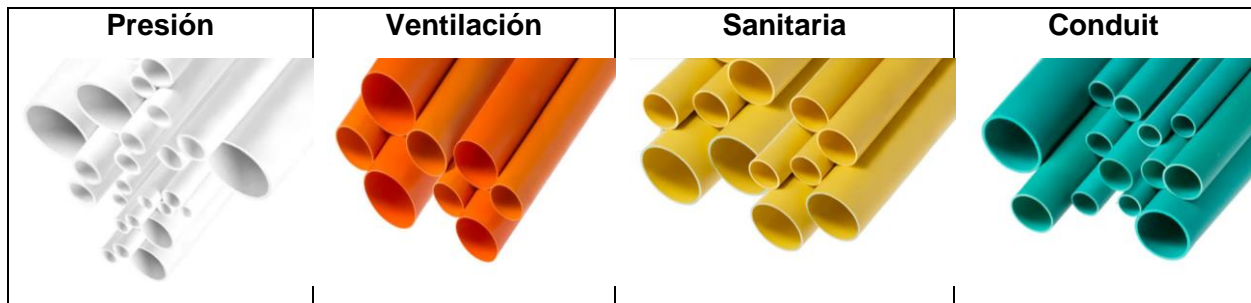


Figura 2-17. Tipos de tubería estándar según uso [38].

### 2.3.4 Tubería Conduit

Se usa para la protección de conductores eléctricos. Por el tipo de instalación se han dividido en uso normal para construcción media y en uso pesado para edificios, industria, centros comerciales y lugares de alta contaminación. Son de color verde (ver figura 2-17). La línea de extrusión de tubería Conduit de la Empresa Tuboplex es el objeto de estudio de este trabajo de grado. Las características de esta tubería se detallan en la figura 2-18.

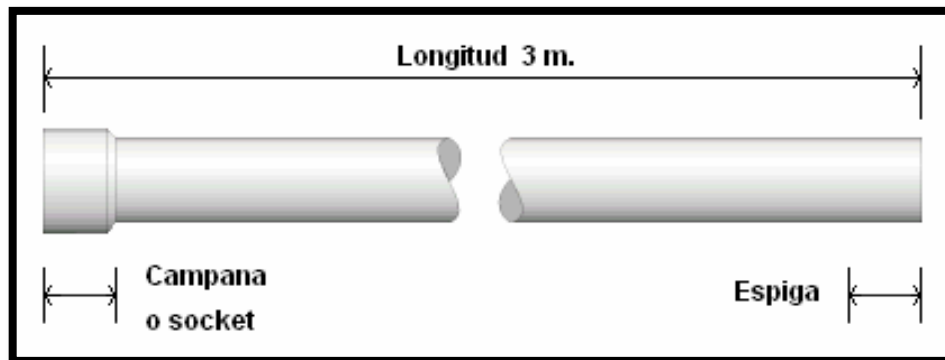


Figura 2-18. Detalle de la tubería Conduit [32].

## 2.4 DISCONTINUIDADES COMUNES EN LA TUBERÍA DE PVC

A continuación se relacionan y describen los defectos y/o discontinuidades más comunes en el proceso de extrusión así como el análisis de causalidad térmico y/o mecánico asociado a estos defectos.

### 2.4.1 Aspectos generales mecánicos y térmicos de los defectos y/o discontinuidades

Gran parte de los defectos en las tuberías se deben principalmente a un inadecuado perfil de temperaturas y presiones en el barril, pero los sistemas mecánicos también generan

discontinuidades en los tubos por fallas mecánicas y/o eléctricas. Hay que usar temperaturas suficientemente altas para llevar el compuesto a un estado de fusión y así optimizar las propiedades físicas. Para procesar a temperaturas suficientemente altas sin causar degradación, es muy importante disponer de un excelente sistema de lubricación [37]. También es muy importante mantener un adecuado control de la temperatura y de la velocidad de rotación del tornillo, para lograr que el plástico fundido salga siempre del extrusor con la misma consistencia y viscosidad, ya que entre mayor sea la viscosidad mayor será el consumo de energía.

### 2.4.2 Marcas discontinuas en la superficie

Se dan cuando hay una mala homogenización del fluido y se desarrolla insuficiente presión entre el final del tornillo y la boquilla de extrusión. Si el tornillo está debidamente diseñado y ejerce la presión necesaria cuando el material se acerca a la boquilla, no dejará marcas discontinuas [32]. También se evita este problema con una alimentación uniforme desde la tolva y una producción ininterrumpida mientras el material circula hacia la entrada de la boquilla en el cabezal.

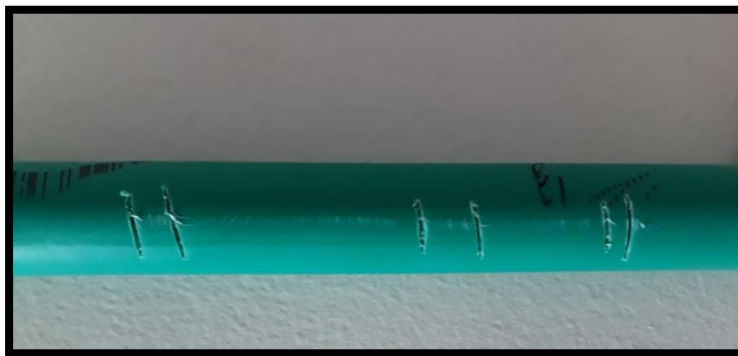


Figura 2-19. Marcas en tubería Conduit.

### 2.4.3 Burbujas

Son de origen gaseoso, debidas a insuficiente presión posterior en el dado y excesiva temperatura de expulsión, seguida por una caída brusca de presión [32]. También pueden obedecer a presencia de humedad en la resina de PVC que al evaporarse parcialmente genera burbujas (ver figura 2-20). Por eso importante que el material esté completamente seco antes de la extrusión.



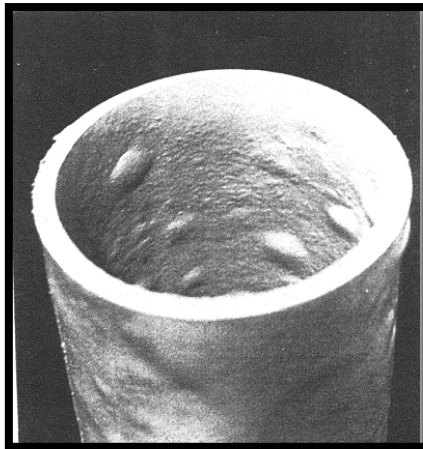


Figura 2-20. Burbujas en tubería de PVC [39]

#### **2.4.4 Dimensiones desiguales en los diámetros**

Las dimensiones desiguales de los diámetros pueden deberse a una velocidad incorrecta del halador, un defecto en la boquilla, un defecto en el molde o en el calibrador ubicado a la entrada de la tina de enfriamiento.

#### **2.4.5 Porosidad**

Se puede generar por gases, humedad o contaminación del PVC o los aditivos, que al evaporarse o fundirse completamente por la temperatura generan el poro (ver figura 2-21). Para el caso de los gases hay que asegurarse que el conducto de desgasificación del cilindro esté completamente libre de obstrucción.



Figura 2-21. Poros en la tubería sanitaria de PVC.

### 2.4.6 Degradación

Los plásticos tienden a degradarse cuando están sujetos a excesivas temperaturas. El PVC es probablemente el más susceptible a la degradación [32]. Por ello el control de esta variable en el barril es una necesidad constante.

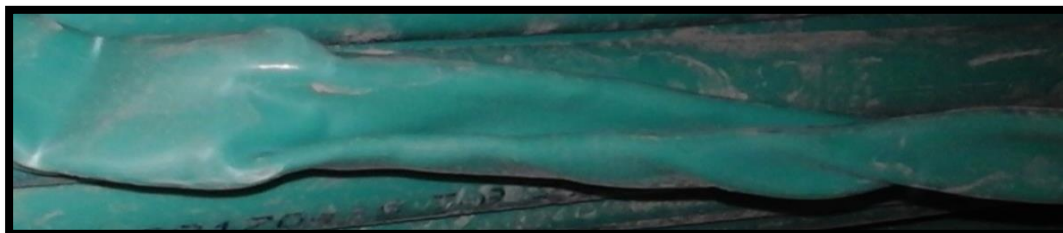


Figura 2-22. Degradación en la tubería Conduit

### 2.4.7 Piel de tiburón y abaumbamiento

La piel de tiburón es un defecto de la superficie, asociado con las condiciones a la salida del dado. Consiste en una serie de fisuras, perpendiculares a la dirección de extrusión. Se manifiesta inicialmente como una apariencia de acabado mate y empeora a medida que aumenta la velocidad de flujo [32]. Este defecto se debe a los esfuerzos de tracción, se genera cuando el material fundido avanza a lo largo del canal del dado y tiene un perfil de velocidad con una velocidad máxima en las capas interiores y una velocidad cero en las capas superficiales. Esto genera diferentes esfuerzos a la tracción en las diferentes capas del fluido generando un defecto muy visible con aspecto a las branquias del tiburón como se observa en la figura 2-23.

El calentamiento extra del dado ayuda con frecuencia a remediar este defecto, al relajar térmicamente los esfuerzos y disminuir la viscosidad [32]. Pero el calentamiento excesivo del dado y el aumento de presión pueden generar abaumbamiento, es decir un aspecto del tubo parecido al bambú (ver figura 2-21)

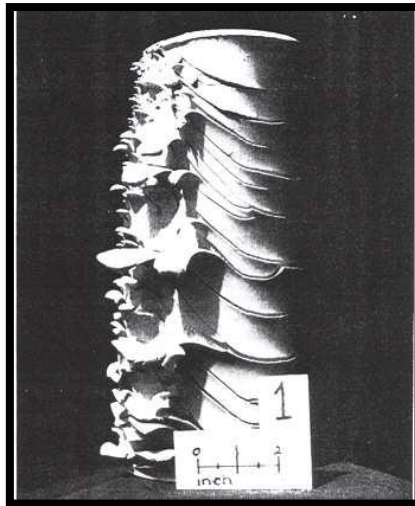


Figura 2- 23. Piel de tiburón en tubería de PVC [19]

#### **2.4.8 Ovalamiento**

Este defecto se presenta cuando el tubo pierde su geometría circular y se torna ovalado. Se genera principalmente por presiones incorrectas en el halado, problemas de temperatura y presión en el dado o la boquilla, se soluciona controlando la temperatura en la boquilla y controlando la presión ejercida en el halador.

### **3. MODELO TÉRMICO Y MATEMÁTICO DE UNA EXTRUSORA**

Se deben conocer y estudiar bien los principios de la transferencia de calor para interpretar correctamente las mediciones. El modelamiento de los sistemas inspeccionados permite mejorar sustancialmente la calidad de los termogramas, así como la precisión de los parámetros identificados y la pertinencia de los diagnósticos en los sistemas mecánicos y eléctricos.

El conjunto barril-tornillo-resistencias es el elemento principal de la extrusora, es allí donde se desarrolla el proceso de fusión del PVC y la conformación principal de la tubería. Las secciones del cabezal y el adaptador son unas zonas de transición térmica en la que se da prioridad a la geometría del tubo. El proceso de conformación culmina a través de un choque térmico realizado en la tina de enfriamiento. Estas tres secciones de la extrusora proporcionan el perfil de temperatura necesario para la fabricación de la tubería, motivo por el cual es importante generar el modelo térmico de las secciones, a través de un balance de energía desde el punto de vista de la transferencia de calor.

Se realizó el modelo para las líneas de extrusión 1 (Conduit) y 2 (Sanitaria) con el fin de realizar una comparación de los perfiles de temperatura, la transferencia de calor hacia el conjunto tornillos-polímero y el flujo de calor por radiación térmica en los alrededores de las extrusoras, ya que es esa radiación la que capta la cámara termográfica y la traduce en un perfil visual de temperatura o termograma.

#### **3.1 CONSIDERACIONES TÉCNICAS PARA EL MODELO TÉRMICO**

La empresa usa dos tipos de material de PVC de acuerdo a las propiedades mecánicas requeridas según la aplicación. Las propiedades mecánicas se determinan por la densidad de PVC en la mezcla y el espesor del tubo (diámetro externo menos diámetro interno), a mayor densidad (mayor peso) y mayor espesor, el tubo obtiene mejores propiedades mecánicas. Los compuestos usados por la Empresa Tuboplex son Celuplex para tubería semipesada y Poliplex para tubería pesada.

El modelo se realizó con las extrusoras usando material Celuplex, fabricando el menor diámetro nominal ( $\frac{1}{2}$  " para tubería Conduit y  $1 \frac{1}{2}$  " para tubería sanitaria), así como el menor

espesor, ya que estos parámetros de trabajo son los que requieren el perfil de temperaturas más alto, porque al disminuir la densidad hay más volumen de material en el barril y la extrusora trabaja con la carga más alta. En la tabla 3-1 se consignan los valores nominales de las geometrías de la tubería Conduit y la tubería Sanitaria.

Tabla 3-1. Especificaciones tubería Conduit y Sanitaria en la Empresa Tuboplex.

Tipo de tubo	Dinámetro nominal		Diámetro exterior (mm)			Espesor de pared (mm)			Long. (m)
	mm	pulg.	mínimo	promedio	máximo	mínimo	promedio	máximo	promedio
Conduit	21	½	21.24	21.34	21.44	1.52	1.77	2.03	3
Sanitaria	48	1 ½	48	48.26	48.52	2.8	2.85	2.9	6

### 3.2 SUPOSICIONES PARA EL MODELO TÉRMICO DE LAS EXTRUSORAS

Se realizan tres (3) suposiciones principales para la construcción del modelo:

- En el proceso de extrusión de PVC, la temperatura y flujo de calor son de naturaleza transitoria tanto en posición como en tiempo, pero puede analizarse bajo condiciones que se suponen estacionarias, ya que los procesos estacionarios son más fáciles de analizar para cálculos de ingeniería y los resultados obtenidos tienen una confiabilidad aceptable para decisiones de mantenimiento.
- Se supone que los materiales son isotrópicos; es decir tienen propiedades uniformes en todas direcciones.
- La conductividad térmica (k) no varía con la temperatura o la posición, se asume un valor constante según el material.

Es importante precisar que el sistema térmico planteado para el modelo cubre tanto exterior y el interior de la extrusora. Que la radiación infrarroja y la termografía infrarroja son un fenómeno y técnica mayormente superficiales. Estos fenómenos térmicos superficiales son los que la cámara finalmente registra. Pero es necesario construir todo el modelo para entender mejor los procesos de transferencia de calor en la extrusora.

### 3.3 MODELO EXTRUSORA DE TUBERÍA CONDUIT (LÍNEA 1)

El conjunto barril, tornillo y calefactores posee tres características importantes a tener en cuenta en el modelo:

- El barril y los tornillos de la extrusora tienen 4 zonas de operación y están contruidos en acero 38CrMoAl.
- La geometría interna del barril es cónica es decir que el diámetro cambia con la longitud.
- La geometría y valores de potencia de las resistencias calefactoras son iguales en cada zona.

La zona del cabezal tiene cuatro zonas de calentamiento, dos en el adaptador, una en el dado y otra a la salida de la boquilla. En total hay 8 zonas de calentamiento entre el inicio del barril y la boquilla. Las dimensiones y valores nominales de las 8 zonas se relacionan en las tablas 3-2 y 3-3.

Tabla 3-2. Dimensiones y valores nominales de las 4 zonas del barril.

Zona	Diámetro interno [m]	Diámetro Externo [m]	Longitud de la zona [m]	Área superficial interna [m] <sup>2</sup>	Área superficial externa [m] <sup>2</sup>	Área aire alrededores a 1 m [m] <sup>2</sup>	Cant. resis	Potencia resist. [W]	Rango temperatura Zona [°C]
1	0.114	0.240	0.19	0.0217	0.046	1,19	3	1300	160-190
2	0.099	0.200	0.12	0.0119	0.024	0,75	2	1000	190-210
3	0.086	0.200	0.12	0.0103	0.024	0,75	2	1000	110-120
4	0.073	0.175	0.23	0.0168	0.040	1,44	3	1000	120-130

Tabla 3-3. Dimensiones y valores nominales de las zonas entre adaptador y el cabezal.

Zona	Diámetro interno [m]	Diámetro Externo [m]	Longitud de la zona [m]	Área superficial interna [m] <sup>2</sup>	Área superficial externa [m] <sup>2</sup>	Área aire alrededores a 1 m [m] <sup>2</sup>	Canti-dad resist	Potencia resist. [W]	Rango temperatura Zona [°C]
5	0.062	0.150	0.06	0.0037	0.0090	0,37	1	800	175-180
6	0.053	0.150	0.06	0.0032	0.0090	0,37	1	800	185-190
7	0.044	0.160	0.12	0.0052	0.0064	0,75	3	800	190-200
8	0.038	0.160	0.04	0.0015	0.0064	0,25	1	1500	230-240

Hay otras 2 zonas de enfriamiento que terminan el proceso de conformación del tubo. La primera es a la salida de la boquilla del cabezal, donde el tubo sale con una temperatura de

190°C y es enfriado hasta los 100°C a través de convección forzada por un chorro de agua, antes de entrar a la tina de enfriamiento (Zona 9). Finalmente el tubo sale de la tina con una temperatura de 30°C después de tener un proceso de convección forzada más largo (zona 10).

### 3.3.1 Perfil de temperatura de las zonas de calentamiento y enfriamiento

El perfil de temperaturas que se ilustra en la figura 3 -1, se desarrolló para la carga de trabajo más alta, la que se presenta cuando se fabrica las tubería de ½” y es allí donde se presentan las temperaturas más altas del proceso es decir el límite superior del rango de temperaturas, presentados en las tablas 3-2 y 3-3.

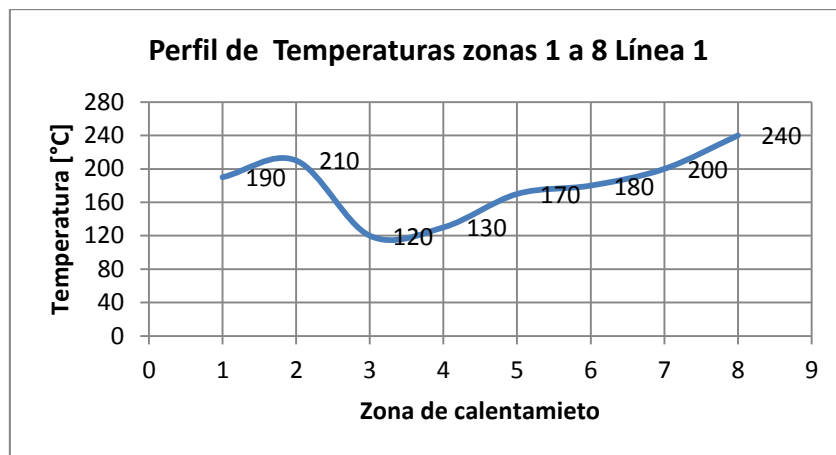


Figura 3-1. Perfil de temperaturas para carga más alta del proceso.

### 3.3.2 Modelo térmico de las zonas de calentamiento 1 a 8

Para realizar el modelo térmico se realiza el balance de energía para cada una de las ocho zonas [37]. En la figura 3-2 se ilustra el balance de energía de una zona, el cual es replicable a las otras siete zonas de calentamiento.

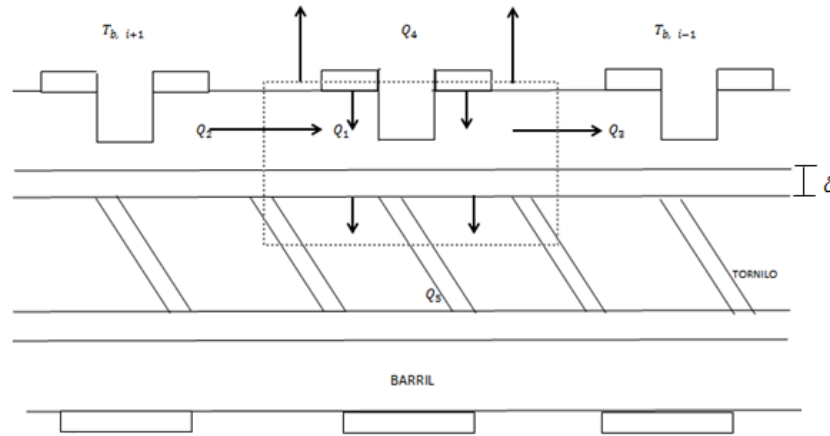


Figura 3-2. Esquema modelo térmico [37].

En condición transitoria el balance completo de calentamiento para el subsistema  $n$  es:

$$\frac{dE_b}{dt} + \frac{dE_{tr}}{dt} = Q1 + Q2 - (Q3 + Q4 + Q5) \quad \text{Ec. (3-1)}$$

Donde:

- $\dot{Q}_1$ : Calor de los elementos calefactores (Transferencia por conducción)
- $\dot{Q}_2$ : Calor del proveniente del subsistema anterior "i - 1" (Transferencia por conducción)
- $\dot{Q}_3$ : Calor hacia el subsistema posterior "i + 1" (Transferencia por conducción)
- $\dot{Q}_4$ : Calor hacia los alrededores (Transferencia por convección y radiación)
- $\dot{Q}_5$ : Calor hacia el polímero y el tornillo (Transferencia por convección)
- $T_b$ : Temperatura de barril en el subsistema "i"

$\frac{dE_b}{dt}$  y  $\frac{dE_{tr}}{dt}$  son variaciones en el tiempo de la energía térmica del tornillo y barril. Se analiza cada etapa en estado estacionario y los cambios de temperatura en el tiempo de cada zona son menores, por esta razón el lado izquierdo de la ecuación (3-1) es cero. Las relaciones matemáticas de las variables térmicas de los elementos de balance de energía de la ecuación 3-1 y descritos en los principios físicos del capítulo 1, son las siguientes:

$$Q_1 = W \text{ de la resistencia} \quad \text{Ec.(3-2)}$$

$$Q_2 = \frac{K_b A_b (T_{b,i-1} - T_{b,i})}{X} \quad \text{Ec.(3-3)}$$



$$Q_3 = \frac{K_b A_b (T_{b,i} - T_{b,i+1})}{X} \quad \text{Ec.(3-4)}$$

$$Q_4 = h_a A_a (T_b - T_a) + \sigma A_a (T_b^4 - T_a^4) \quad \text{Ec.(3-5)}$$

$$Q_5 = h_p A_p (T_b - T_p) \quad \text{Ec.(3-6)}$$

Donde:

- $W$ : Máxima potencia eléctrica de calentamiento
- $K_b$ : Conductividad térmica de barril
- $A_a A_b, A_p$ : Superficie de calentamiento barril-aire, barril-barril y barril polímero
- $L$ : Longitud del subsistema
- $h_a, h_p$ : Coeficiente de transferencia de calor barril-aire y barril-polímero
- $\sigma$ : Constante de Stefan- Bolstzmann
- $\delta$ : Distancia entre el tornillo y el diámetro interno del barril
- $T_a, T_{tr}, T_b$ : Temperatura del aire, del conjunto polímero- tornillo y del barril.

**3.3.2.1 Cálculos matemáticos de la zona 1.** Como se supone estacionario la parte izquierda de la ecuación se hace.

$$Q_1 + Q_2 - (Q_3 + Q_4 + Q_5) = 0 \quad \text{Ec.(3-7)}$$

- **Calculo de flujos de calor en la sección del barril y el cabezal**

$Q_1 = W$  de la resistencia

$Q_1 = 1300 \text{ W}$  ;De la tabla 2-1

$Q_2 = 0$  ;Ya que no no hay un subsistema anterior

$$Q_3 = -\frac{K_b A_b (T_{b,i} - T_{b,i+1})}{X} = -\frac{50.2 * 0.046 (463 - 483)}{0.19} = 243 \text{ W}$$

Dónde:

$$K_b = 50.2 \frac{\text{W}}{\text{m.K}} \quad ;\text{De la tabla 1-3}$$

$$A_b = 0.046m^2 \quad ;\text{De la tabla 3-2}$$

$$T_{b,i} = 190^\circ\text{C} = 463^\circ\text{K} \quad ;\text{De la tabla 3-2}$$

$$T_{b,i+1} = 210^\circ\text{C} = 483^\circ\text{K} \quad ;\text{De la tabla 3-2}$$

$$L = 0.19m \quad ;\text{De la tabla 3-2}$$

Para calcular  $Q_4$  tomamos la radiación a un metro de la extrusora, ya que es a esa distancia que se realizaron las mediciones con la cámara termográfica.

$$Q_4 = h_a A_a (T_b - T_a) + \sigma A_a (T_b^4 - T_a^4)$$

$$Q_4 = 25 * 1.19(190 - 22) + 5.67 \times 10^{-8} * 1.19(190^4 - 22^4) = 7587 \text{ W}$$

Donde:

$$h_a = 25. \frac{W}{m^2.C} \quad ;\text{De la literatura [7]}$$

$$A_a = 2\pi(1m) * 0.19m = 1.19m^2 \quad ; \text{Area aire circundante a un metro del barril zona 1}$$

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} \quad ; \text{Constante del Boltzmann}$$

$$T_b = 190^\circ\text{C} = 463^\circ\text{K} \quad ; \text{De la tabla 2-2}$$

$$T_a = 22^\circ\text{C} = 295^\circ\text{K} \quad ; \text{Medida en campo}$$

$$Q_5 = Q_3 + Q_4 - Q_1 - Q_2 = 0 \quad ; \text{Despejando de la Ec 2-9}$$

$$Q_5 = 243 + 7587 - 1300 - 0 = 6530 \text{ W}$$

Los cálculos de las zonas 2 a 8 se realizan de manera idéntica usando el modelo de la figura 3-2 y las ecuaciones 3-1 a las 3-6. La tabla 3-4 consigna los valores del flujo de calor calculados para las zonas 1 a 8.

Tabla 3-4. Flujo de calor por Zona de calentamiento de la línea de extrusión 1

FLUJO (W)	ZONA DE CALENTAMIENTO							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$Q_1$	1.300	1000	1000	1000	800	800	800	1500
$Q_2$	0	200	903	87	376	75	80	321
$Q_3$	243	904	100	437	75	75	321	1750
$Q_4$	5086	3626	1856	3902	1512	1611	3423	1417
$Q_5$	4029	3331	53	3252	411	811	2864	1347

- **Análisis del flujo de calor por radiación hacia el ambiente ( $Q_4$ ).** El flujo de calor de mayor interés para el procedimiento de inspección es  $Q_4$ , ya que es flujo de calor debido a la radiación térmica de la superficie del barril y el cabezal. Es esta radiación térmica la que sensa la cámara termográfica. En la figura 3-3 se ilustra el comportamiento del flujo de calor por radiación en las superficies de las 8 zonas calculados en el numeral 3.3.2.1 y consignados en la tabla 2-4.

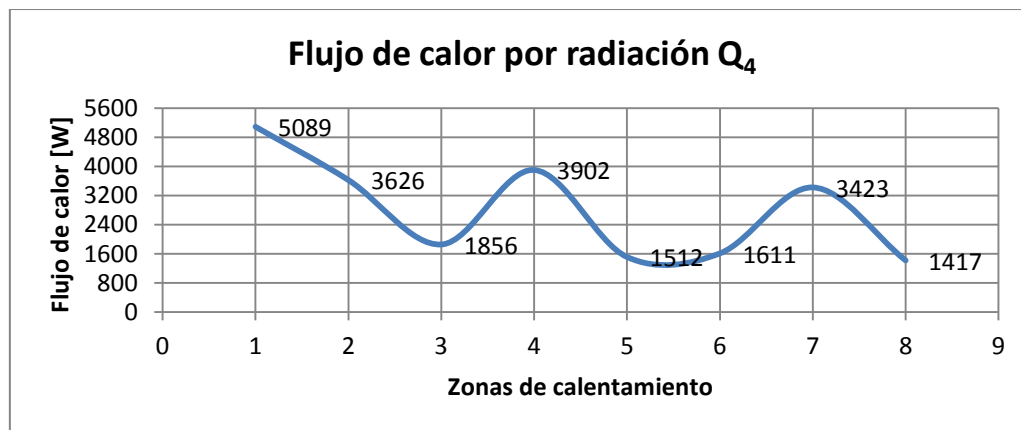


Figura 3-3. Flujo de calor por radiación  $Q_4$ .

En la figura 3-3 se observa que flujo de calor por radiación es más alto en las zonas 1 a 4, porque en el barril se presentan los mayores flujos de calor del proceso, debido a que allí es donde se funde el PVC y adicionalmente existe un perfil de presiones creado por los tornillos. En la zona 3 hay una baja considerable del flujo de calor principalmente porque en esta zona hay refrigeración a través de una manguera de cobre que rodea el barril y tiene agua fluyendo en su interior, además esta es la zona de menor longitud. En las zonas 5 a 8 ya no están presentes los tornillos y las resistencias son de menor valor (excepto la zona 8). En la figura 3-3 se ilustra el comportamiento del flujo de calor por radiación de las 8 zonas en los alrededores a 1 metro del barril.

- **Comportamiento del flujo de calor  $Q_4$  por radiación en función del área y la temperatura.** Las figuras 3-4 y 3-5 ilustran el comportamiento del flujo de calor por radiación ( $Q_4$ ) en función del área y la temperatura.

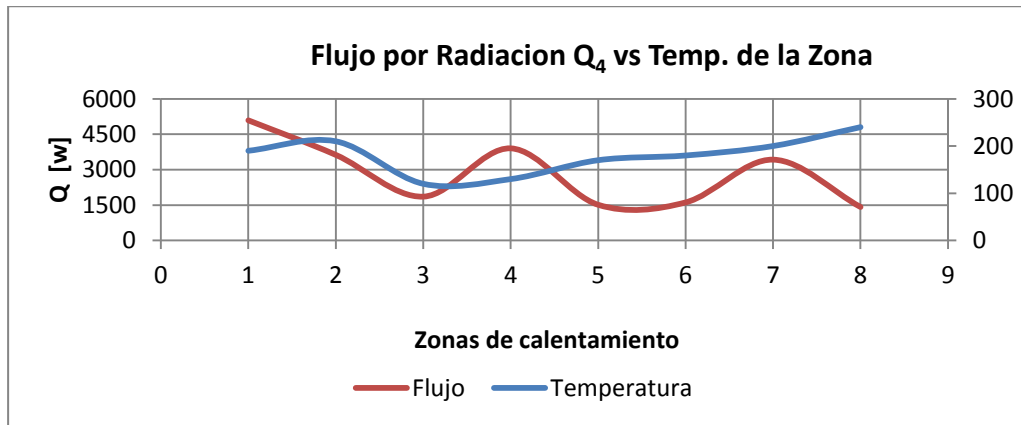


Figura 3-4. Flujo de calor  $Q_4$  vs  $A_a$ .

La figura 3-4 ilustra que el flujo de calor es proporcional a la temperatura en las 4 zonas del barril.

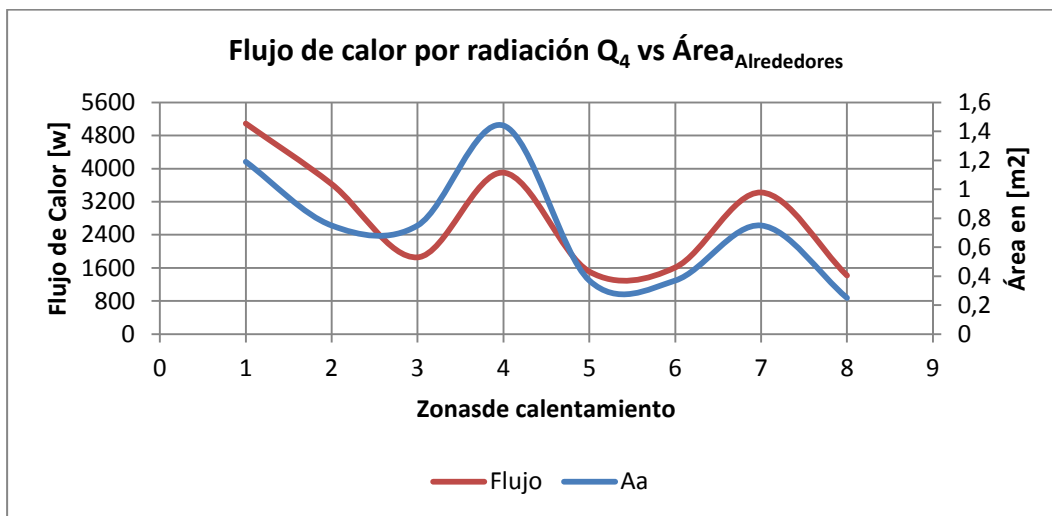


Figura 3-5. Flujo de calor  $Q_4$  vs  $A_a$ .

La figura 3-5 ilustra el comportamiento del flujo de calor en el área del aire circundante a 1 metro de las zonas de calentamiento 1 a 8, la ecuación 2.5 denota una proporcionalidad directa entre  $Q_4$  y  $A_s$ .

Comparando las gráficas de las figuras 3-4 y 3-5 se observa que el flujo de calor por convección y radiación  $Q_{conv-rad}$  ( $Q_4$ ) es proporcional a la temperatura y al área, pero la variación respecto al área tiene una mayor correlación, por ende una mayor incidencia en el comportamiento del flujo de calor por radiación.

- **Flujo de calor hacia el PVC ( $Q_5$ ).** El flujo de calor  $Q_5$  representa el calor que es transmitido por el barril al conjunto PVC-Tornillos. Los tornillos reciben y acumulan gran parte del calor, ya que ocupan el 80% del volumen de la cámara interna del barril. Tal como muestra la figura 3-6, este flujo también es directamente proporcional a la temperatura y al área interna, pero es más dependiente y presenta una mayor correlación con el área interna del barril, como se observa en la figura 3-6.

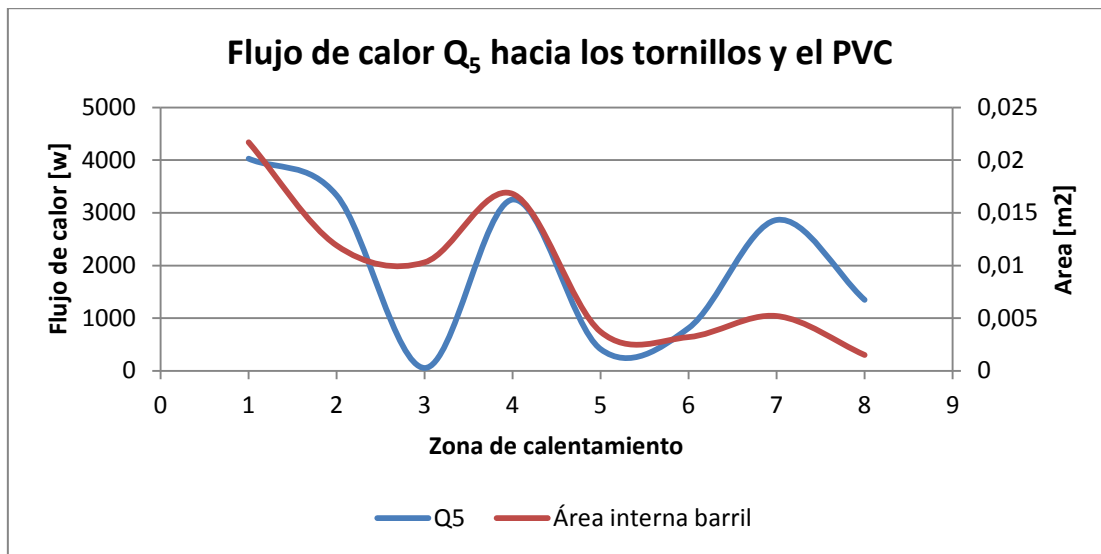


Figura 3-6. Flujo de calor  $Q_5$ .

### 3.3.3 Modelo térmico de la zona 9

En la zona 9 el tubo sale del cabezal a una temperatura de 190°C (medida 3 cm después de salir del cabezal) y es refrigerado por un chorro de agua a 15°C, aplicado en una pequeña sección de 3 cm, lo que lleva al tubo hasta una temperatura de 100°C (medida 3 cm después de la refrigeración del chorro de agua). En la zona 9 la refrigeración es realizada por convección natural y radiación hacia el ambiente antes y después del chorro de agua y únicamente por convección forzada durante la aplicación del chorro.

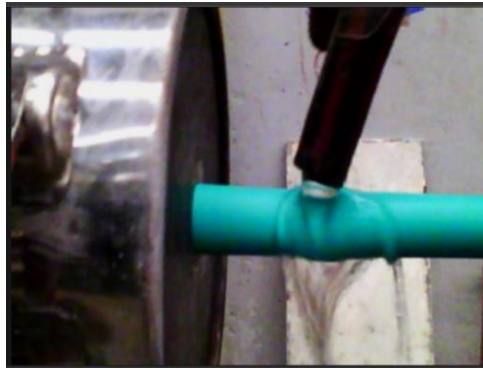


Figura 3-7. Zona 9 línea 1 de extrusión Tuboplex S.A.

**3.3.3.1 Cálculos matemáticos.** Se realiza el modelo térmico de los 3 procesos de transferencia de calor que ocurren sobre el tubo en la zona 9.

- **Cálculo de flujo de calor por convección natural y radiación antes y después del chorro de agua a 15°C**

$$Q_{Rad} = h_a A_t (T_t - T_a) + \sigma A_a (T_t^4 - T_a^4) \quad ; \quad \text{Ec. (3.5)}$$

Donde:

$$T_{tubo} = 190 \text{ °C y } 100 \text{ °C}$$

$$T_{aire} = 22 \text{ °C} \quad ; \text{ Medida tomada en campo}$$

$$h_a = 25 \frac{W}{m^2 \cdot C} \quad ; \text{ Coeficiente de convección del aire}$$

$A_s$  = Área expuesta del tubo

$$A_s = 0.021 \text{ m} * 0.03 \text{ m} = 0.00063 \text{ m}^2 \quad ; \text{ Calculando con datos de tabla 3-2}$$

- Cálculo de flujo de calor para temperatura del tubo 190°C

$$Q_{Rad} = 25 * 0.00063 (190 - 22) + 5.6 * 10^{-8} * 0.00063 (190^4 - 22^4) = 2.7 \text{ W}$$

- Cálculo de flujo de calor para temperatura del tubo 100°C

$$Q_{Rad} = 25 * 0.00063 * (100 - 22) + 5.6 * 10^{-8} * 0.00063 (100^4 - 22^4) = 1.2 \text{ W}$$

- **Cálculo de flujo de calor por convección forzada durante la aplicación del chorro a 15°C.**

$$Q_{conv} = h_a A_{st} (T_t - T_a) \quad ; \quad \text{Ec. (1.10)}$$

Donde:

$$h_a = 1385 \frac{W}{m^2 \cdot C} \quad ; \text{ Coeficiente calculado en el numeral 3.3.5.2}$$

$$A_{st} = 0.00063 \text{ m}^2 \quad ; \text{ Área superficial del tubo}$$

$$T_{tubo} = 190 \text{ }^\circ\text{C} \quad ; \text{ Temperatura del tubo al contacto con el agua}$$

$$Q_{conv} = 1385 * 0.00063(190 - 15) = 152 \text{ W}$$

El tubo transfiere 152 W al chorro de agua y 4 W al aire, es decir el tubo transfiere 156 W al ambiente después de salir del cabezal de la extrusora en la zona 9.

### 3.3.4 Modelo térmico tina de enfriamiento

En la tina de enfriamiento se presenta un modelo de convección forzada externa, y es allí donde se da la conformación final de la tubería. El objetivo es determinar la cantidad de calor transferida del tubo al agua de la tina, a través de la relación expresada en la Ec. 1 -10 y la figura 3-8. Para ello debemos encontrar el coeficiente de convección  $h$  calculando los coeficientes de Nusselt y Prandtl [41] descritos en los principios físicos del capítulo 1.

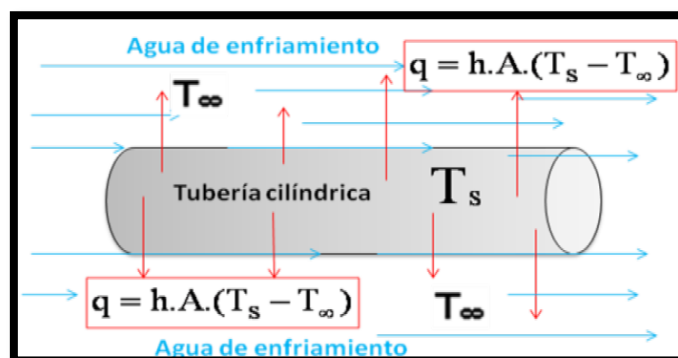


Figura 3-8. Modelo térmico del sistema tubo-tina [41].

**3.3.4.1 Características y valores de las variables en de la tina de enfriamiento.** Las 6 principales características a tener en cuenta para realizar el modelo térmico de la tina son las siguientes:

- Las dimensiones de la tina de enfriamiento de la línea 1 de extrusión son: Largo=3 m. Ancho =0.3 m y Alto= 0.3 m. Medidas tomada en campo.
- Temperatura del tubo a la entrada de la tina es de 100°C. Medida tomada en campo.
- La temperatura del agua suministrada es de 15 °C. Medida tomada en campo.
- Proporcionada por una bomba a razón de  $Q_1 = 1.5 \frac{m^3}{h}$  . Medida de tomada de manual técnico de la bomba (datasheet) [38].
- De la tina de enfriamiento sale un tubo de 3 m cada 19 s. Medida tomada en campo.
- Diámetro de un tubo de  $\frac{1}{2}$ " = 21.34 mm. Medida de la tabla 3 – 2

**3.3.4.2 Cálculos matemáticos para el modelo de la tina.**

$$Q_{caudal} = 1.5 \frac{m^3}{h} = 0.00042 \frac{m^3}{s} \quad ; \text{ Convirtiendo el caudal a flujo por segundo}$$

$$Q_{caudal} = A \cdot v \quad \text{Ec.(3-8)} \quad ; \text{ Relación del caudal de flujo con área y velocidad}$$

Donde:

$A$  = Área de sección de entrada de la tina

$v$  = Velocidad del fluido en la tina

$$A = 0.3 \text{ m} * 0.3 \text{ m} = 0.09 \text{ m}^2$$

Entonces:

$$v_{agua} = \frac{Q}{A} = \frac{0.00042}{0.09} = 0.0047 \frac{m}{s}$$

$$v_{tubo} = \frac{x}{t} = \frac{3m}{19s} = 0.16 \frac{m}{s} \quad \text{Ec.(3-9)}$$

Ahora es necesario determinar si el flujo es laminar o turbulento calculado el número de Reynolds (Ec. 1.16) con el fin de determinar qué tipo de correlación usar para calcular los números adimensionales de Nusselt y Prandtl.



- **Cálculo de Número de Reynolds en las capas de fluido alejadas del tubo.**

$$Re = \frac{\rho * v * D}{\mu} = \frac{999.19 * 0.0047 * 0.0214}{0.001139} = 88.23 \quad ; \text{Flujo laminar (numeral 1.7.2.6 Cap. 1)}$$

Donde:

$$\mu = 0,001139 \frac{kg}{m.s} \quad ; \text{Viscosidad dinámica del Agua a } 15 \text{ } ^\circ\text{C [9]}$$

$$\rho = 999,19 \frac{kg}{m^3} \quad ; \text{Densidad del agua a } 15 \text{ } ^\circ\text{C [9]}$$

$$D = 21.34 \text{ mm} \quad ; \text{Diámetro de un tubo de } \frac{1}{2}'' \text{ tabla 2-1}$$

- **Cálculo de Número de Reynolds en las capas cercanas a capa límite del tubo.**

$$Re = \frac{\rho * v * D}{\mu} = \frac{999.19 * 0.16 * 0.0214}{0.001139} = 3003.1 \quad ; \text{Flujo laminar (numeral 1.7.2.6 Cap. 1)}$$

Se determina que el flujo es laminar tanto en las cercanías del tubo como en las capas de fluido alejadas de este.

- **Cálculo del Número de Prandtl.**

$$\text{Conductividad térmica del agua } k_{a,g} = 0.6 \frac{W}{m^\circ C} \quad ; \text{De tablas [7]}$$

$$\text{Calor específico del agua } C_p = 4186 \frac{J}{kg^\circ C} \quad ; \text{De tablas [7]}$$

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} = \frac{0.001139 * 4186}{0.6} = 7,95 \quad ; \text{De la Ec. (1-15)}$$

- **Cálculo de Número de Nusselt.** Los números de Nusselt para geometrías típicas de sección circular como la de los tubos cilíndricos, se han hallado experimentalmente a través de correlaciones trabajadas por distintos autores como el caso de la correlación de Hilpert [30], que aplica para flujos con Reynolds entre 40 y 4000. (Ver tabla 1 en [30])

$$Nu = C * Re^m * Pr^{\frac{1}{3}} \quad \text{Ec.(3-10)}$$

Donde:

$$C = 0.683 \text{ y } m = 0.4486 \quad ; \text{ Son constantes de correlación [40]}$$
$$P_r = 7.95$$

Entonces:

$$Nu = 0.683 * 3003^{0.446} * 7.95^{\frac{1}{3}} = 48.5$$

- **Cálculo del coeficiente de convección usando Números de Prandtl y Nusselt.** Con el número de Prandtl y Nusselt calculados, se procede a calcular el coeficiente de convección del fluido sobre el tubo en la tina de enfriamiento. A través de la ecuación:

$$h = \frac{Nus * k}{D} \quad \text{Ec. (3-11)} \quad ; \text{ De la literatura [41]}$$

$$h = \frac{Nus * k}{D} = \frac{48.5 * 0.6}{0.021} = 1385 \frac{w}{m^2 \cdot C}$$

- **Cálculo del flujo de calor por convección forzada hacia el fluido.** En la tina el tubo pierde calor a través de convección forzada hacia el agua y se calcula a través de la Ley de Newton del Enfriamiento (ecuación 1-9 y la figura 3-8).

$$Q_{conv} = h_a A_{st} (T_t - T_a)$$

Donde:

$$h_a = 1385 \frac{W}{m^2 \cdot C} \quad ; \text{ Calculada en el numeral anterior}$$

$$A_{st} = 0.069 \text{ m}^2 \quad ; \text{ Área superficial del tubo}$$

$$T_{tubo} = 100 \text{ } ^\circ\text{C} \quad ; \text{ Medida de campo}$$

$$T_{agua} = 15 \text{ } ^\circ\text{C} \quad ; \text{ Medida de campo}$$

$$Q_{conv} = 1385 * 0.069 * (100 - 15) = 8123 \text{ W}$$

7416 W es el flujo de calor transferido por convección forzada por el tubo al agua durante su paso por la tina.

### 3.4 MODELO TÉRMICO EXTRUSORA DE TUBERÍA SANITARIA (LÍNEA 2)

#### 3.4.1 Características del conjunto barril, tornillo y calefactores

Las características son las mismas expresadas en el numeral 3.3. Las dimensiones y valores geométricos de las 8 zonas se relacionan en las tablas: 3-5 y 3-6.

Tabla 3- 5. Dimensiones y valores nominales de las 4 zonas del barril

Zona	Diámetro interno [m]	Diámetro Externo [m]	Longitud de la zona [m]	Área interna barril [m] <sup>2</sup>	Área externa barril [m] <sup>2</sup>	Área aire alrededores a 1 m [m] <sup>2</sup>	Cantidad resist.	Potencia resist. [W]	Rango temperatura Zona [°C]
1	0.144	0.255	0.24	0.028	0.054	1.51	4	2200	180-200
2	0.123	0.290	0.18	0.026	0.052	1.13	3	1800	160-170
3	0.120	0.280	0.18	0.022	0.050	1.13	3	1500	130-140
4	0.107	0.240	0.24	0.026	0.058	1.51	4	1500	160-170

Tabla 3- 6. Dimensiones y valores nominales de las zonas entre adaptador y el cabezal

Zona	Diámetro interno [m]	Diámetro Externo [m]	Longitud de la zona [m]	Área interna barril [m] <sup>2</sup>	Área superficial barril [m] <sup>2</sup>	Área aire alrededores a 1 m [m] <sup>2</sup>	Cantidad resist.	Potencia resist. [W]	Rango temperatura Zona [°C]
5	0.092	0.220	0.12	0.011	0.027	0.75	2	1200	160-175
6	0.079	0.220	0.12	0.010	0.026	0.75	2	1200	170-180
7	0.058	0.160	0.18	0.011	0.029	1.13	3	1200	180-190
8	0.043	0.150	0.04	0.0017	0.006	0.25	1	2300	230-240

El tubo sale con una temperatura de 200°C e ingresa a la tina de enfriamiento directamente. No posee una zona de enfriamiento con chorro de agua como el caso de la línea 1. Finalmente el tubo sale de la tina con una temperatura de 30°C después de tener un proceso de convección forzada (zona 9).

### 3.4.2 Perfil de temperatura de las zonas de calentamiento de la línea 2

El perfil de temperaturas que se ilustra en la figura 3-9, se desarrolla para la carga de trabajo más alta, la cual se presenta cuando se fabrica las tubería de 1 ½", y es allí donde se presentan las temperaturas más altas del proceso es decir el límite superior del rango de temperaturas, presentados en las tablas 3-5 y 3-6.

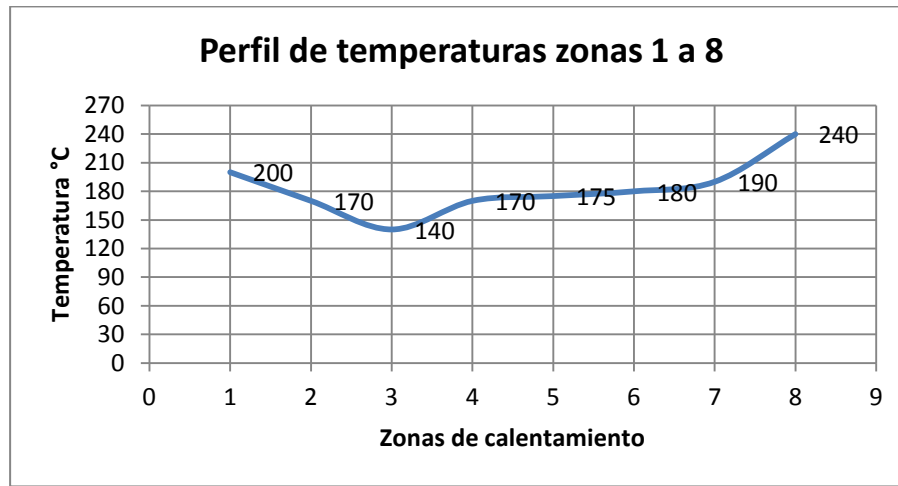


Figura 3-9. Perfil de temperaturas para carga más alta del proceso de la línea 2.

### 3.4.3 Modelo térmico de las zonas de calentamiento 1 a 8

Para realizar el modelo térmico se realiza el balance de energía para cada una de las ocho zonas [37]. Usando el mismo modelo descrito en el numeral 3.3.2 en la figura 3-2 y usando las ecuaciones 3-2 a 3-6 y el balance de energía presentado en la relación 3-7.

**3.4.3.1 Cálculos matemáticos.** Los cálculos matemáticos de las zonas 1 a 8 se hacen con las mismas consideraciones técnicas y teóricas del modelo de la línea 1 y de forma idéntica a los realizados en el numeral 3.3.2.1 pero usando los valores consignados en las tablas 3-5 y 3-6. Los resultados obtenidos para la línea 2 se consignan en la tabla 3-7.

Tabla 3-7. Flujos de calor del modelo térmico de la línea 2.

FLUJO (W)	ZONA DE CALENTAMIENTO							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$Q_1$	2200	1800	1500	1500	1200	1200	1200	2300
$Q_2$	0	435	418	364	56	54	81	377
$Q_3$	339	435	418	61	56	109	404	1641
$Q_4$	6857	4234	3358	5659	2909	2963	4829	1409
$Q_5$	4995	2435	1858	3856	1709	1818	3952	374

- **Flujo de calor por radiación hacia el ambiente ( $Q_4$ ) en función del área y la temperatura).** En la figura 3-10 se ilustra el comportamiento del flujo de calor por radiación en las superficies de las 8 zonas de calentamiento. La figura 3-10 ilustra que el flujo de calor en el modelo de la línea 2 es proporcional a la temperatura en las 4 zonas del barril igual como el modelo de la línea 1.

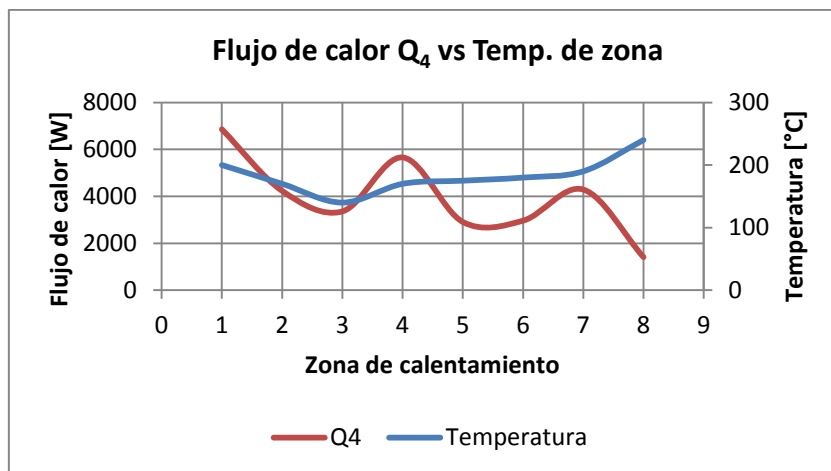


Figura 3-10. Flujo de calor por radiación  $Q_4$  vs Temperatura de las zonas.

La figura 3-11 ilustra el comportamiento del flujo de calor en el área del aire circundante a 1 metro de las zonas de calentamiento 1 a 8, la ecuación 3.5 denota una proporcionalidad directa entre  $Q$  y  $A_s$ .

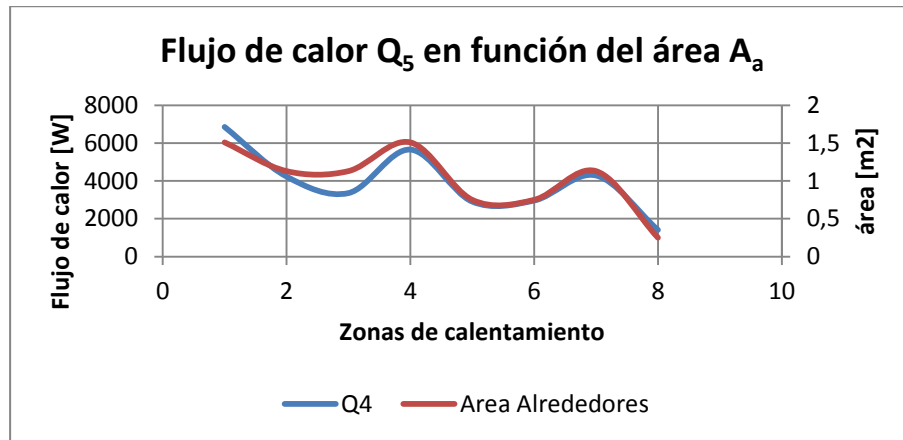


Figura 3-11. Flujo de calor  $Q_4$  vs  $A_a$  línea 2.

Comparando las gráficas de las figuras 3-10 y 3-11 se observa que el flujo de calor por radiación  $Q_{rad}$  es proporcional a la temperatura y al área, pero de igual manera que el modelo de la línea 1, la variación respecto al área tiene una mayor correlación y una mayor incidencia en el comportamiento del flujo de calor por radiación.

- **Flujo de calor ( $Q_5$ ) hacia el PVC en la línea 2**

El flujo de calor  $Q_5$  Representa el calor que es transmitido por el barril y el cabezal al conjunto Tornillo-PVC. Tal como muestra la figura 3-12 de igual manera que en la línea 1, el flujo presenta una mayor correlación con el área interna del barril que la variación de la temperatura.

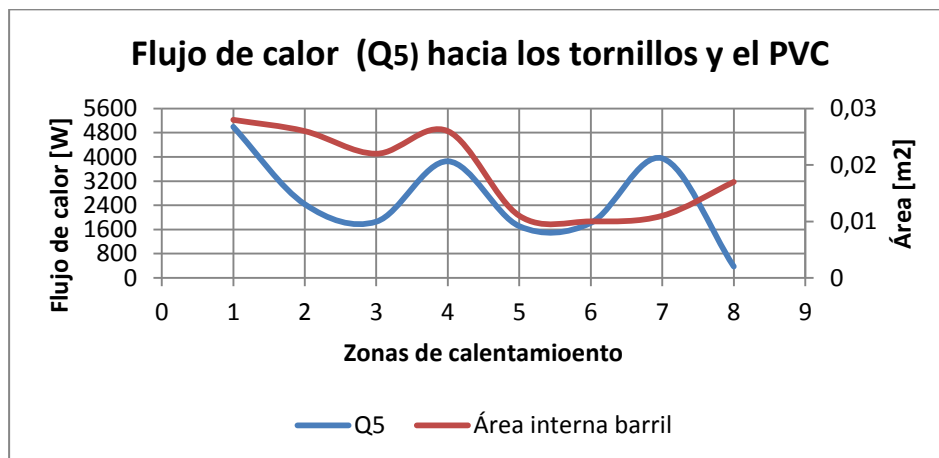


Figura 3-12. Flujo de calor  $Q_5$  en la línea 2.

### 3.4.4 Modelo térmico tina de enfriamiento línea 2

Al igual que en la línea 1, el objetivo es determinar la cantidad de calor transferida del tubo al agua de la tina por convección forzada, a través de la relación expresada en la Ec. 1-9 y la figura 3-8.

**3.4.4.1 Características y valores de las variables en de la tina de enfriamiento.** Las principales características a tener en cuenta para realizar el modelo térmico de la tina son las siguientes:

- Las dimensiones de la tina de enfriamiento de la línea 2 de extrusión son: Largo=6 m. Ancho =0.35m y Alto= 0.5 m. Medidas tomada en campo.
- Diámetro de un tubo de 1 ½” = 48.23 mm. Medida de la tabla 3 – 1
- La temperatura del tubo a la entrada de la tina es de 200°C. Medida tomada en campo
- La demás características del modelo son las mismas expresadas en el numeral 3.3.5.1

**3.4.4.2 Cálculos matemáticos para el modelo de la tina.** Siguiendo un procedimiento idéntico al descrito en 3.3.4.2 se obtienen los siguientes resultados:

$$Q_{caudal} = 0.00042 \frac{m^3}{s}$$

$$\text{Área} = 0.35m * 0.5m = 0.175m^2$$

$$v_{agua} = \frac{Q}{A} = \frac{0.00042}{0.175} = 0.0024 \frac{m}{s}$$

$$v_{tubo} = \frac{x}{t} = \frac{6m}{25s} = 0.24 \frac{m}{s} \quad ; \text{ Medida tomada en campo}$$

- **Cálculo del Número de Reynolds en las capas de fluido alejadas del tubo.**

$$Re = \frac{\rho * v * D}{\mu} = \frac{999.19 * 0.0024 * 0.0482}{0.001139} = 101 \quad ; \text{ Flujo laminar}$$

- **Cálculo de Número de Reynolds en las capas cercanas a capa límite del tubo.**

$$Re = \frac{\rho * v * D}{\mu} = \frac{999.19 * 0.24 * 0.0214}{0.001139} = 4506 \quad ; \text{Flujo laminar}$$

- **Cálculo del Número de Prandtl.**

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} = \frac{0.001139 * 4186}{0.6} = 7.95$$

- **Cálculo del Número de Nusselt**

$$Nu = C * Re^m * Pr^{\frac{1}{3}} = 0.683 * 4506^{0.446} * 7.95^{\frac{1}{3}} = 58.1$$

- **Cálculo del coeficiente de convección**

$$h = \frac{Nus * k}{D} = \frac{58.1 * 0.6}{0.048} = 726.25 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

- **Cálculo del flujo de calor por convección forzada hacia el fluido.**

$$A_{st} = 0.048 \text{ m} * 6 \text{ m} = 0.288 \text{ m}^2$$

$$Q_{conv} = h_a A_{st} (T_t - T_a) = 726.25 * 0.288 * (200 - 15) = 38.695 \text{ W}$$

### 3.5 COMPARACIÓN DE LOS MODELOS DE LAS LÍNEAS 1 Y 2

En los modelos de las líneas 1 y 2, los flujos de calor por convección y radiación hacia el ambiente ( $Q_4$ ) y los flujos de calor hacia el conjunto tornillos-PVC ( $Q_5$ ), son proporcionales a la temperatura y a las áreas externa, interna y área de los alrededores, pero la dependencia y la correlación con las áreas es mayor que la correlación con la temperatura.

#### 3.5.1 Comparación del perfil de temperaturas

La tubería Sanitaria más pequeña es de mayores dimensiones (ver tabla 3-1) que la más pequeña de Conduit, (3 veces el diámetro). El perfil de temperaturas para la tubería Conduit es mayor en las zonas de fusión (zonas 1 y 2), ya que hay mayor densidad y volumen de material para mezclar, calentar y fundir. La temperatura es menor para las zonas de



compresión (zonas 3 y 4) ya que allí los tornillos asumen gran parte de calentamiento a través de la fricción y compresión del fluido de PVC. Para la zona del cabezal las temperaturas son similares, porque allí se da prioridad a la geometría del tubo y la resina de PVC tiene propiedades similares para ambas líneas de fabricación.

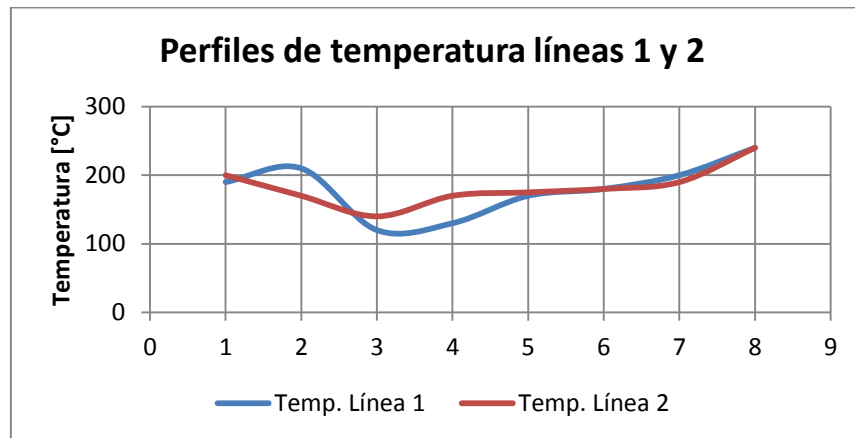


Figura 3-13. Comparación del perfil de temperaturas de las líneas de extrusión 1 y 2.

### 3.5.2 Comparación del flujo de calor por convección y radiación $Q_4$

La línea de tubería sanitaria tiene mayor radiación de energía térmica, ya que posee mayores áreas en las 8 zonas de calentamiento, en comparación con la línea 1. (Ver figura 3-14)

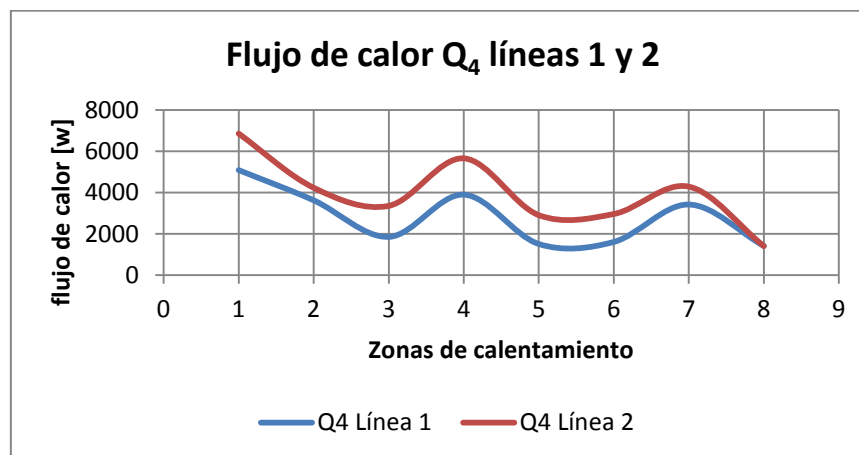


Figura 3-14. Comparación de flujo de calor ( $Q_4$ ) líneas de extrusión 1 y 2.

### 3.5.2 Comparación del flujo de calor hacia los tornillos y el PVC ( $Q_5$ )

El calor transmitido hacia los tornillos y el PVC es mayor en la mayoría de las zonas, porque el barril es de mayor capacidad, tiene mayor área superficial externa e interna y requiere un

perfil de temperatura más alto para fundir y comprimir una mayor cantidad de material. Así mismo los tornillos del barril son más grandes que los de la línea 1.

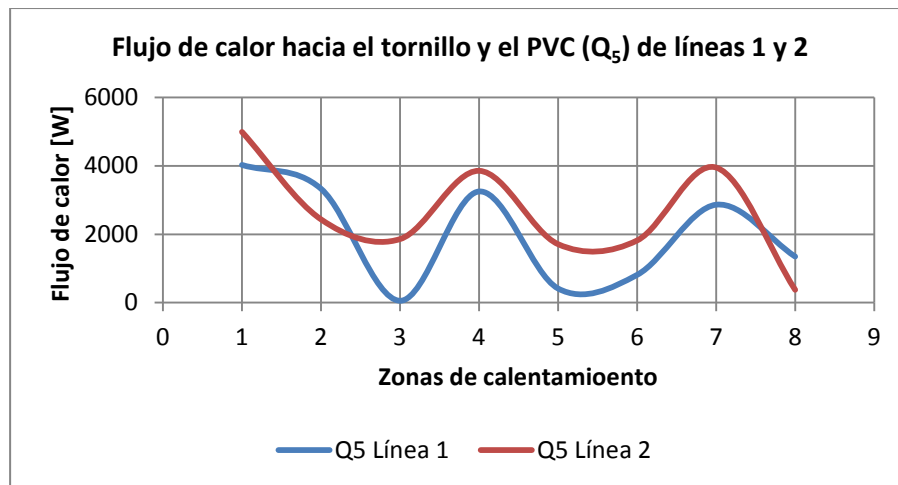


Figura 3- 15. Comparación de flujo de calor  $Q_5$  líneas 1 y 2

### 3.5.3 Comparación del flujo de calor por convección en la tina de enfriamiento

La tubería sanitaria que entra a la tina de la línea 2 transfiere 38.695 W y tubería Conduit la línea 1 transfiere al agua 7.416 W. Esto se debe a que la tubería Sanitaria es 3 veces más grande y dos veces más larga que la tubería Conduit, por lo tanto su área superficial es mayor. Como ya se demostró en los numerales anteriores los flujos por transferencia de calor aumentan cuando el área superficial aumenta. Así mismo la tina también es un tanto más grande y mucho más larga. Aunque el coeficiente de convección ( $h$ ) de la línea 2 (726) es más pequeño que el de la línea 1 (1385), la convección tiene mayor correlación con el área superficial de la tubería.

El modelo térmico se realiza como valor agregado de la inspección, ya que los termogramas que se verán la siguiente sección, denotan que hay alguna anomalía, pero por si solos no permiten caracterizar el problema, por ellos es pertinente y necesario realizar un análisis desde el punto de vista de la transferencia de calor, para aunarlo a los termogramas y lograr así un análisis completo de ingeniería.

## 4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El procedimiento experimental se divide en dos secciones: La primera de ellas se centra en la evaluación térmica de las discontinuidades presentadas en la tubería. Se analizan los defectos de cuatro (4) muestras producto manufacturado y tres (3) muestras de producto en proceso, relacionando los análisis térmicos con los análisis de causalidad mecánica de los defectos debidos al proceso de extrusión de PVC y a los componentes mecánicos y/o eléctricos de la extrusora, descritos en el numeral 2.4 de capítulo 2.

En la segunda sección a partir de la teoría del mantenimiento predictivo, se realiza un análisis estadístico de criticidad, de los componentes que han presentado fallas en el periodo de septiembre de 2014 a febrero de 2017 en la línea 1 de extrusión (Tubería Conduit), con el fin de obtener termogramas a través de un procedimiento de inspección de componentes mecánicos y eléctricos relevantes y/o críticos, para el mantenimiento y funcionamiento de la extrusora de la línea 1.

El procedimiento de inspección se desarrolla y realiza con los requerimientos del estándar ASTM E 1934-99a [44] (descrito en el anexo B) y es replicable a todas las líneas de extrusión de la empresa. Durante el procedimiento de inspección se obtendrán datos primarios en campo, observando las variables en su estado natural sin manipularlas, para analizar posteriormente los datos obtenidos, desde el punto de vista de la transferencia de calor y generar un diagnóstico de los componentes. Específicamente es un estudio longitudinal el cual recolecta datos en diferentes puntos a través del tiempo. Los datos obtenidos en campo, se tratan bajo estadística descriptiva, e inferencia estadística y/o pronóstico de datos, a través de la activación y uso del módulo de análisis de datos del Software Microsoft Excel para la estadística descriptiva y el uso de las funciones estadísticas de pronóstico y/o tendencia.

Es importante aclarar que la empresa No lleva un registro discriminado de los defectos encontrados en la tubería. Se registra mensualmente el total en kilogramos de tubería

defectuosa sin clasificarla por defectos. La tubería una vez es rechazada se lleva inmediatamente al área de molido y reciclaje. También es preciso mencionar que la cámara Termográfica usada (FLIR E5) tiene un rango de temperaturas tiene un rango de medición de -20°C a 250°C. Las temperaturas máximas registradas en la línea 1 son de 220°C. En la línea 2 algunos componentes pueden registrar temperaturas mayores a 250°C (fuera del rango de la cámara). Se realiza el procedimiento de inspección a la línea 1 el cual es replicable totalmente en la línea 2, puesto que las dos extrusoras poseen la misma estructura, variando únicamente las dimensiones del barril y el cabezal. (Allí algunas componentes registran temperaturas mayores a 250°C).

#### 4.1 ANÁLISIS TÉRMICO DE DISCONTINUIDADES EN TUBERÍAS DE PVC

Para el análisis de discontinuidades superficiales, se seleccionan muestras de tubería Conduit de ½" de diámetro y Sanitaria de 1½" de diámetro, fabricadas con PVC Celuplex y Poliplex, con defectos y discontinuidades diversas. Se seleccionan las muestras con base en dos criterios: a) Los modelos térmico-matemáticos fueron realizados para las extrusoras que fabrican este tipo de tubería, configuradas con los parámetros de presión y temperatura para esos diámetros y espesores. b) Con base en la estadística de tubos con defectos respecto a los fabricados durante el primer trimestre del año 2017.

Tabla 4-1. Tubos defectuosos primer trimestre del año 2017 Empresa Tuboplex.

TUBERIA SANITARIA						
DIAMETRO	CELUPLEX		%	POLIPLEX		%
	PRODUCCIÓN [Kg]	DEFECTUOSO [Kg]		PRODUCCIÓN [Kg]	DEFECTUOSOS [Kg]	
1 1/2"	11922	690	6%	13817	535	4%
2"	34314,4	1945	6%	62110	2238	4%
3"	76916	3605	5%	39776	2148	5%
4"	82556	3263	4%	48955	2198	4%
<b>TOTALES</b>	<b>205708,4</b>	<b>9503</b>	<b>5%</b>	<b>164658</b>	<b>7119</b>	<b>4%</b>
TUBERIA CONDUIT						
DIAMETRO	CELUPLEX		%	POLIPLEX		%
	PRODUCCIÓN [Kg]	DEFECTUOSO [Kg]		PRODUCCIÓN [Kg]	DEFECTUOSOS [Kg]	
1"	1553	90	6%	4471,5	465	10%
1/2"	34876	4443	13%	31050	2420	8%
3/4"	5841	770	13%	1562	250	16%
<b>TOTALES</b>	<b>42270</b>	<b>5303</b>	<b>13%</b>	<b>37083,5</b>	<b>3135</b>	<b>8%</b>

#### **4.1.1 Consideraciones y características de las mediciones**

Se deben tener en cuenta los siguientes aspectos en el momento de realizar las mediciones en la inspección termográfica:

- Todas las mediciones se realizaron con la cámara termográfica Flir E5, que tiene una resolución térmica de infrarrojo de 120 x 90 y un FOL de 7 mm.
- La difusividad térmica es menor para los materiales plásticos que para los metales, por lo tanto la velocidad de difusión de los plásticos es menor respecto a los metales. La efusividad térmica  $e = (k\rho c_p)^{1/2}$  es un indicador que mide la eficacia con la que una entrada de calor aplicada eleva la temperatura de un material [22]. La efusividad también es menor en los plásticos que en los metales. Una alta difusividad indica que el calor se extiende rápidamente, mientras que una alta efusividad expresa que el material no aumenta su temperatura fácilmente cuando se aplica calor.
- La inspección de los tubos se realizó a través de termografía activa cualitativa por inspección directa. Esto implica que los valores de emisividad y temperatura reflejada no son relevantes, ya que únicamente se visualiza el comportamiento de los defectos en el infrarrojo.
- Las muestras se sometieron a un estímulo externo a través de una flama a 120°C, durante 4 segundos, con el fin de evaluar y caracterizar térmicamente las discontinuidades y los procesos de transferencia de calor en la tubería.

#### **4.1.2 Termogramas de defectos superficiales y subsuperficiales de producto terminado**

Se inspeccionan 4 muestras de producto terminado a través de termografía activa (estímulo con flama) y 3 muestras de producto en proceso a través de termografía pasiva

**4.1.2.1 Análisis térmico de la muestra 1 con agujeros y poros.** En la figura 4-1a se observan las discontinuidades en la imagen visual digital del producto. En la figura 4-1b se muestra el termograma de las discontinuidades para el presente análisis

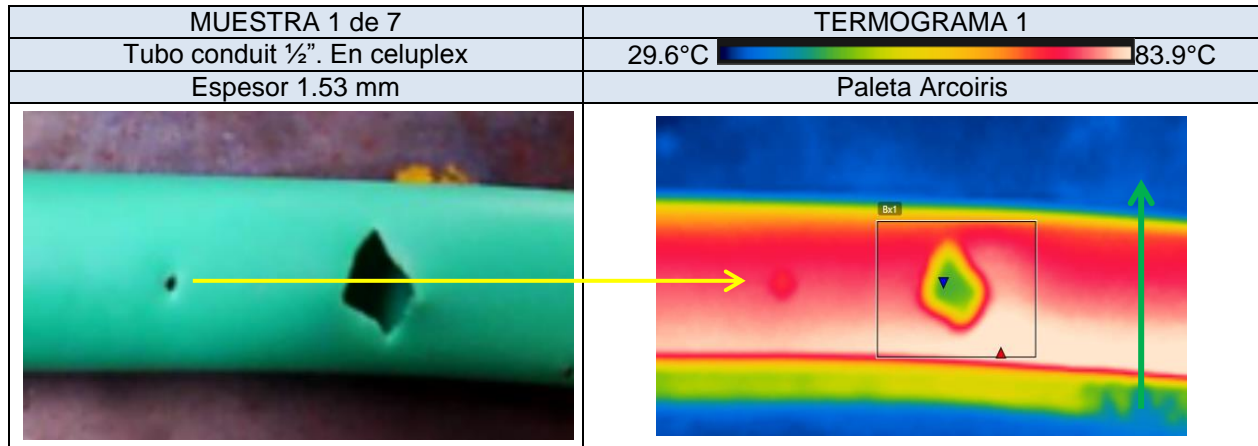


Figura 4-1 a) Imagen visual muestra 1; b) Termograma muestra1.

El termograma de la figura 4-1 ilustra un patrón de radiación del flujo de calor por conducción a lo largo del eje vertical o eje normal a la longitud del tubo (señalado con la flecha verde en el termograma), observable a través del gradiente de temperatura generado en la superficie del tubo. Gradiente que está en la misma dirección de la aplicación del estímulo externo.

Esta muestra presenta dos discontinuidades: Un agujero y un poro. Los agujeros son discontinuidades muy fáciles de apreciar a simple vista; interrumpen el flujo de calor por conducción en el tubo, así como la difusividad térmica. En los contornos de la geometría irregular del agujero, se observa un gradiente de temperatura presentado por tres (3) colores de la escala térmica (Blanco-rojo-amarillo) y tiene un diferencial de temperatura que va desde 78.7°C (triángulo rojo) hasta 58.1°C (triángulo azul). Por otro lado los poros son más difíciles de detectar porque pueden tener diámetros de órdenes de magnitud muy pequeños; los poros también presentan gradientes de temperatura. Ambas discontinuidades concentran flujos de calor debidos a los gradientes de temperatura, de manera homologa a como concentran esfuerzos mecánicos. Evitan la conformación homogénea del tubo y aumentan el gasto energético, su causalidad mecánica se describe en el numeral 2.4.5.

**4.1.2.2 Análisis térmico de la muestra 2 con grietas y marcas superficiales.** En la figura 4-2a se observan las discontinuidades en la imagen visual digital del producto. En la figura 4-2b se muestra el termograma de las discontinuidades para el presente análisis.

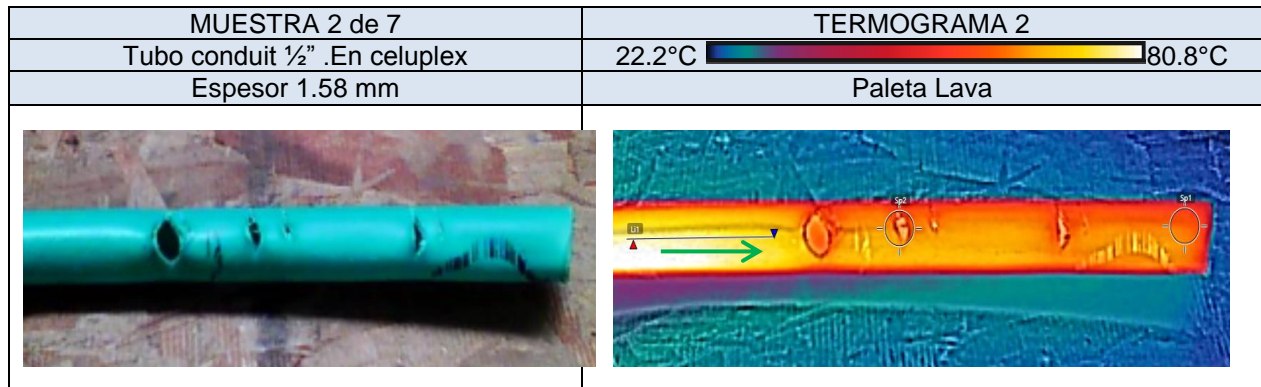


Figura 4-2 a) Imagen visual muestra 2; b) Termograma muestra 2.

El termograma de la figura 4-2 ilustra un patrón de flujo de calor por conducción, a lo largo del eje transversal y en la misma dirección del estímulo externo (eje longitudinal señalado con la flecha verde en el termograma). En la parte izquierda inferior del termograma (área de aplicación del estímulo térmico) se hacen observables los conceptos de difusividad y efusividad térmica. El patrón de radiación muestra que el calor tarda en difundirse en el tubo, pero el estímulo aplicado eleva rápidamente la temperatura del área. Esta muestra presenta cuatro tipos diferentes de discontinuidades: un agujero, dos grietas, un poro y marcación incorrecta del tubo.

La muestra se encuentra inicialmente a temperatura ambiente de 22 °C, posteriormente se calienta paulatinamente a través de una flama hasta los 81 °C. A los 30 °C los defectos se vuelven apreciables desde el punto de vista térmico. El ancho de la grietas aumenta proporcionalmente con la temperatura, es decir se hacen más grandes y empeoran su aspecto a medida que la temperatura se eleva. La marcación incorrecta del tubo se aprecia fácilmente en la parte derecha inferior de las dos imágenes; la tinta al tener un mayor valor de emisividad que el PVC, tiene mayor radiación térmica por ende mayor temperatura y crea un contraste fácilmente apreciable en el termograma. Se describe la causalidad mecánica de las grietas y marcas en la superficie en el numeral 2.4.2.

#### 4.1.2.3 Análisis térmico de la muestra 3 con degradación y conformación Incompleta.

En la figura 4-3a se observan las discontinuidades en la imagen visual digital del producto.

En la figura 4-3b se muestra el termograma de las discontinuidades para el presente análisis.

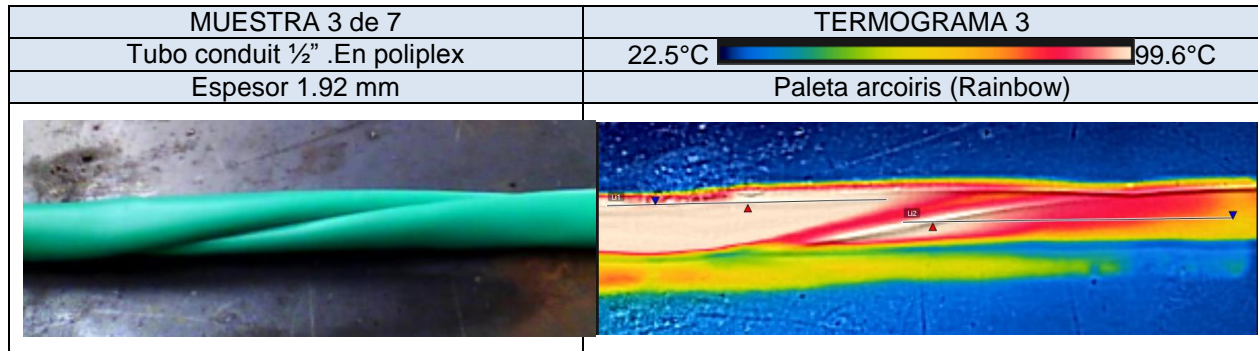


Figura 4-3 a) Imagen visual muestra 3; b) Termograma muestra 3.

La muestra de la figura 4-3 muestra degradación y deficiente conformación. La principal característica térmica de este defecto es que la difusividad térmica y el flujo de calor por conducción se ven interrumpidos en el área donde el material se trenza, creando un diferencial de temperatura de 48°C (99.5°C marcado por el triángulo rojo menos 51.8°C marcado por el triángulo azul). La difusividad térmica es heterogénea a lo largo tubo y los gradientes de temperatura parciales, crean diversos flujos de calor de diferente magnitud en el tubo. Flujos que evitan la conformación homogénea y completa del tubo. La causalidad mecánica de la degradación se describe en el numeral 2.4.6.

La tubería fabricada en Poliplex por su mayor densidad y espesor, muestra patrones de radiación más intensos con mayores valores de temperatura en comparación con los registrados en los tubos fabricados en material Celuplex.



**4.1.2.4 Análisis térmico de la muestra 4 con agujeros subsuperficiales.** Para el desarrollo del experimento se usa un trozo de tubo sanitario de 3" de diámetro y 3.18 mm de espesor, fabricado en material PVC Poliplex. Se realizan 3 agujeros no pasantes de 2,3mm, 2.6 mm y 2.8mm de profundidad aproximadamente. Se usa como estímulo externo una lámpara halógena de 400 W sobre la cara interna del tubo durante 30 segundos, llevando la muestra hasta una temperatura de 78°C. Se retira el estímulo y se toman termogramas sucesivos cada vez que la temperatura disminuye 5 °C.

En la figura 4-4a se observan las discontinuidades en la imagen visual digital del producto. En la figura 4-4b se muestra el termograma de las discontinuidades para el presente análisis.

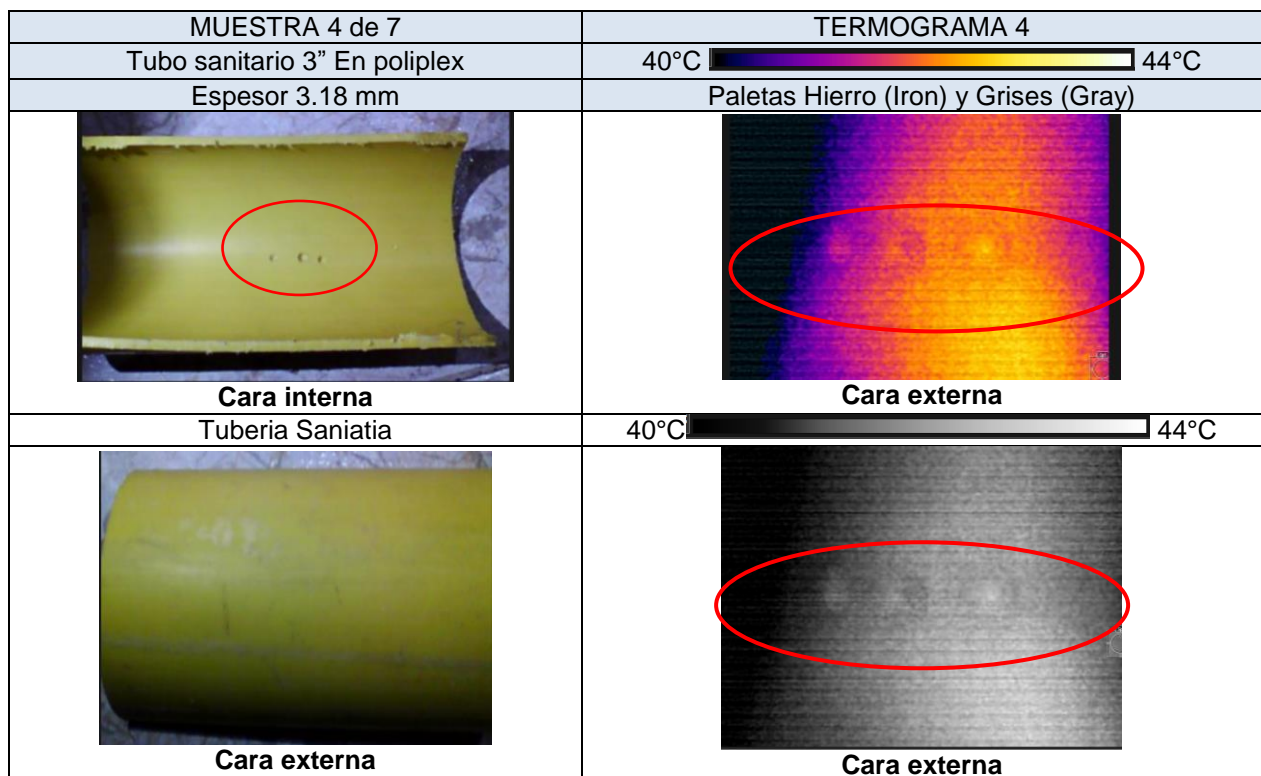


Figura 4-4 a) Imágenes visuales muestra 4; b) Termogramas muestra 4.

La termografía infrarroja también puede detectar defectos subsuperficiales, aprovechando que la transferencia de calor hacia la superficie en dirección del vector normal al eje longitudinal del tubo, los hace levemente visibles. En el termograma los defectos se hacen visibles cuando la temperatura baja unos 44°C, esto se debe a que los agujeros son concentradores de calor y el perímetro superficial del hoyo actúa como un acumulador de energía térmica, mostrándose más caliente respecto del resto del tubo

una vez la temperatura disminuye. Entre más cerca está el defecto a la superficie hay mayor probabilidad de ser registrado por la cámara termográfica.

#### 4.1.3 Termogramas de defectos superficiales de producto en proceso

Estas muestras se inspeccionan con termografía pasiva porque el tubo no requiere estímulo, puesto que sale con energía térmica y calor transferidos por el barril y el cabezal de la extrusora.

**4.1.3.1. Análisis térmico de la muestra con deformación y degradación de la tubería la salida del cabezal y entrada a la tina de enfriamiento.** En la figura 4-5a se observan las discontinuidades en la imagen visual digital del producto. En la figura 4-5b se muestra el termograma de las discontinuidades para el presente análisis.



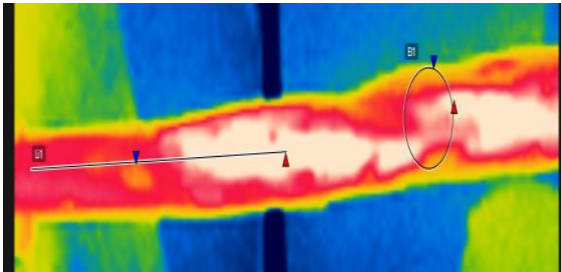

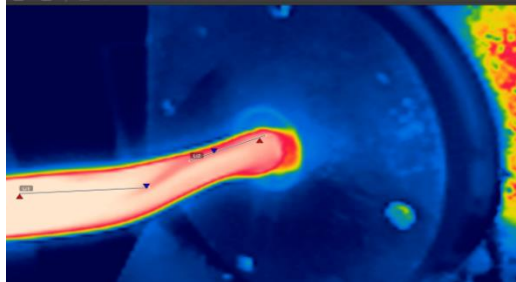
MUESTRA 5 de 7	TERMOGRAMA 5
Tubo conduit 1/2" .En celuplex	25°C  201°C
Espesor 1.95 mm	Paleta Arcoiris (Rainbow)
Muestra a la salida del cabezal	Muestra a la salida del cabezal
	
Muestra a la entrada de la tina de enfriamiento	Muestra a la entrada de la tina de enfriamiento
	

Figura 4-5 a) Imagen visual muestra 5; b) Termograma muestra 5.

La muestra está en el área de transición entre el cabezal y la tina de enfriamiento (zona 9). Este defecto se genera por dos razones. La primera de ellas es que está obstruida la manguera que provee el flujo de agua para el choque térmico inicial y adicionalmente la tina tiene un nivel bajo de agua. La segunda son los diferentes y amplios gradientes de temperatura que se presentan a lo largo de la tubería. La línea 1 de medición registra un diferencial de temperatura de 11.2°C (Triangulo rojo - Triangulo azul) y la segunda un diferencial de 5.5°C. Estos diferenciales crean flujos de calor disímiles en magnitud y sentido, consecuencia de la irregularidad geométrica que presenta.

**4.1.3.2 Análisis térmico de la muestra 6 con rugosidad de la tubería a la salida de la tina.** En la figura 4-6a se observan las discontinuidades en la imagen visual digital del producto. En la figura 4-6b se muestra el termograma de las discontinuidades para el presente análisis.

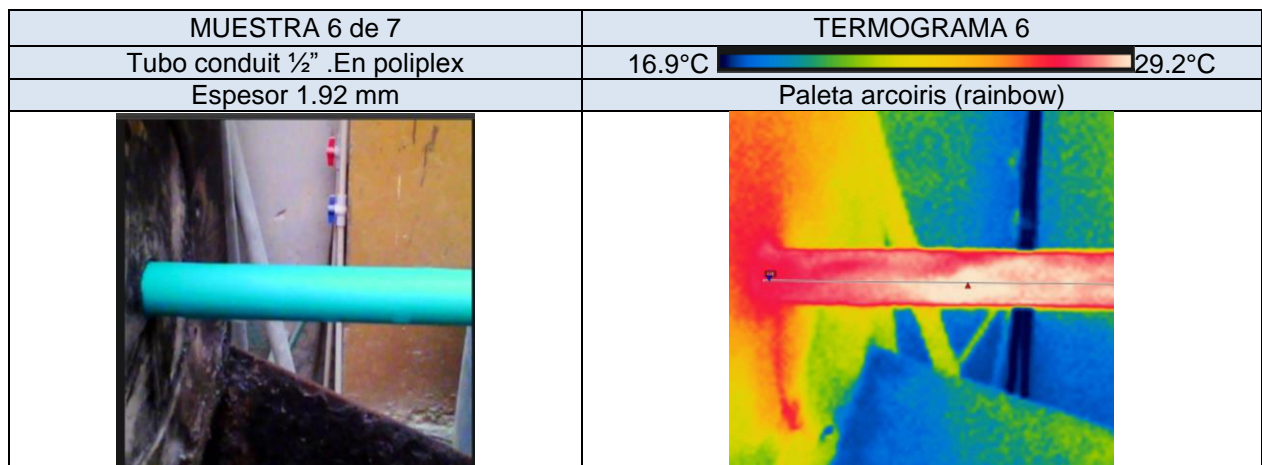


Figura 4-6. a) Imagen visual muestra 6; b) Termograma muestra 6.

La muestra sale de la tina después de realizarse sobre ella, un proceso de enfriamiento por convección forzada el cual disminuye la temperatura de 190°C a 30°C. Si el nivel del agua, la velocidad del agua en la tina y la velocidad con la que el tubo atraviesa la tina no son adecuadas, se genera una rugosidad superficial que a veces es apreciable a simple vista, pero en el caso de esta muestra solo es apreciable a través de un patrón de radiación no homogéneo, como ilustra el termograma. Esta rugosidad aumenta la mojabilidad del tubo, puesto que al tener una rugosidad microscópica es menos eficiente para repeler agentes ácidos.

**4.1.3.3 Análisis térmico muestra 7. Muestra sin defectos a la salida del cabezal.** En la figura 4-7a se observan las discontinuidades en la imagen visual digital del producto. En la figura 4-7b se muestra el termograma de las discontinuidades para el presente análisis. Esta muestra no presenta ninguna discontinuidad ilustra un patrón de radiación homogéneo. Sirve como patrón de referencia para detección de discontinuidades.

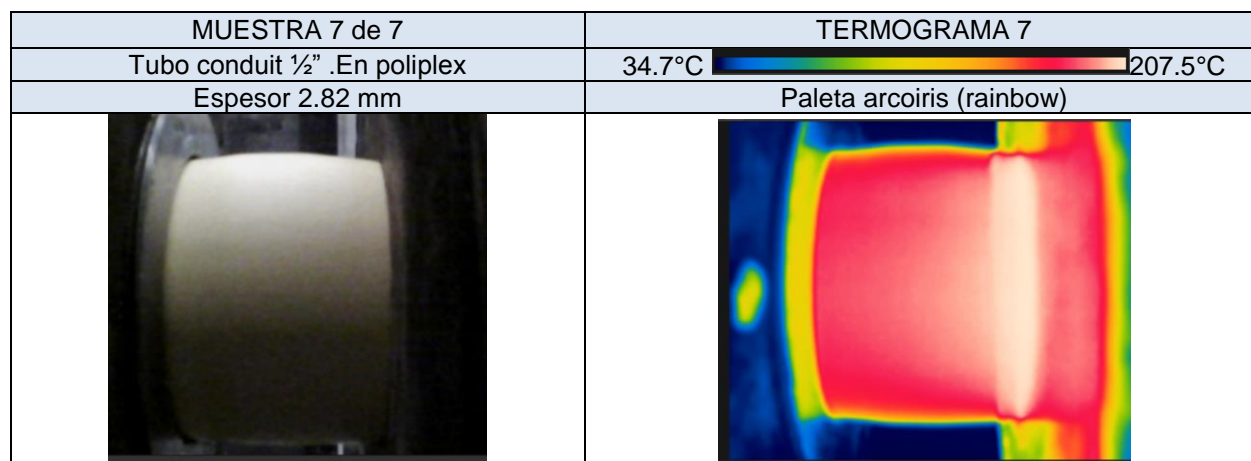


Figura 4- 7. a) Imagen visual muestra 7; b) Termograma muestra 7.

## 4.2 INSPECCIÓN DE LOS COMPONENTES DE LA EXTRUSORA DE LA LÍNEA 1 DE EXTRUSIÓN

Consideraciones para la inspección de componentes y sistemas de la línea 1:

- Se realizan 9 inspecciones periódicas (con 10-12 días de diferencia). Correspondiente a un trimestre de operación.
- La extrusora tiene un régimen trabajo elevado, está en funcionamiento 24 horas al día de lunes a sábado.
- La producción es irregular ya que se fabrican tubos de distintos espesores y diámetros cada día, pero el funcionamiento y configuración mecánica de la extrusora es igual para todos los productos.

### 4.2.1 Análisis de criticidad

El análisis de criticidad es una metodología que permite establecer la prioridad de mantenimiento para procesos, sistemas y/o equipos, creando una estructura que facilita que la toma de decisiones sea acertada y efectiva. Los criterios más relevantes que se tienen en cuenta para realizar un análisis de criticidad están asociados con: Producción, costo de mantenimiento, frecuencia de fallas y tiempo de reparación. Relacionando estos criterios en una ecuación matemática llamada: Ecuación de criticidad [1].

$$\text{Criticidad} = \text{Frecuencia} \times \text{Consecuencia}$$

Ec (4-1)

Donde:

Frecuencia = Ocurrencia en un periodo de tiempo

Consecuencia = a + b

a = Flexibilidad operacional x Impacto operacional

b = Costo de mantenimiento.

En la Tabla 4-2, se muestran los criterios de evaluación de las criticidades y su ponderación matemática.

Tabla 4-2. Criterios de evaluación de la criticidad [1]

<b>FRECUENCIA DE FALLAS</b>	
Una diaria	10
Una semanal	8
Una mensual	5
Una trimestral	2
Una semestral	1
<b>FLEXIBILIDAD OPERACIONAL</b>	
No hay repuesto y no se puede producir	10
Se requiere compra del repuesto	5
Generalmente hay repuesto en almacén	2
No requiere repuesto	1
<b>IMPACTO OPERACIONAL</b>	
Para total de la maquinaria por un día o más	10
Para total de la maquinaria por horas	6
Para total de la maquinaria por minutos	3
No se requiere parar la maquinaria	1
<b>COSTO DEL MANTENIMIENTO</b>	
Mayor o igual a 100 mil pesos	10
Menor a 100 mil pesos	5

Se realiza un análisis de criticidad en los registros de mantenimiento de la empresa (Ver anexo D), utilizando los criterios de la tabla 4-2 y bajo los conceptos descritos en el numeral 4.2. Se listan en la tabla 4-3 los componentes que según su nivel de criticidad pueden presentar fallas en un futuro cercano (1 a 8 semanas).

Tabla 4- 3. Criticidad de mantenimiento para componentes de la línea 1 de extrusión

ÁREA / COMPONENTE	CRITICIDAD	ÁREA / COMPONENTE	CRITICIDAD
RAC eléctrico	80	Cabezal de Conformación	44
Acampanador	80	Halador	44
Caja reductora	60	Barril	32
Tolva de alimentación	55	Motor principal	32
Tina de enfriamiento	55	Marcador	11
Sierra	55	Botador	11

#### 4.2.2 Procedimiento de inspección bajo el Estándar ASTM E 1934-99a

**4.2.2.1 Título.** Inspección de una extrusora de tubería en PVC, utilizando la técnica de termografía infrarroja

**4.2.2.2 Objetivo.** Establecer las actividades necesarias para ejecutar una inspección por termografía infrarroja, de los componentes mecánicos y eléctricos de la línea de extrusión 1 en la Empresa Tuboplex, con base en el documento técnico ASTM E 1934-99a. Con el fin de detectar anomalías que afecten el funcionamiento de la máquina y en consecuencia una mala conformación de la tubería.

**4.2.2.3 Alcance.** Con base en el valor de criticidad obtenido, la facilidad de acceso físico al componente y los parámetros de seguridad, se eligen los siguientes componentes para inspección:

- RAC eléctrico (ver figura 2-14)

- Tolva de alimentación y sus componentes (ver figura 2-3)
- Motor principal (ver figura 2-8)
- Barril (ver figura 2-7)
- Cabezal de conformación (ver figura 2-10)
- Halador y sus componentes (ver figura 2-12)
- Acampanador (ver figura 2-13)

La caja reductora no se inspecciona porque por su ubicación, el acceso a ella es difícil y peligroso. Adicionalmente no permite una inspección directa porque la estructura que la encierra permanece sellada. La tina de enfriamiento no se inspecciona porque está llena con agua a baja temperatura y como se explicó en los principios físicos, el agua no permite el paso de radiación infrarroja, por ende la cámara termográfica no registra energía térmica alguna. La sierra no se analiza porque tiene discos dentados de corte expuestos, el acceso es difícil y reviste bastante riesgo para el termógrafo al acercarse a ella. El marcador y el botador no se inspeccionan por su bajo nivel de criticidad, el cual expresa bajo impacto en el mantenimiento de la extrusora.

#### **4.2.2.4 Documentos técnicos de referencia.**

Esta documentación se describe en el anexo B del documento

- ASTM E 1934-99a Standard Guide for Examining Electrical and Mechanical Equipment with Infrared Thermography. [44]
- ASTM E1862 - 14 Standard Practice for Measuring and Compensating for Reflected Temperature Using Infrared Imaging Radiometers. [45]
- ASTM E1933 - 14 Standard Practice for Measuring and Compensating for Emissivity Using Infrared Imaging Radiometers. [46]
- ISO 18434-1 “Condition monitoring and diagnostics of machines – Thermography”. [48]

#### 4.2.2.5 Nomenclatura.

$T_{\text{Ref}}$ : Temperatura reflejada

$\epsilon$ : Emisividad

$\Delta T$ : Delta de temperatura

IR: Infrarrojo

**4.2.2.6 Responsabilidades y calificación del personal.** Ingeniero NDT en Termografía Nivel I: Ejecutar un paneo a los componentes a inspeccionar verificando las imágenes térmicas registradas a través de la cámara infrarroja, de todos sus componentes. Analizar y grabar los termogramas, tomar los respectivos registros fotográficos y diligenciar los formatos de registro.

#### 4.2.2.7 Materiales de los componentes y ruta de inspección:

**1** RAC eléctrico de la extrusora:

- a. Alambres de cobre (oxidado)  $\epsilon=0.76$
- b. Aislantes plásticos  $\epsilon=0.92$

**2** Bomba de alimentación de la tolva:

- a. Carcaza metálica en hierro gris FC 200 ;  $\epsilon=0.66$

**3** Vibrador de la tolva:

- a. Carcaza metálica en hierro gris FC 200;  $\epsilon=0.66$

**4** Motor del barril y su eje:

- a. Carcaza metálica en hierro gris FC 200 para la carcaza;  $\epsilon=0.66$
- b. Eje en acero AISI 4140;  $\epsilon=0.78$

**5** Barril:

- a. El material del barril es acero 38CrMoAl (oxidado);  $\epsilon=0.78$

**6** Cabezal y sus dos zonas de calentamiento:

- a. Acero 38CrMoAl (oxidado);  $\epsilon=0.78$



**7 Halador:**

- a. Materiales en hierro y acero oxidados;  $\epsilon=0.66$

**8 Acampanador**

- a. Materiales en hierro oxidado;  $\epsilon=0.66$
- b. Materiales en acero oxidado;  $\epsilon=0.78$
- c. Correas de caucho;  $\epsilon=0.89$

**4.2.2.8 Técnica usada.** Inspección directa por termografía infrarroja, pasiva cuantitativa y cualitativa.

**4.2.2.9 Equipo.** Cámara Termográfica marca FLIR, referencia E5. Resolución térmica 120 x 90, rango de temperatura -20°C a 250°C, Fol 7mm.

**4.2.2.10 Descripción del ensayo**

- **Paso 1:** Establecer un rango de temperatura que incluya aquellas temperaturas que se espera medir.
  
- **Paso 2:** Posición y campo de visión:
  - ✓ Comprobar los reflejos (moverse, si es necesario).
  - ✓ Comprobar la resolución del puntero, tamaño/detalle (acercarse, si es necesario y es posible según normas de seguridad).
  
- **Paso 3:** Medir e introducir en la cámara, las distancias a la que se van a tomar los termogramas del objeto a inspeccionar
  
- **Paso 4:** Enfocar la imagen.
  
- **Paso 5:** Medir, compensar e Introducir los siguientes parámetros en la cámara siguiendo los procedimientos de los estándares ASTM del anexo C:

- ✓ Emisividad.
- ✓ Temperatura reflejada
  
- **Paso 6:** Guardar las imágenes visibles y térmicas (termogramas).
  
- **Paso 7:** Analizar la indicaciones y/o hallazgos en los termogramas, con un software especializado, bajo criterios de aceptación y/o rechazo.
  
- **Paso 8.** Generar los reportes de los hallazgos y anomalías encontradas.

**4.2.2.11 Interpretación de imágenes e indicaciones.** Para la interpretación se utiliza el software gratuito de análisis FLIR Tools que provee el fabricante de la cámara. FLIR Tools está compuesto por un conjunto de software especialmente diseñado para analizar termogramas y crear informes de inspección. Características principales del software:

- Importa las imágenes de la cámara al equipo.
- Permite trabajar y manipular el termograma y la imagen visual.
- Dispone herramientas de medición en cualquier punto de la imagen infrarroja tales como: Círculos, cuadrados, líneas, puntos o spots, temperatura máxima, mínima y promedio de una región o área.
- Permite modificar los parámetros de emisividad y temperatura reflejada tomados en campo.
- Permite cambiar la paleta de colores para optimizar análisis. Tiene 7 paletas de medición
- Permite acotar el rango de temperatura (Span y nivel) para facilitar la detección de discontinuidades.
- Crea y edita informes en PDF o Word con las imágenes que se seleccionen.
- Ordena los archivos por fecha, grupos ordenados por ruta y grupos ordenados por fecha.

**4.2.2.12 Normas de seguridad.** Se debe hacer uso de los elementos de protección personal como: Botas de seguridad dieléctricas, guantes dieléctricos, casco, gafas, protección auditiva

y ropa adecuada para trabajos eléctricos. Se deben cumplir con todas las normas de seguridad estipuladas por el cliente y HSEQ o SMS<sup>11</sup>, tanto para inspección eléctrica como inspección mecánica.

- **Normas de seguridad para Inspección eléctrica.**

- El Termógrafo utilizará los EPP<sup>12</sup> adecuados para la apertura de tableros (guantes dieléctricos, casco y gafas de seguridad).
- El Termógrafo después de abrir los tableros y/o caja de bornes de los motores eléctricos se ubicará a un lado y mantendrá una distancia de seguridad (1,10 m) del tablero o caja de bornes ya que este maneja 220 V. Según tabla 4-3

- **Normas de seguridad para Inspección mecánica.**

- El termógrafo debe utilizar los EPP adecuados (Casco y gafas de seguridad, guantes, botas de seguridad, y protección auditiva).
- El ingeniero termógrafo se ubicará a un lado del equipo mecánico, teniendo en cuenta el espacio y la geometría de su ubicación; además mantendrá una distancia de seguridad (1 a 2 m).

Tabla 4- 4. Límites de aproximación a partes energizadas de equipos [28]

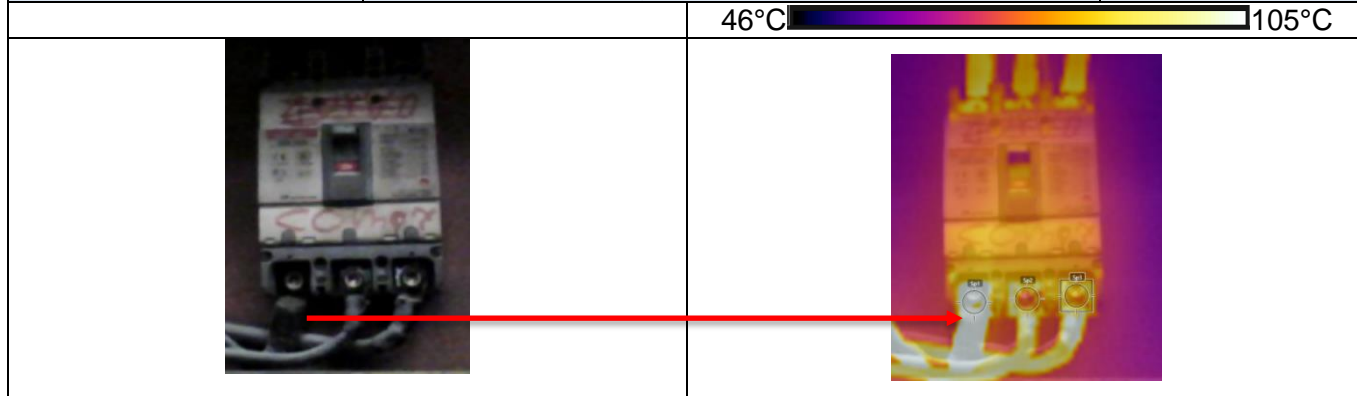
Tensión nominal del sistema (fase-fase)	Límite de aproximación seguro (m)		Límite de aproximación restringida (m) Incluye movimientos involuntarios.	Límite de aproximación técnica (m)
	Parte móvil expuesta	Parte fija expuesta		
51V – 300V	3.00	1.10	Evitar contacto	Evitar contacto
301V-750V	3.00	1.10	0.30	0.025
751V-15kV	3.00	1.50	0.66	0.18

<sup>11</sup> "Safety Management System"

<sup>12</sup> Elementos de Protección Personal

#### 4.2.2.13 Termograma breaker principal del RAC eléctrico

EMPRESA	TUBOPLEX S.A BOGOTÁ- BARRIO CARVAJAL	PALETA: IRON
DESCRIPCIÓN UBICACIÓN	PLANTA ÁREA DE EXTRUSIÓN	CÁMARA: FLIR E 5
EQUIPO Y ELEMENTO	BREAKER PRINCIPAL LÍNEA 1 DE EXTRUSIÓN	FECHA: 4MAY17
TIPO DE INSPECCIÓN	TERMOGRAFÍA DIRECTA, PASIVA Y CUANTITATIVA	HOJA: 1 de 13



**Evaluación:** Se evidencia suciedad y oxidación en bornes de Conexión

**Evaluación:** Hay una temperatura elevada y un patrón de radiación intenso en la FASE 1 (Spot 1). Comparando el valor de temperatura del Spot 1 con la medición del Spot 2 (FASE 2) hay un diferencial de 37.1°C.

#### Análisis Térmico

CLASIFICACIÓN DE FALLA	
Δt o/s	37.1 °C
Condición	Deficiencia Peligrosa
Resolución de IR	120 x 90
Lente	Fol 7mm

ITEM	VALOR
Emisividad	0.76
Distancia	1 m
Trefl	29 °C
Sp1 FASE 1	104.6°C
Sp2 FASE 2	67.5°C
Sp3 FASE 3	77.3°C

Para efectos de clasificación de fallas se manejan los siguientes criterios, teniendo en cuenta los criterios de la NETA,

\* O/S: Temperatura Over Similar – O/A: Temperatura Over/Ambient

DELTA DE TEMPERATURA	CLASIFICACIÓN	CONDICIÓN
1°C – 10°C O/A ó < 3°C O/S	En buen estado	BUENO
11°C–20°C O/A y 3°C a 15°C O/S	Probable deficiencia	ACEPTABLE
21°C–40°C O/A y >15°C O/S	Deficiencia	INSATISFACTORIA
>40°C O/A y >15°C O/S	Deficiencia mayor	PELIGROSA

#### Estadística y pronóstico

Se registraron 9 datos correspondientes a 9 periodos de tiempo (10 a 12 días de intervalo), correspondientes a los diferenciales de temperatura, obtenidos en el breaker principal del RAC eléctrico. Se analizan estos datos bajo estadística descriptiva, y se realiza un pronóstico para el periodo 10.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
33.1°C	29.6	26.3°C	30.6°C	24.6°C	23.9°C	27.8	34.6.	37.1

Mediana=28.7; Desviación estándar=4.67; Varianza=21.88.5; Coeficiente de asimetría 0.60; Curtosis =-0.67; Rango=13.2;

**PRONÓSTICO PERIODO 10 = 32.08.°C.** Es decir se espera un diferencial de 32°C para la primera semana de segundo trimestre

#### Diagnóstico y recomendaciones

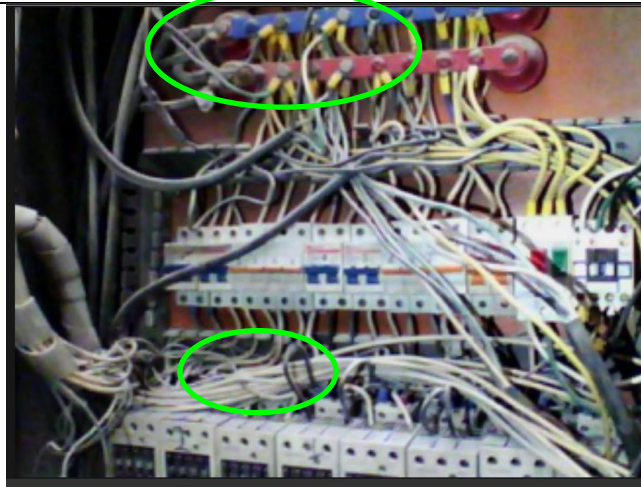
**Diagnóstico:** Una vez realizada la inspección por el método de termografía pasiva, se observa un delta de temperatura de 37°C entre fases del Breaker principal del RAC eléctrico de la extrusora y un delta mayor de 40°C, al compararlo con el Breaker de la línea 2. Hay desbalance de las cargas eléctricas lo cual puede tener dos causas: Diseño incorrecto de la línea de automatización, o mala conexión por excesiva oxidación, corrosión y suciedad.

**Recomendación:** Acción correctiva inmediata, desconectar alambres y limpiar conectores. Así mismo revisar el balance de cargas eléctricas desde el diseño

### 4.2.2.14 Termograma de borneras y contactores del RAC eléctrico

<b>EMPRESA</b>	TUBOPLEX S.A BOGOTÁ- BARRIO CARVAJAL	<b>PALETA:</b> ARCOIRIS
<b>DESCRIPCION UBICACION</b>	PLANTA ÁREA DE EXTRUSIÓN	<b>CÁMARA:</b> FLIR E 5
<b>EQUIPO Y ELEMENTO</b>	BORNERAS Y CONTACTORES RAC ELECTRICO LINEA1.	<b>FECHA:</b> 20ABRIL17
<b>TIPO DE INSPECCIÓN</b>	TERMOGRAFIA DIRECTA, PASIVA Y CUALITATIVA	<b>HOJA:</b> 2 de 13

46.5°C  74.7°C



**Evaluación:** El cableado está entrelazado en las borneras y contactores de los automatismos eléctricos.

**Evaluación:** La bornera 2 (spot 2) tiene una diferencia de 2.8°C respecto a la bornera1 (spot 1). El contactor principal de la zona 3 (Spot3) presenta un diferencial de temperatura 13.8°C respecto a los contactores de las otras 7 zonas (Spot4).

#### Análisis Térmico

CLASIFICACIÓN DE FALLA	
Δt o/s	13.8 °C
Condición	Deficiencia Aceptable
Resolución de IR	120 x 90
Lente	Fol 7mm

ITEM	VALOR
Emisividad	0.92
Distancia	1 m
Trefl	30 °C
Sp1 BORNERA 1	67.3°C
Sp2 BORNERA 2	70.1°C
Sp3 CONTACTOR Z3	69.6°C
Sp4 OTRAS ZONAS	55.1°C

Para efectos de clasificación de fallas se manejan los siguientes criterios, teniendo en cuenta los criterios de la NETA,

\* O/S: Temperatura Over Similar – O/A: Temperatura Over/Ambient

DIFERENCIAL DE	CLASIFICACION	CONDICIÓN
1°C – 10°C O/A ó < 3°C O/S	En buen estado	BUENO
11°C–20°C O/A y 3°C a 15°C O/S	Probable deficiencia	ACEPTABLE
21°C–40°C O/A y >15°C O/S	Deficiencia	INSATISFACTORIA
>40°C O/A y >15°C O/S	Deficiencia mayor	PELIGROSA

#### Diagnóstico

El RAC presenta diferencias de temperatura aceptables entre las borneras 1 y 2. Así mismo entre el contactor de la zona 3 y los contactores de las otras 7 zonas. Aunque son aceptables el consumo de energía es mayor en la zona 3 y por ende el consumo eléctrico. Los cables trenzados y cableados incorrectamente producen interferencia en las señales digitales. Interferencias producidas por los campos magnéticos generados por el flujo de corriente en los conductores.

#### Recomendaciones

Se recomienda acción correctiva en parada de mantenimiento preventivo, desconectar el alambre y limpiar conectores. Así mismo revisar el balance de cargas eléctricas desde el diseño

#### 4.2.2.15 Termograma bomba de la tolva de alimentación

<b>EMPRESA</b>	TUBOPLEX S.A BOGOTÁ- BARRIO CARVAJAL	<b>PALETA:</b> ARCOIRIS
<b>DESCRIPCIÓN UBICACIÓN</b>	PLANTA ÁREA DE EXTRUSIÓN	<b>CÁMARA:</b> FLIR E 5
<b>EQUIPO Y ELEMENTO</b>	BOMBA TOLVA DE ALIMENTACIÓN LINEA 1 DE EXTRUSIÓN	<b>FECHA:</b> 04MAY17
<b>TIPO DE INSPECCIÓN</b>	TERMOGRAFIA INDIRECTA, PASIVA Y CUANTITATIVA	<b>HOJA:</b> 3 de 13

21.9°C  40°C



**Evaluación:** Se aprecia acumulación de gránulos finos de PVC en las aletas disipadoras de calor de la carcasa.

**Evaluación:** Se registra el patrón térmico de la bomba para futuras comparaciones de mantenimiento y se obtiene una temperatura de 38.2 °C

#### Análisis Térmico

CLASIFICACIÓN DE FALLA	
Δt o/s	N/A
Condición	PROBABLE DEDICIENCIA
Resolución de IR	120 x 90
Lente	Fol 7mm

ITEM	VALOR
Emisividad	0.66
Distancia	3 m
Trefl	26 °C
Sp1 FASE 1	38.2 °C

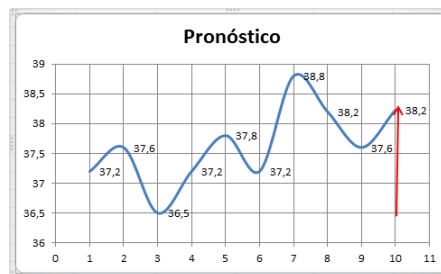
#### Estadística y pronóstico

Se registraron 9 datos correspondientes a 9 periodos de tiempo (10 a 12 días de intervalo), de la temperatura obtenida en las aletas disipadoras de calor en la carcasa de la bomba de la tolva. Se analizan bajo estadística descriptiva, y se realiza un pronóstico para el periodo 10.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
37.2	37.6	36.5	37.2	37.8	37.2	38.8	38.2°C	37.6°C

Mediana=37,6; Desviación estándar=0.69; Varianza=0.48; Coeficiente de asimetría 0.20; Curtosis =-0.57; Rango= 2,3;

**PRONOSTICO PERIODO 10 = 38.23 °C.** Es decir se espera un diferencial de 38.23°C para la primera semana de segundo trimestre y se infiere un aumento de 0.4°C por trimestre



#### Diagnóstico y recomendaciones

**Diagnóstico:** La bomba presenta un buen estado de funcionamiento durante el trimestre, se presenta una pequeña elevación de la temperatura debida a la acumulación de gránulos de PVC en las aletas disipadoras de la carcasa de la bomba. Los problemas operacionales no se deben a la temperatura sino a la obstrucción de los ductos que transportan el PVC hacia la tolva.

**Recomendación:** Retirar cada mes el PVC acumulado en las aletas disipadoras y verificar la acumulación de PVC granulado en los ductos.

### 4.2.2.16 Termograma vibrador de la tolva de alimentación

<b>EMPRESA</b>	TUBOPLEX S.A BOGOTÁ- BARRIO CARVAJAL	<b>PALETA:</b> ARCOIRIS
<b>DESCRIPCIÓN UBICACION</b>	PLANTA ÁREA DE EXTRUSIÓN	<b>CÁMARA:</b> FLIR E 5
<b>EQUIPO Y ELEMENTO</b>	VIBRADOR DE LA TOLVA	<b>FECHA:</b> 8ABR17
<b>TIPO DE INSPECCIÓN</b>	TERMOGRAFIA INDIRECTA , PASIVA Y CUANTITATIVA	<b>HOJA:</b> 4 de 13

16°C  62°C



**Evaluación:** La carcasa esta oxidada y presenta acumulación de gránulos de PVC.

**Evaluación:** No hay discontinuidades relevantes. Se establece la imagen como patrón de referencia para comparaciones de mantenimiento futuras.

#### Análisis Térmico

CLASIFICACIÓN DE FALLA	
$\Delta t$ o/s	N/A
Condición	Buen estado
Resolución de IR	120 x 90
Lente	Fol 7mm

ITEM	VALOR
Emisividad	0.66
Distancia	3 m
Trefl	32 °C
Sp1 FASE 1	61.2 °C

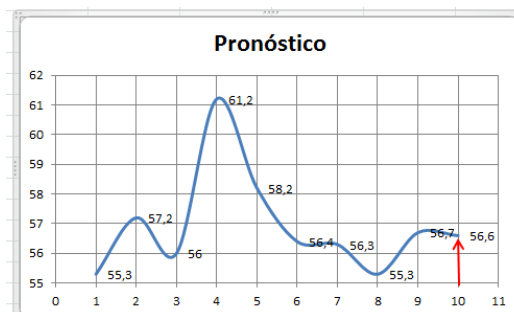
#### Estadística y pronóstico

Se registraron 9 datos correspondientes a 9 periodos de tiempo (10 días), de la temperatura obtenida en la carcasa de vibrador de la tolva. Se analizan bajo estadística descriptiva, y se realiza un pronóstico para el periodo 10.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
55.3	57.2	56°C	61.2	58.2	56.4	56.3	55.3	56.7

Mediana=56.5; Desviación estándar=1.84; Varianza=3.39; Coeficiente de asimetría 1.76; Curtosis =-3.49; Rango= 5.9;

**PRONÓSTICO PERIODO 10 = 56.6 °C.** Es decir se infiere una temperatura de 56.6°C para la primera semana de segundo trimestre. Acorde a la temperatura promedio de funcionamiento



#### Diagnóstico y recomendaciones

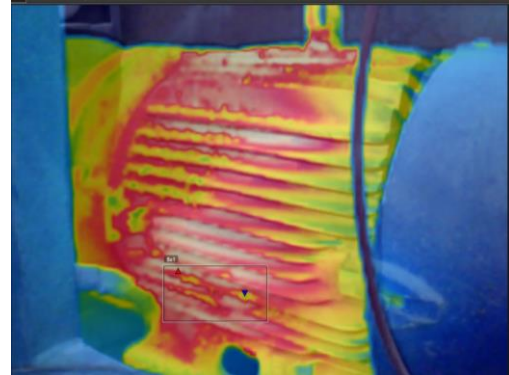
**Diagnóstico:** El vibrador presenta un buen estado de funcionamiento durante el trimestre, se presentó una elevación atípica de la temperatura en el periodo 4. Pero en general se mantiene la temperatura dentro de los rangos operacionales.

**Recomendación:** Realizar mantenimiento preventivo para revisar la elevación atípica del periodo 4.

#### 4.2.2.17 Termograma motor principal de la extrusora

<b>EMPRESA</b>	TUBOPLEX S.A BOGOTÁ- BARRIO CARVAJAL	<b>PALETA:</b> ARCOIRIS
<b>DESCRIPCIÓN UBICACIÓN</b>	PLANTA ÁREA DE EXTRUSIÓN	<b>CÁMARA:</b> FLIR E5
<b>EQUIPO Y ELEMENTO</b>	MOTOR PRINCIPAL LÍNEA 1 DE EXTRUSIÓN	<b>FECHA:</b> 4MAY17
<b>TIPO DE INSPECCIÓN</b>	TERMOGRAFÍA INDIRECTA, PASIVA Y CUANTITATIVA	<b>HOJA:</b> 5 de 13

26.6°C  54.3°C



**Evaluación:** La carcasa presenta acumulación de gránulos de PVC en las aletas disipadoras de calor.

**Evaluación:** Hay un patrón de temperatura bastante disímil. La acumulación de PVC eleva la temperatura y radiación térmica de la zona

#### Análisis Térmico

CLASIFICACIÓN DE FALLA	
Δt o/s	16.2°C
Condición	Acceptable
Resolución de IR	120 x 90
Lente	Fol 7mm

ITEM	VALOR
Emisividad	0.92
Distancia	31m
Trefl	32 °C
Sp1 ALETA 11	56.6 °C
Sp1 ALETA 12	40.2 °C

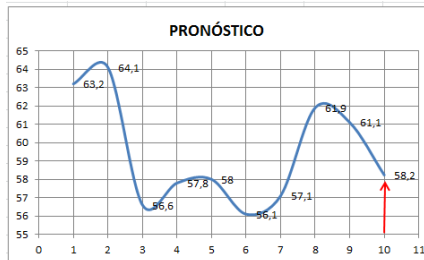
#### Estadística y pronóstico

Se registraron 9 datos correspondientes a 9 periodos de tiempo (10 a 12 días de intervalo), de la temperatura obtenida en las aletas de la carcasa de motor principal. Se analizan bajo estadística descriptiva, y se realiza un pronóstico para el periodo 10.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
63.2	64.1	56.6	57.8	58°C	56.1	57.1 °C	61.9	61.1

Mediana=58.11; Desviación estándar=2.89; Varianza=8.39; Coeficiente de asimetría 0.55; Curtosis = -1.37; Rango= 8;

**PRONÓSTICO PERIODO 10 = 58.2 °C.** Es decir se infiere una temperatura de 58.2°C para la primera semana de segundo trimestre. Acorde a la temperatura promedio de funcionamiento.





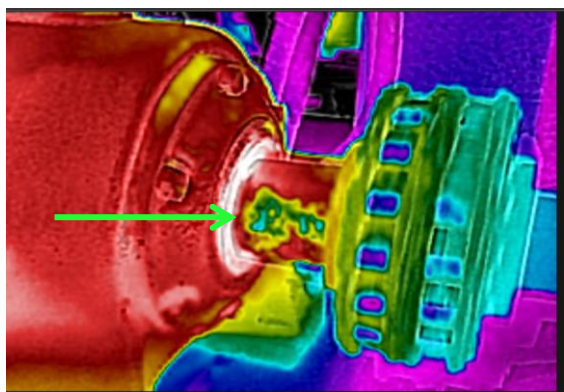
#### Diagnóstico y recomendaciones

**Diagnóstico:** El motor presenta un estado de funcionamiento aceptable durante el trimestre, se presentan temperaturas elevadas (60°C) en las aletas, que superan la recomendación del fabricante (44°C), situación debida a la alta acumulación de PVC en las aletas disipadoras de calor. Esta acumulación hará que la temperatura se eleve en los próximos trimestres.

**Recomendación:** Acción correctiva inmediata. Limpiar las aletas disipadoras



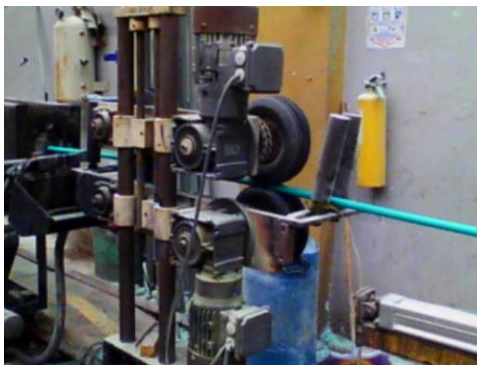
### 4.2.2.18 Termograma del eje del motor principal de la extrusora

<b>EMPRESA</b>	TUBOPLEX S.A BOGOTÁ- BARRIO CARVAJAL	<b>PALETA:</b> ARCOIRIS H																		
<b>DESCRIPCION UBICACION</b>	PLANTA ÁREA DE EXTRUSIÓN	<b>CÁMARA:</b> FLIR E 5																		
<b>EQUIPO Y ELEMENTO</b>	EJE MOTOR PRINCIPAL EXTRUSORA LÍNEA 1	<b>FECHA:</b> 20ABRIL17																		
<b>TIPO DE INSPECCIÓN</b>	TERMOGRAFÍA DIRECTA, PASIVA Y CUALITATIVA	<b>HOJA:</b> 6 de 13																		
		29.1°C  67.2°C																		
																				
<b>Evaluación:</b> Se observa un posible proceso de oxidación y corrosión.		<b>Evaluación:</b> Se observa un posible proceso de oxidación y corrosión.																		
<b>Análisis Térmico</b>																				
<table border="1" style="width: 100%;"> <thead> <tr> <th colspan="2">CLASIFICACIÓN DE FALLA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Δt o/s</td> <td>N/A</td> </tr> <tr> <td>Condición</td> <td>N/A</td> </tr> <tr> <td>Resolución de IR</td> <td>120 x 90</td> </tr> <tr> <td>Lente</td> <td>Fol 7mm</td> </tr> </tbody> </table>		CLASIFICACIÓN DE FALLA		Δt o/s	N/A	Condición	N/A	Resolución de IR	120 x 90	Lente	Fol 7mm	<table border="1" style="width: 100%;"> <thead> <tr> <th>ITEM</th> <th>VALOR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Emisividad</td> <td>N/A</td> </tr> <tr> <td>Distancia</td> <td>1 m</td> </tr> <tr> <td>Trefl</td> <td>N/A</td> </tr> </tbody> </table>	ITEM	VALOR	Emisividad	N/A	Distancia	1 m	Trefl	N/A
CLASIFICACIÓN DE FALLA																				
Δt o/s	N/A																			
Condición	N/A																			
Resolución de IR	120 x 90																			
Lente	Fol 7mm																			
ITEM	VALOR																			
Emisividad	N/A																			
Distancia	1 m																			
Trefl	N/A																			
<b>NO HAY CRITERIOS DE ACEPTACIÓN O RECHAZO DISPONIBLES EN LOS ESTANDARES Y/O NORMAS</b>																				
<b>Diagnóstico</b>																				
Hay un aparente proceso de corrosión en el eje, que puede terminar en una posible fractura de este. (En los antecedentes de la empresa figura un incidente grave de este tipo). Hay una acumulación de sedimentos de PVC, el cual posee varios aditivos químicos, que combinados con la humedad presente en el área del motor, pueden estar generando este proceso de corrosión.																				
<b>Recomendaciones</b>																				
Se recomienda un análisis de corrosión en la próxima parada de mantenimiento. Adicionalmente limpiar la acumulación de sedimentos químicos en el eje.																				

### 4.2.2.19 Termograma Halador

<b>EMPRESA</b>	TUBOPLEX S.A BOGOTÁ- BARRIO CARVAJAL	<b>PALETA:</b> ARCOIRIS
<b>DESCRIPCIÓN UBICACIÓN</b>	PLANTA ÁREA DE EXTRUSIÓN	<b>CÁMARA:</b> FLIR E5
<b>EQUIPO Y ELEMENTO</b>	MOTORES DEL HALADOR	<b>FECHA:</b> 4MAY17
<b>TIPO DE INSPECCIÓN</b>	TERMOGRAFÍA INDIRECTA, PASIVA Y CUANTITATIVA	<b>HOJA:</b> 7 de 13

20.7°C  39.5°C



**Evaluación:** No se presentan discontinuidades relevantes

**Evaluación:** No hay discontinuidades relevantes. se establece la imagen como patrón de referencia de correcto funcionamiento para comparaciones de mantenimiento futuras.

#### Análisis Térmico

CLASIFICACIÓN DE FALLA	
Δt o/s	4.7°C
Condición	Buen Estado
Resolución de IR	120 x 90
Lente	Fol 7mm

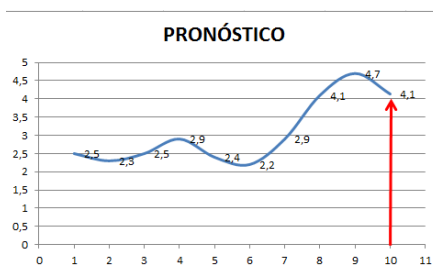
ITEM	VALOR
Emisividad	0.92
Distancia	31m
Trefl	32 °C
Sp1 MOTOR 1	39.9 °C
Sp2 MOTOR 2	35.2 °C

#### Estadística y pronóstico

Se registraron 9 datos correspondientes a 9 periodos de tiempo (10 a 12 días de intervalo), de la diferencia de temperatura, obtenida en la carcasa de los motores, se analizan bajo estadística descriptiva, y se realiza un pronóstico para el periodo 10.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
2.5°C	2.3°C	2.5°C	2.9 °C	2.4°C	2.2°C	2.9	4.1	4.7°C

Mediana=2,5; Desviación estándar=0.87; Varianza=0.76; Coeficiente de asimetría 1.43; Curtosis =0.95, el **PRONÓSTICO** para el periodo 10 es 4.1°C.



#### Diagnóstico y recomendaciones

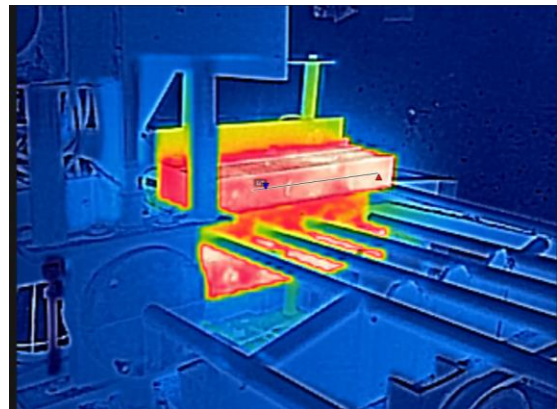
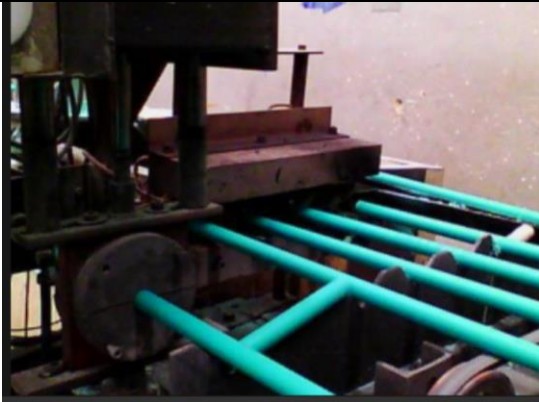
**Diagnóstico:** los motores presentan un buen estado de funcionamiento durante el trimestre. Hay un leve incremento de 2.5°C durante las últimas 4 semanas del trimestre.

**Recomendación:** Limpiar las aletas disipadoras, revisar zapatas y cojinetes en la próxima parada de mantenimiento.

### 4.2.2.20 Termograma Acampanador

<b>EMPRESA</b>	TUBOPLEX S.A BOGOTÁ- BARRIO CARVAJAL	<b>PALETA:</b> ARCOIRIS
<b>DESCRIPCIÓN UBICACIÓN</b>	PLANTA ÁREA DE EXTRUSIÓN	<b>CÁMARA:</b> FLIR E 5
<b>EQUIPO Y ELEMENTO</b>	ACAMPANADOR	<b>FECHA:</b> 4MAY17
<b>TIPO DE INSPECCIÓN</b>	TERMOGRAFÍA INDIRECTA , PASIVA Y CUANTITATIVA	<b>HOJA:</b> 8 de 13

19.1°C  258°C



**Evaluación:** No se presentan discontinuidades relevantes

**Evaluación:** Hay diferencias de temperatura en regiones diferentes del horno del acampanador

#### Análisis Térmico

CLASIFICACIÓN DE FALLA	
$\Delta t$ o/s	22.3 °C
Condición	Acceptable
Resolución de IR	120 x 90
Lente	Fol 7mm

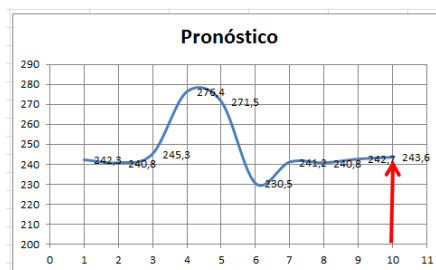
ITEM	VALOR
Emisividad	0.92
Distancia	31m
Trefl	32 °C
Sp1 HORNO	254.5°C
Sp2 HORNO	232.8°C

#### Estadística y pronóstico

Se registraron 9 datos correspondientes a 9 periodos de tiempo (10 a 12 días de intervalo), del diferencial de temperatura obtenido en el horno del acampanador. Se analizan datos bajo estadística descriptiva y se realiza un pronóstico para el periodo 10.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
242.3	240.8	245.3	276.4	271.5	230.5	241.2	240.8	242.7

Mediana=242.5; Desviación estándar=14.52;; Coeficiente de asimetría 1.44; Curtosis =1.14, PRONÓSTICO para el periodo 10 =243.6



#### Diagnóstico y recomendaciones

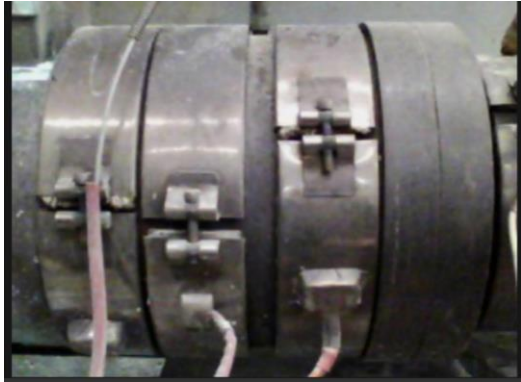

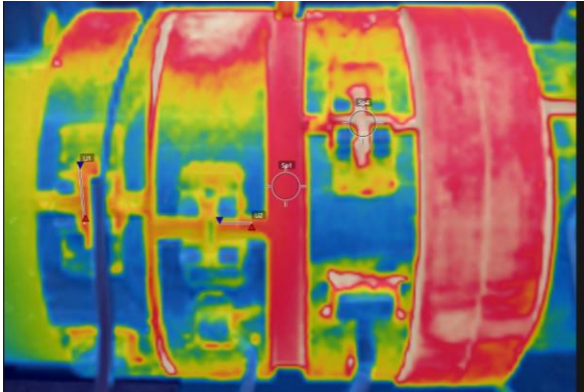
**Diagnóstico:** El acampanador registra un diferencial de temperatura de 22.3°C. Durante dos periodos obtuvo temperatura elevada, dañando la campana de la tubería Conduit.

**Recomendación:** Revisar resistencias calefactoras y el aislamiento del horno. El Acampanador posee numerosas partes móviles, se recomienda un estudio termográfico detallado de este sistema.


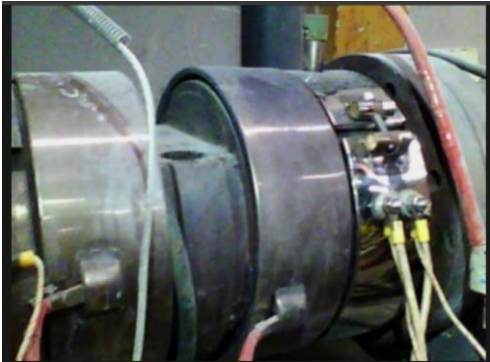
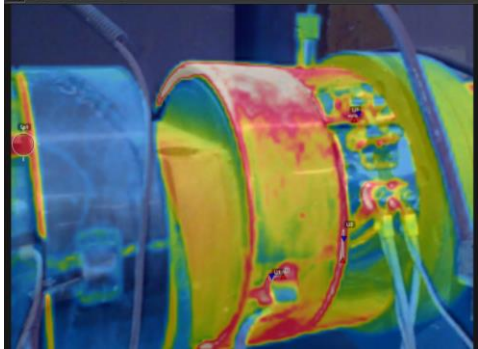
### 4.2.3 Comparación con el modelo térmico

Los siguientes termogramas cumplen una función dual, ya que sirven como validación de las temperaturas descritas en el modelo térmico y como informe de inspección de las 8 zonas del barril y el cabezal.

#### 4.2.3.1 Termograma Zona 1 de calentamiento. Barril



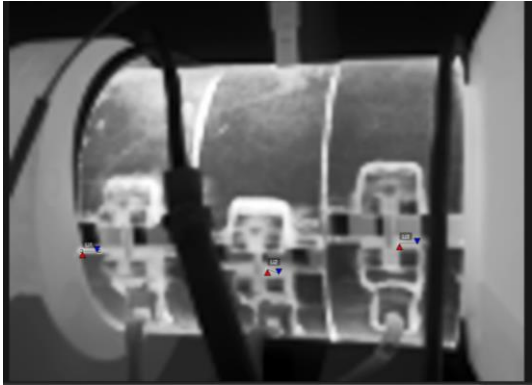
<b>EMPRESA</b>	TUBOPLEX S.A BOGOTÁ- BARRIO CARVAJAL	<b>PALETA:</b> ARCOIRIS																										
<b>DESCRIPCIÓN UBICACIÓN</b>	PLANTA ÁREA DE EXTRUSIÓN	<b>CÁMARA:</b> FLIR E 5																										
<b>EQUIPO Y ELEMENTO</b>	ZONA 1 BARRIL EXTRUSORA LINEA 1	<b>FECHA:</b> 4MAY17																										
<b>TIPO DE INSPECCIÓN</b>	TERMOGRAFIA INDIRECTA, PASIVA Y CUANTITATIVA	<b>HOJA:</b> 9 de 13																										
		24.7°C  220.6°C																										
																												
<b>Evaluación:</b> Hay oxidación en el barril y la armadura de las resistencias.		<b>Evaluación:</b> Hay fallas en el aislamiento de las resistencias, ya que muestran patrones de radiación muy heterogéneos.																										
<b>Análisis Térmico</b>																												
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">CLASIFICACIÓN DE FALLA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Δt o/s</td> <td>3.5°C</td> </tr> <tr> <td>Condición</td> <td>Buen Estado</td> </tr> <tr> <td>Resolucio de IR</td> <td>120 x 90</td> </tr> <tr> <td>Lente</td> <td>Fol 7mm</td> </tr> </tbody> </table>		CLASIFICACIÓN DE FALLA		Δt o/s	3.5°C	Condición	Buen Estado	Resolucio de IR	120 x 90	Lente	Fol 7mm	<table border="1"> <thead> <tr> <th>ITEM</th> <th>VALOR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Emisividad</td> <td>0.78</td> </tr> <tr> <td>Distancia</td> <td>1m</td> </tr> <tr> <td>Trefl</td> <td>31°C</td> </tr> <tr> <td>Sp1 BARRIL Z1</td> <td>192.4 °C</td> </tr> <tr> <td>Sp1 RESISTENCIA 1</td> <td>198.1 °C</td> </tr> <tr> <td>Sp2 RESISTENCIA 2</td> <td>201.6 °C</td> </tr> <tr> <td>Sp3 RESISTENCIA 3</td> <td>202 °C</td> </tr> </tbody> </table>	ITEM	VALOR	Emisividad	0.78	Distancia	1m	Trefl	31°C	Sp1 BARRIL Z1	192.4 °C	Sp1 RESISTENCIA 1	198.1 °C	Sp2 RESISTENCIA 2	201.6 °C	Sp3 RESISTENCIA 3	202 °C
CLASIFICACIÓN DE FALLA																												
Δt o/s	3.5°C																											
Condición	Buen Estado																											
Resolucio de IR	120 x 90																											
Lente	Fol 7mm																											
ITEM	VALOR																											
Emisividad	0.78																											
Distancia	1m																											
Trefl	31°C																											
Sp1 BARRIL Z1	192.4 °C																											
Sp1 RESISTENCIA 1	198.1 °C																											
Sp2 RESISTENCIA 2	201.6 °C																											
Sp3 RESISTENCIA 3	202 °C																											
<b>VALIDADCIÓN DEL MODELO TÉRMICO</b>																												
La temperatura obtenida en la zona es de 192.4°C y la temperatura teórica del modelo térmico es de 190°C. $Error_{absoluta} = 2.4^{\circ}C$ , $Error_{relativo} = 1.35\%$ ; los flujos de calor por radiación de esta zona son los más intensos ( $Q_4 = 5086 W$ )																												
<b>Diagnóstico y recomendaciones</b>																												
<b>Diagnóstico:</b> El barril y las resistencias presentan operación normal. Aunque las resistencias presentan patrones de radiación diferentes a lo largo de su geometría, <b>Recomendación:</b> Validar con el fabricante la robustez del aislamiento externo de las resistencias.																												

### 4.2.3.2 Termograma Zonas de calentamiento 2 y 3. Barril




<b>EMPRESA</b>	TUBOPLEX S.A BOGOTÁ- BARRIO CARVAJAL	<b>PALETA:</b> ARCOIRIS																										
<b>DESCRIPCIÓN UBICACIÓN</b>	PLANTA ÁREA DE EXTRUSIÓN	<b>CÁMARA:</b> FLIR E 5																										
<b>EQUIPO Y ELEMENTO</b>	ZONAS 2 Y 3 BARRIL EXTRUSORA LINEA 1	<b>FECHA:</b> 4MAY17																										
<b>TIPO DE INSPECCIÓN</b>	TERMOGRAFÍA INDIRECTA , PASIVA Y CUANTITATIVA	<b>HOJA:</b> 10 de 13																										
		33°C  202.4°C																										
																												
<b>Evaluación:</b> hay oxidación y acumulación de gránulos de PVC en las resistencias y sus conexiones.		<b>Evaluación:</b> Hay sobrecalentamiento en la resistencia 1 de la zona 3																										
<b>Análisis Térmico</b>																												
<table border="1" style="width: 100%;"> <thead> <tr> <th colspan="2" style="text-align: center;">CLASIFICACIÓN DE FALLA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><math>\Delta t</math> o/s</td> <td style="text-align: center;">162°C</td> </tr> <tr> <td>Condición</td> <td style="text-align: center; background-color: red; color: white;"><b>Crítico</b></td> </tr> <tr> <td>Resolución de IR</td> <td style="text-align: center;">120 x 90</td> </tr> <tr> <td>Lente</td> <td style="text-align: center;">Fol 7mm</td> </tr> </tbody> </table>		CLASIFICACIÓN DE FALLA		$\Delta t$ o/s	162°C	Condición	<b>Crítico</b>	Resolución de IR	120 x 90	Lente	Fol 7mm	<table border="1" style="width: 100%;"> <thead> <tr> <th>ITEM</th> <th>VALOR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Emisividad</td> <td style="text-align: center;">0.78</td> </tr> <tr> <td>Distancia</td> <td style="text-align: center;">1m</td> </tr> <tr> <td>Trefl</td> <td style="text-align: center;">31°C</td> </tr> <tr> <td>Sp1 BARRIL Zona2</td> <td style="text-align: center;">205°C</td> </tr> <tr> <td>Sp2 BARRIL Zona 3</td> <td style="text-align: center;">217.2</td> </tr> <tr> <td>Sp3 RESISTENCIA 1 zona 2</td> <td style="text-align: center;">190.1.1 °C</td> </tr> <tr> <td>Sp2 RESISTENCIA 2 zona 3</td> <td style="text-align: center;">194.6 °C</td> </tr> </tbody> </table>	ITEM	VALOR	Emisividad	0.78	Distancia	1m	Trefl	31°C	Sp1 BARRIL Zona2	205°C	Sp2 BARRIL Zona 3	217.2	Sp3 RESISTENCIA 1 zona 2	190.1.1 °C	Sp2 RESISTENCIA 2 zona 3	194.6 °C
CLASIFICACIÓN DE FALLA																												
$\Delta t$ o/s	162°C																											
Condición	<b>Crítico</b>																											
Resolución de IR	120 x 90																											
Lente	Fol 7mm																											
ITEM	VALOR																											
Emisividad	0.78																											
Distancia	1m																											
Trefl	31°C																											
Sp1 BARRIL Zona2	205°C																											
Sp2 BARRIL Zona 3	217.2																											
Sp3 RESISTENCIA 1 zona 2	190.1.1 °C																											
Sp2 RESISTENCIA 2 zona 3	194.6 °C																											
<b>VALIDACIÓN DEL MODELO TÉRMICO</b>																												
<p>La temperatura obtenida en la zona 2 es de 205°C y la temperatura teórica de 210°C. <math>Error_{absoluta} = 5^{\circ}C</math>, <math>Error_{relativa} = 2.43\%</math>;                  La temperatura obtenida en la zona 3 es de 217°C y la temperatura teórica de 120°C. <math>Error_{absoluta} = 97^{\circ}C</math>, <math>Error_{relativa} = 44.7\%</math>; El patrón de radiación de la zona 3 debería ser menos intenso que la zona 1 pero por el sobrecalentamiento en las resistencias se genera la situación contraria.</p>																												
<b>Diagnóstico y recomendaciones</b>																												
<p><b>Diagnóstico:</b> Las resistencias de la zona 2 presentan un calentamiento excesivo. Hay un diferencial crítico de temperatura (162°C)  <b>Recomendación:</b> Acción correctiva reemplazar resistencia 1 de la zona 2 y verificar el estado de la termocupla. Revisar la refrigeración realizada a través de agua fluyendo por la tubería de cobre que envuelve la zona 2</p>																												

102 Aplicación de la termografía infrarroja como método de inspección no destructivo para el mantenimiento predictivo del proceso de extrusión de tubería en PVC.

#### 4.2.3.3 Termograma Zona 4 de calentamiento. Barril



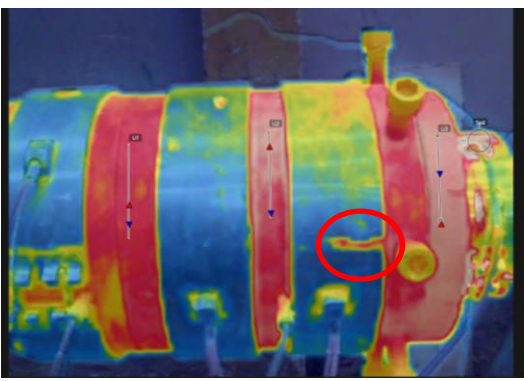
<b>EMPRESA</b>	TUBOPLEX S.A BOGOTÁ- BARRIO CARVAJAL	<b>PALETA:</b> GRISES																								
<b>DESCRIPCIÓN UBICACIÓN</b>	PLANTA ÁREA DE EXTRUSIÓN	<b>CÁMARA:</b> FLIR E 5																								
<b>EQUIPO Y ELEMENTO</b>	ZONA 4 BARRIL EXTRUSORA LINEA 1	<b>FECHA:</b> 4MAY17																								
<b>TIPO DE INSPECCIÓN</b>	TERMOGRAFIA INDIRECTA , PASIVA Y CUANTITATIVA	<b>HOJA:</b> 11 de 13																								
		27.°C  217.6°C																								
																										
<b>Evaluación:</b> Hay oxidación de las armaduras de las resistencias		<b>Evaluación:</b> las resistencias presentan buen estado no hay indicaciones térmicas relevantes																								
<b>Análisis Térmico</b>																										
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">CLASIFICACIÓN DE FALLA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><math>\Delta t</math> o/s</td> <td>14.4°C</td> </tr> <tr> <td>Condición</td> <td style="background-color: #90EE90;"><b>Buen estado</b></td> </tr> <tr> <td>Resolución de IR</td> <td>120 x 90</td> </tr> <tr> <td>Lente</td> <td>Fol 7mm</td> </tr> </tbody> </table>		CLASIFICACIÓN DE FALLA		$\Delta t$ o/s	14.4°C	Condición	<b>Buen estado</b>	Resolución de IR	120 x 90	Lente	Fol 7mm	<table border="1"> <thead> <tr> <th>ITEM</th> <th>VALOR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Emisividad</td> <td>0.78</td> </tr> <tr> <td>Distancia</td> <td>1m</td> </tr> <tr> <td>Temperatura Barril</td> <td>139.6 °C</td> </tr> <tr> <td>Sp1 Resistencia 1 Zona 4</td> <td>154.4 °C</td> </tr> <tr> <td>Sp2 Resistencia 2 Zona 4</td> <td>125.4 °C</td> </tr> <tr> <td>Sp13 Resistencia 3 Zona 4</td> <td>142.3 °C</td> </tr> </tbody> </table>	ITEM	VALOR	Emisividad	0.78	Distancia	1m	Temperatura Barril	139.6 °C	Sp1 Resistencia 1 Zona 4	154.4 °C	Sp2 Resistencia 2 Zona 4	125.4 °C	Sp13 Resistencia 3 Zona 4	142.3 °C
CLASIFICACIÓN DE FALLA																										
$\Delta t$ o/s	14.4°C																									
Condición	<b>Buen estado</b>																									
Resolución de IR	120 x 90																									
Lente	Fol 7mm																									
ITEM	VALOR																									
Emisividad	0.78																									
Distancia	1m																									
Temperatura Barril	139.6 °C																									
Sp1 Resistencia 1 Zona 4	154.4 °C																									
Sp2 Resistencia 2 Zona 4	125.4 °C																									
Sp13 Resistencia 3 Zona 4	142.3 °C																									
<b>VALIDADCIÓN DEL MODELO TÉRMICO</b>																										
<p>La temperatura obtenida en la zona 4 es de 134.26°C y la temperatura teórica de 130°C. <math>Error_{absoluto} = 4.26^{\circ}C</math>, <math>Error_{relativo} = 3.15\%</math>;</p>																										
<b>Diagnóstico y recomendaciones</b>																										
<p><b>Diagnóstico:</b> Los componentes de la zona 4 se encuentran en buen estado  <b>Recomendación:</b> N/A</p>																										

#### 4.2.3.4 Termograma Zonas de calentamiento 5 y 6. Adaptador

<b>EMPRESA</b>	TUBOPLEX S.A BOGOTÁ- BARRIO CARVAJAL	<b>PALETA:</b> ARCOIRIS																										
<b>DESCRIPCIÓN UBICACIÓN</b>	PLANTA ÁREA DE EXTRUSIÓN	<b>CÁMARA:</b> FLIR E 5																										
<b>EQUIPO Y ELEMENTO</b>	ZONAS 5 Y 6 BARRIL EXTRUSORA LINEA 1	<b>FECHA:</b> 4MAY17																										
<b>TIPO DE INSPECCIÓN</b>	TERMOGRAFÍA INDIRECTA , PASIVA Y CUANTITATIVA	<b>HOJA:</b> 12 de 13																										
		25.9°C  193.9°C																										
																												
<b>Evaluación:</b> Hay oxidación de las armaduras de las resistencias		<b>Evaluación:</b> Hay fallas en la armadura aislante de la resistencia de la zona 6																										
<b>Análisis Térmico</b>																												
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">CLASIFICACIÓN DE FALLA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><math>\Delta t</math> o/s</td> <td>12.4 °C</td> </tr> <tr> <td>Condición</td> <td style="background-color: #90EE90;"><b>Buen estado</b></td> </tr> <tr> <td>Resolucio de IR</td> <td>120 x 90</td> </tr> <tr> <td>Lente</td> <td>Fol 7mm</td> </tr> </tbody> </table>		CLASIFICACIÓN DE FALLA		$\Delta t$ o/s	12.4 °C	Condición	<b>Buen estado</b>	Resolucio de IR	120 x 90	Lente	Fol 7mm	<table border="1"> <thead> <tr> <th>ITEM</th> <th>VALOR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Emisividad</td> <td>0.78</td> </tr> <tr> <td>Distancia</td> <td>1m</td> </tr> <tr> <td>Trefl</td> <td>31°C</td> </tr> <tr> <td>L1 BARRIL Zona 5</td> <td>163.9°C</td> </tr> <tr> <td>L2 BARRIL Zona 6</td> <td>172.6 °C</td> </tr> <tr> <td>L3 3RESISTENCIA zona 5</td> <td>148.6 °C</td> </tr> <tr> <td>Sp1 RESISTENCIA zona 6</td> <td>160.4 °C</td> </tr> </tbody> </table>	ITEM	VALOR	Emisividad	0.78	Distancia	1m	Trefl	31°C	L1 BARRIL Zona 5	163.9°C	L2 BARRIL Zona 6	172.6 °C	L3 3RESISTENCIA zona 5	148.6 °C	Sp1 RESISTENCIA zona 6	160.4 °C
CLASIFICACIÓN DE FALLA																												
$\Delta t$ o/s	12.4 °C																											
Condición	<b>Buen estado</b>																											
Resolucio de IR	120 x 90																											
Lente	Fol 7mm																											
ITEM	VALOR																											
Emisividad	0.78																											
Distancia	1m																											
Trefl	31°C																											
L1 BARRIL Zona 5	163.9°C																											
L2 BARRIL Zona 6	172.6 °C																											
L3 3RESISTENCIA zona 5	148.6 °C																											
Sp1 RESISTENCIA zona 6	160.4 °C																											
<b>VALIDACIÓN DEL MODELO TÉRMICO</b>																												
<p>La temperatura obtenida en la zona 5 es de 163.9 °C y la temperatura teórica de 170°C. <math>Error_{absoluto} = 6.1^{\circ}C</math>, <math>Error_{relativo} = 3.72\%</math>;                  La temperatura obtenida en la zona 6 es de 172.6°C y la temperatura teórica de 180°C. <math>Error_{absoluto} 7.4^{\circ}C</math>, <math>Error_{relativo} = 4.2\%</math>;</p>																												
<b>Diagnóstico y recomendaciones</b>																												
<p><b>Diagnóstico:</b> La resistencias de la zona 6 presenta fallas leves en el aislamiento  <b>Recomendación:</b> N/A</p>																												

104 Aplicación de la termografía infrarroja como método de inspección no destructivo para el mantenimiento predictivo del proceso de extrusión de tubería en PVC.

#### 4.2.3.5 Termograma Zonas de calentamiento 7 y 8. Cabezal y boquilla

<b>EMPRESA</b>	TUBOPLEX S.A BOGOTÁ- BARRIO CARVAJAL	<b>PALETA:</b> ARCOIRIS																										
<b>DESCRIPCIÓN UBICACIÓN</b>	PLANTA ÁREA DE EXTRUSIÓN	<b>CÁMARA:</b> FLIR E 5																										
<b>EQUIPO Y ELEMENTO</b>	ZONAS 7 Y 8 BARRIL EXTRUSORA LÍNEA 1	<b>FECHA:</b> 4MAY17																										
<b>TIPO DE INSPECCIÓN</b>	TERMOGRAFIA INDIRECTA , PASIVA Y CUANTITATIVA	<b>HOJA:</b> 13 de 13																										
		25.9°C  193.9°C																										
																												
<b>Evaluación:</b> No hay indicaciones físicas relevantes.		<b>Evaluación:</b> La resistencia 3 de la zona 7 presenta una grieta en su aislamiento.																										
<b>Análisis Térmico</b>																												
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">CLASIFICACIÓN DE FALLA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Δt o/s</td> <td>12.4 °C</td> </tr> <tr> <td>Condición</td> <td><b>Buen estado</b></td> </tr> <tr> <td>Resolucio de IR</td> <td>120 x 90</td> </tr> <tr> <td>Lente</td> <td>Fol 7mm</td> </tr> </tbody> </table>		CLASIFICACIÓN DE FALLA		Δt o/s	12.4 °C	Condición	<b>Buen estado</b>	Resolucio de IR	120 x 90	Lente	Fol 7mm	<table border="1"> <thead> <tr> <th>ITEM</th> <th>VALOR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Emisividad</td> <td>0.78</td> </tr> <tr> <td>Distancia</td> <td>1m</td> </tr> <tr> <td>Trefl</td> <td>33°C</td> </tr> <tr> <td>Temperatura Barril Zona 7</td> <td>192.7°C</td> </tr> <tr> <td>Sp1 RESISTENCIA 1 ZONA 8</td> <td>227.2°C</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	ITEM	VALOR	Emisividad	0.78	Distancia	1m	Trefl	33°C	Temperatura Barril Zona 7	192.7°C	Sp1 RESISTENCIA 1 ZONA 8	227.2°C				
CLASIFICACIÓN DE FALLA																												
Δt o/s	12.4 °C																											
Condición	<b>Buen estado</b>																											
Resolucio de IR	120 x 90																											
Lente	Fol 7mm																											
ITEM	VALOR																											
Emisividad	0.78																											
Distancia	1m																											
Trefl	33°C																											
Temperatura Barril Zona 7	192.7°C																											
Sp1 RESISTENCIA 1 ZONA 8	227.2°C																											
<b>VALIDADCIÓN DEL MODELO TÉRMICO</b>																												
<p>La temperatura obtenida en la zona 7 es de 192.8 °C y la temperatura teórica de 200°C. <math>Error_{absoluto} = 7.2°C</math>, <math>Error_{relativo} = 3.72\%</math>;          La temperatura obtenida en la zona 8 es de 227.26°C y la temperatura teórica de 240.2°C. <math>Error_{absoluto} 7.4 °C</math>, <math>Error_{relativo} = 5.7\%</math>;</p>																												
<b>Diagnóstico y recomendaciones</b>																												
<p><b>Diagnóstico:</b> La resistencia 3 de la zona 7 tiene una rotura interna del aislamiento.  <b>Recomendación:</b> Cambiar inmediatamente la resistencia</p>																												



## **5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **5.1 CONCLUSIONES**

La adquisición de la cámara termográfica y la toma de termogramas por si solos no constituyen la aplicación eficiente y correcta del método; el termógrafo debe comprender e interiorizar los procesos de transferencia de calor presentes en la operación de maquinaria electromecánica.

Las dos variables más importantes en el proceso de extrusión son la temperatura y la presión. Estas cambian constantemente y se elevan dependiendo de los parámetros de operación de la máquina y de las características producto que se esté manufacturando.

La temperatura a la cual se empieza a degradar el PVC es muy cercana a su temperatura de procesamiento. Ya que su punto de trabajo y degradación están bastante cerca, es necesario un control lo más preciso posible de la temperatura.

Temperaturas insuficientes llevan al compuesto a un estado de composición imperfecta y no tendrá las propiedades físicas óptimas requeridas, aunque en su superficie tenga parezca tener buen aspecto. Adicionalmente disminuye la viscosidad del compuesto aumentando los esfuerzos superficiales, demandando más energía de la maquinaria aumentando los costos y la probabilidad de fallas por esfuerzo mecánico.

Altas temperaturas vuelven muy viscoso el fluido y no permiten su conformación, además genera fallas en las resistencias eléctricas de calentamiento y pueden causar deformación térmica excesiva en otros componentes del barril.

Un material con menor densidad de PVC requiere un mayor volumen de material en el interior del cilindro y aumentan los esfuerzos cortantes de las capas de fluido en contacto con el barril y los tornillos. Por lo tanto se requiere un mayor perfil de temperatura y de presiones para fundir y comprimir el material, en consecuencia hay una mayor carga de trabajo y desgaste de componentes y materiales.

El flujo de calor por convección y radiación ( $Q_{\text{conv-rad}}$ ) hacia los alrededores de la extrusora, es proporcional a la temperatura y al área externa del barril, pero la variación respecto al área tiene una mayor correlación y en consecuencia una mayor incidencia en el comportamiento del flujo de calor por radiación.

El flujo de calor hacia el conjunto tornillos-polímero es directamente proporcional a la temperatura y el área interna, pero es más dependiente y presenta un mayor grado de correlación con el área interna del barril. Los tornillos ocupan el 80% del área del barril y absorben gran parte de este calor.

El tubo pierde en la tina de enfriamiento (zona 10) el 98% del calor adquirido en el barril y el cabezal y tan solo un 2% en la zona de transición (zona 9), antes de entrar a la tina.

Un proceso de convección forzada a lo largo de los 3 metros de la superficie del tubo, es más eficiente que la convección realizada en la pequeña sección de 3 cm de la zona 9; el proceso en la tina de enfriamiento tiene un alto coeficiente de convección ( $h$ ) gracias al fluido en movimiento.

Los menores valores de difusividad y efusividad térmica de los plásticos en relación con los metales implican una propagación lenta del calor y un mayor cambio en la temperatura de la tubería de PVC en respuesta a un impulso de calor externo.

Los patrones de radiación térmica son más intensos en la tubería fabricada en material Polyplex, porque es más densa y de mayor espesor en comparación con la de Celuplex, por esta razón posee mayor capacidad de acumular calor y/o energía térmica ( $C_p$ ).

La termografía a pesar de ser una técnica superficial, permite detectar discontinuidades y/o defectos subsuperficiales aprovechando los procesos de transferencia de calor que se dan desde el interior hacia la superficie, haciendo detectables de manera indirecta estos defectos.

Las anomalías en conexiones eléctricas consumen excesiva energía térmica, lo que representa mayor costo económico, porque al aumentar la resistencia eléctrica

disminuye el flujo de corriente y se requiere mayor voltaje para mantener el flujo necesario, aumentando el consumo en Watios. Adicionalmente afectan el comportamiento de los componentes mecánicos de la extrusora.

Los componentes corroídos u oxidados, aumentan los valores de emisividad en esa área, haciendo más confiables las mediciones, pero se debe tener en cuenta este aspecto al momento de caracterizar el material antes de la inspección y ajustar los parámetros de la cámara.

Los pronósticos de temperaturas en el proceso de extrusión, permite inferir el funcionamiento futuro de los múltiples componentes de la extrusora, permitiendo anticiparse a costosas fallas de mantenimiento.

Los altos y diversos perfiles de temperatura con los que trabaja la extrusora continuamente, someten los componentes mecánicos a una constante deformación térmica, cambiando lentamente sus propiedades mecánicas con el paso del tiempo y variando los patrones de radiación térmica que emiten dichos componentes, situación que facilita la inspección por termografía infrarroja.

## **5.2 RECOMENDACIONES**

Se recomienda para futuras investigaciones o mantenimiento en industrias adquirir una cámara termográfica con un rango amplio de temperaturas, ya que en este caso la cámara FLIR E5 tiene un rango de  $-20^{\circ}\text{C}$  a  $250^{\circ}\text{C}$  y algunas de las zonas de las líneas 2 a 5 de extrusión presentan temperaturas mayores a  $250^{\circ}\text{C}$ .

Para estudios posteriores se recomienda adquirir una cámara con mayor resolución térmica que la FLIR E5 (120 x 90), ya que a una mayor resolución se pueden tomar medidas más lejanas y detectar discontinuidades de bajos órdenes de magnitud. Durante el desarrollo de esta tesis debido a la baja resolución de la cámara, fue necesario acercarse a distancias cortas de elementos a altas temperaturas para obtener una buena imagen.

La emisividad es una de las dos variables más críticas e importantes en la inspección termografía infrarroja, se recomienda acudir a tablas experimentales de emisividades de materiales de ingeniería, o hallarlas en campo por la técnica descrita en el estándar ASTM E 1933 – 99a “Standard Practice for Measuring and Compensating for Emissivity Using Infrared Imaging Radiometers” que se encuentra en el anexo B.

La temperatura reflejada es otra variable crítica en la inspección por termografía infrarroja, se recomienda compensarla siguiendo el procedimiento descrito en el estándar ASTM E1862-97 “Standard Practice for Measuring and Compensating for Reflected Temperature Using Infrared Imaging Radiometers”, que se encuentra en el anexo B.

Se recomienda solo usar la termografía cuantitativa, cuando se requieren mediciones muy precisas de temperatura. No se recomienda el uso de esta técnica para el monitoreo de condición para mantenimiento preventivo o predictivo, ya que en campo es muy difícil determinar una temperatura precisa. Se recomienda el uso exclusivo de la temperatura cualitativa para el monitoreo de condición.

No se recomienda el uso de termografía activa para el monitoreo de condición, porque que la maquinaria y/o componentes industriales generan radiación por sí mismos. La termografía activa se recomienda solo para la caracterización de materiales. Para inspecciones de mantenimiento se recomienda netamente la termografía pasiva.

Se recomienda usar otras técnicas de inspección no destructivas como, ultrasonido y análisis de vibraciones, para aquellos fenómenos que se presentan a distancias no superficiales, con el objeto de complementar la evaluación hecha con la termografía infrarroja.

Para la aplicación de termografía se recomienda inspeccionar la maquinaria a su máxima carga si es posible, para analizar los componentes en las condiciones más críticas de operación.

No hay tablas de coeficientes de convección para fluidos y/o procesos específicos, se recomienda calcularlos a través de correlaciones experimentales documentadas en la literatura, ya que su cálculo teórico es un tanto complejo e impreciso.

Se recomienda a la empresa clasificar y cuantificar los defectos y discontinuidades por tipo y clase de tubería, con el fin de realizar estadísticas que permitan evaluar la criticidad y repetibilidad de fallas para realizar el correspondiente análisis de causalidad y realizar el mantenimiento adecuado.

Como los valores de difusividad y efusividad térmica son bajos en los plásticos, al someter a calentamiento externo la tubería, esta se degrada con mayor velocidad en unas zonas que otras. Se recomienda para efecto de análisis del material someterlo a un calentamiento uniforme a lo largo de toda su área, para evitar la heterogeneidad en los datos, los termogramas y los análisis de las discontinuidades de una misma muestra.

Como no hay criterios de aceptación bajo termografía infrarroja, para los componentes inspeccionados de la extrusora se recomienda, a la Empresa Tuboplex, usar los termogramas tomados de estos componentes como patrón de referencia para el mantenimiento predictivo. Hecho que les permitirá anticiparse a costosas fallas de mantenimiento mitigando su impacto y costo operacional.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Moubray, J. (1997). Reliability-centered maintenance. Industrial Press Inc.
- [2] Gaussorgues, Gilbert; Chomet, Seweryn. Infrared thermography. (2012). Springer Science & Business Media.
- [3] Neita Duarte, L. Y., Rodríguez, P., & Omar, E. (2014). Principios básicos de la termografía infrarroja y su utilización como técnica para mantenimiento predictivo.
- [4] Balageas, D. L. (2007, October). Termografía infrarroja: una técnica multifacética para la Evaluación No Destructiva (END). In IV Conferencia Panamericana de END, Buenos Aires.
- [5] Bagavathiappan, S., Lahiri, B. B., Saravanan, T., Philip, J., & Jayakumar, T. (2013). Infrared thermography for condition monitoring—a review. *Infrared Physics & Technology*, 60, 35-55.
- [6] Jadin, M. S., & Taib, S. (2012). Recent progress in diagnosing the reliability of electrical equipment by using infrared thermography. *Infrared Physics & Technology*, 55(4), 236-245.
- [7] Korendo, Z., & Florkowski, M. (2001). Thermography based diagnostics of power equipment. *Power Engineering Journal*, 15(1), 33-42.
- [8] Huda, A. N., & Taib, S. (2013). Application of infrared thermography for predictive/preventive maintenance of thermal defect in electrical equipment. *Applied Thermal Engineering*, 61(2), 220-227.
- [9] Younus, A. M., & Yang, B. S. (2012). Intelligent fault diagnosis of rotating machinery using infrared thermal image. *Expert Systems with Applications*, 39(2), 2082-2091.
- [10] Shen, G., & Li, T. (2007). Infrared thermography for high-temperature pressure pipe. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 49(3), 151-153.
- [11] Bagavathiappan, S., Saravanan, T., George, N. P., Philip, J., Jayakumar, T., & Raj, B. (2008). Condition monitoring of exhaust system blowers using infrared thermography. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 50(9), 512-515.
- [12] Meola, C., Carlomagno, G. M., Squillace, A., & Giorleo, G. (2004). The use of infrared thermography for nondestructive evaluation of joints. *Infrared physics & technology*, 46(1), 93-99.
- [13] Ummenhofer, T., & Medgenberg, J. (2009). On the use of infrared thermography for the analysis of fatigue damage processes in welded joints. *International Journal of Fatigue*, 31(1), 130-137.
- [14] Avdelidis, N. P., Hawtin, B. C., & Almond, D. P. (2003). Transient thermography in the assessment of defects of aircraft composites. *Ndt & E International*, 36(6), 433-439.
- [15] Márquez, F. P. G., Tobias, A. M., Pérez, J. M. P., & Papaelias, M. (2012). Condition monitoring of wind turbines: Techniques and methods. *Renewable Energy*, 46, 169-178.
- [16] Luong, M. P. (1995). Infrared thermographic scanning of fatigue in metals. *Nuclear Engineering and Design*, 158(2-3), 363-376.
- [17] Vadivambal, R., & Jayas, D. S. (2011). Applications of thermal imaging in agriculture and food industry—a review. *Food and Bioprocess Technology*, 4(2), 186-199.

- [18] Wyckhuysse, A., & Maldague, X. (2001). A study of wood inspection by infrared thermography, part I: Wood pole inspection by infrared thermography. *Journal of Research in Nondestructive Evaluation*, 13(1), 1-12.
- [19] Balaras, C. A., & Argiriou, A. A. (2002). Infrared thermography for building diagnostics. *Energy and buildings*, 34(2), 171-183.
- [20] Ring, E. F. J., & Ammer, K. (2012). Infrared thermal imaging in medicine. *Physiological measurement*, 33(3), R33.
- [21] Reynolds, W. N. (1988). Inspection of laminates and adhesive bonds by pulse-video thermography. *NDT international*, 21(4), 229-232.
- [22] Steinberger, R., Leitão, T. V., Ladstätter, E., Pinter, G., Billinger, W., & Lang, R. W. (2006). Infrared thermographic techniques for non-destructive damage characterization of carbon fibre reinforced polymers during tensile fatigue testing. *International Journal of Fatigue*, 28(10), 1340-1347.
- [22] Flores-Bolarin, J. M., & Royo-Pastor, R. (2008). Infrared thermography: A good tool for nondestructive testing of plastic materials. In *5th European Thermal-Sciences Conference* (pp. 1-8).
- [23] Alonso, M., & Finn, E. J. (1998). Física, vol. II. Edición Revisada y Aumentada, Mecánica, Fondo.
- [24] Braun, E. (2006). Electromagnetismo. De la ciencia a la tecnología. Fondo de cultura económica.
- [25] Física cuántica. Segundo corte. Recuperada el 15 de enero de 2017 de <https://edbar01.wordpress.com/segundo-corte/>
- [26] Sears, F. W. (2004). Física universitaria (Vol. 1). Pearson Educación.
- [27] Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2011). Transferencia de calor y masa. Fundamentos. McGraw-Hill.
- [28] Infrared Training Center (ITC), 2016. Thermography Introduction to level 1. Sweden
- [29] Çengel, Y. A., Cimbala, J. M., & Skarina, S. F. (2006). Mecánica de fluidos: fundamentos y aplicaciones (Vol. 1). McGraw-Hill.
- [30] Kaplan, H. (2007). Practical applications of infrared thermal sensing and imaging equipment (Vol. 75). SPIE press.
- [31] Escuela de Ingeniería de minas, energía y materiales de Oviedo España. (2016). Materiales Poliméricos de Interés Industrial. Obtenido de <http://eimem.uniovi.es/>.
- [32] Azael F. P. (2007) Aseguramiento de la calidad de extrusión de tubería de policloruro de vinilo PVC, USAC, 2007.
- [33] tecnología de los plásticos (2011). Obtenido de <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com.co/2011/05/esquemas-extrusoras.html>. El 55 de febrero de 2017.
- [34] Ramos Del valle L F. (2012). Extrusión de plásticos: Principios básicos .Centro de Investigación en Química. Editorial Limusa, México

- 
- [35] Sitec Ingeniería (2016). Resistencias y bandas de Mica [www.sitecingeneria.com/resistenciabandasdemica.html](http://www.sitecingeneria.com/resistenciabandasdemica.html).
- [36] Resistencias Eléctricas (2016). Calentadores flexibles de cerámica. <http://www.resistencias-electricas.com/productos/>
- [37] Escamilla Guerrero, J. H. (1998). Aplicación de observadores de estado para verificar las mediciones de temperatura de un proceso de extrusión (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León).
- [38] TUBOPLEX S.A. (2015). Documentación técnica. Bogotá Colombia. Obtenido de <http://Tuboplex.com/tuberias/>
- [39] ASTM American Society Testing Materials (2001). Annual Book of ASTM.
- [40] Manohar, K., & Ramroop, K. (2010). A comparison of correlations for heat transfer from inclined pipes. *International Journal of Engineering (IJE)*, 4(4), 268.
- [41] Jiménez Ramos, A., Borroto Nordelo, A., Montesino Pérez, M., Gómez Sarduy, J. R., Jiménez Santana, Y., & Sosa Núñez, F. (2015). Mejoramiento de la eficiencia energética en los procesos de extrusión de tuberías plásticas. *Ingeniería Energética*, 36(2), 220-229.
- [42] ASTM American Society for Testing and Materials (1994 - 2016). [www.astm.org](http://www.astm.org). EE.UU
- [43] ASTM American Society Testing Materials (2016). Standard E1316 - 16a "Standard Terminology for Nondestructive Examinations".
- [44] ASTM American Society Testing Materials (2005). Standar ASTM C1934-99a Standard Guide for Examining Electrical and Mechanical Equipment with Infrared Thermography.
- [45] ASTM American Society Testing Materials (2010). ASTM E1862-97 Standard Practice for Measuring and Compensating for Reflected Temperature Using Infrared Imaging Radiometers.
- [46] ASTM American Society Testing Materials (2010). ASTM E1933 – 99a Standard Practice for Measuring and Compensating for Emissivity Using Infrared Imaging Radiometers
- [47] ISO International standar Organizati3n (2016). [www.ISO.org](http://www.ISO.org).
- [48] ISO.International Standar Organizati3n. Norma ISO 18434-1 Condition monitoring and diagnostics of machines – Thermography.
- [49] NETA International Electrical Testing Association (2016). [www.metaworld.org](http://www.metaworld.org)
- [50] WEG Motores y bombas (2016). <http://www.weg.net/catalog/weg/CO/es/Motores-Electricos>. Recuperado el 1 de abril de 2015.
- [51] FLIR Company. Software FLIRTools (2016). WWW. FLIR.com



## ANEXO A: Glosario

**CÁMARA DE INFRARROJOS IRT:** *instrumento que recoge la energía radiante infrarroja de una superficie objetivo y produce una imagen, donde los tonos de gris o tonos de color están relacionados con la distribución de la temperatura de la superficie. ( ISO 18434-1, 2008)*

**CUERPO NEGRO:** *emisor perfecto ideal y absorbente de la radiación térmica a todas las longitudes de onda. ( ISO 18434-1, 2008)*

**DISTANCIA DE SEGURIDAD:** *Es la mínima distancia entre una línea energizada y una zona donde se garantiza que no habrá un accidente por acercamiento. (Resolución 180466 de 2007, 2011).*

**EMISIVIDAD:**  $\varepsilon$  *Relación de la luminosidad de una superficie objetivo a la de un cuerpo negro a la misma temperatura. ( ISO 18434-1, 2008)*

**ISOTERMA:** *Intervalo de temperaturas aparentemente iguales. ( ISO 18434-1, 2008)*

**IR INFRARROJO:** *Parte del continuo electromagnético que se extiende desde la longitud de onda visible de color rojo, es de 0,75  $\mu\text{m}$ , a 1 000  $\mu\text{m}$ . Debido a las consideraciones de diseño de instrumentos y las características de transmisión de infrarrojos de la atmósfera, la mayoría de las mediciones infrarrojas se hacen entre 0,75 $\mu\text{m}$  y 15  $\mu\text{m}$  longitudes de onda. ( ISO 18434-1, 2008)*

**IRT TERMOGRAFÍA INFRARROJA:** *Adquisición y análisis de la información térmica a partir de equipos de imagen térmica sin ningún contacto. ( ISO 18434-1, 2008).*

**MEDIOS ATENUANTES:** *Ventanas, filtros, atmósferas, ópticas externas, materiales u otros medios que atenúan la radiación infrarroja emitida desde una fuente. ( ISO 18434-1, 2008)*

**OBJETIVO:** *Superficie del objeto a medir.*

**RADIACIÓN TÉRMICA:** *Modo de flujo de calor que se produce por la emisión y la absorción de la radiación electromagnética. A diferencia de flujo de calor por conducción y convección, es capaz de propagar a través del vacío. La energía infrarroja viaja desde el objetivo hasta el detector por la radiación. ( ISO 18434-1, 2008).*

**REFLECTIVIDAD  $\rho$ :** *La relación del total de la energía reflejada desde una superficie a la energía total es incidente en esa superficie.  $\rho = 1 - \varepsilon - \tau$  . Técnicamente, la reflectividad es la relación de la intensidad de la radiación reflejada de la radiación total; reflectancia es la relación entre el flujo reflejado al flujo incidente. En IRT, los dos términos se usan indistintamente. ( ISO 18434-1, 2008)*

**TEMPERATURA APARENTE:** *Lectura no compensada de una cámara de termografía infrarroja que contiene toda la radiación incidente sobre el detector, independientemente de su fuente. ( ISO 18434-1, 2008)*

**TEMPERATURA APARENTE REFLEJADA  $T_{refl}$ :** *Temperatura aparente de otros objetos que se refleja en el objetivo en la cámara termografía infrarroja. ( ISO 18434-1, 2008)*

**TERMOGRAMA:** *Mapa térmico o la imagen de un objetivo, donde los tonos grises o tonos de color representan la distribución de la energía radiante en infrarrojo térmico sobre la superficie del objetivo. ( ISO 18434-1, 2008)*

**TRANSMISIVIDAD  $\tau$ :** *Proporción de la energía radiante infrarroja que incide sobre una superficie del objeto, para cualquier intervalo espectral dado, que se transmite a través del objeto. ( ISO 18434-1, 2008)*

## **ANEXO B : Estado del arte de la documentación técnica vigente para la aplicación de termografía infrarroja**

Actualmente hay dos organizaciones principales para la estandarización de procesos ASTM E ISO. Hay cuatro (4) Estándares técnicos de ASTM y una (1) norma de ISO para la inspección de termografía infrarroja que son aplicables a la industria eléctrica y mecánica. Las normas describen completamente el proceso incluyendo explicaciones teóricas, abordando técnicamente el procedimiento de inspección e incluyendo criterios de aceptación y rechazo, mientras que los estándares describen de manera específica procedimientos de inspección.

### **ASTM**

American Society for Testing and Materials es una organización de estándares internacionales que desarrolla y publica, acuerdos voluntarios de documentaciones técnicas para una amplia gama de materiales, productos, sistemas y servicios [18].

### **Estándar ASTM E1316 - 16a<sup>13</sup> Standard Terminology for Nondestructive Examinations**

**Significado y uso.** Los términos descritos en este estándar tienen como objeto usar de forma uniforme, clara y consistente los términos usados en la inspección no destructiva (NDT), para asegurar un claro entendimiento e interpretación de todo el estándar incluyendo aquellos relacionados con la termografía infrarroja [20].

**Alcance.** Todos los métodos y procedimientos de inspección no destructiva.

### **Estándar ASTM C1934-99a<sup>14</sup> Standard Guide for Examining Electrical and Mechanical Equipment with Infrared Thermography**

**Significado y uso:** El propósito de una inspección infrarroja es identificar y documentar hallazgos y/o anomalías en el equipo eléctrico y/o mecánico. Esta guía puede usarse por el usuario final (contratante) para especificar los parámetros de la inspección de equipo

---

<sup>13</sup> Estándar del año 2016

<sup>14</sup> Estándar del año 1999 reprobado en 2005

eléctrico y mecánico, así mismo puede ser usada por un termógrafo para desarrollar dichas inspecciones. Lista las responsabilidades del usuario final y del termógrafo, cuando se usa la termografía infrarroja. En equipo eléctrico los hallazgos o anomalías por calentamiento son usualmente causados por el incremento en la resistencia debidos a conexiones deterioradas, cortos circuitos, sobrecargas, cargas desbalanceadas, instalación inapropiada o incompatibilidad de componentes, refrigeración deficiente de componentes. En equipo mecánico los hallazgos o anomalías por calentamiento son usualmente debidas a la fricción causada por deficiente lubricación, desalineamiento, componentes desgastados y cargas mecánicas anormales. Los hallazgos o anomalías en sistemas de aislamiento son usualmente causados por pérdida o deterioro del material, cantidad insuficiente de material o instalación inadecuada de este [21].

**Alcance.** Esta guía involucra el uso del equipo y materiales en presencia de calor, equipo en movimiento y/o eléctricamente energizado. Esta guía también especifica el contenido cualitativo y cuantitativo que debe tener el documento para evaluación de equipo eléctrico y mecánico. Provee hipótesis acerca de las causas de las anomalías o hallazgos en la integridad del equipo. Recomendaciones para acciones correctivas, requieren conocimiento y habilidades más allá de la termografía infrarroja. La inspección infrarroja provee datos acerca del equipo sólo en el momento de la inspección. Una inspección termográfica de un equipo eléctrico o mecánico no asegura su operación, otros test propios del mantenimiento son necesarios para asegurar la confiabilidad y el desempeño.

### **Estándar ASTM E1862-97<sup>15</sup> Standard Practice for Measuring and Compensating for Reflected Temperature Using Infrared Imaging Radiometers**

**Significado y uso.** La energía infrarroja que es reflejada por un equipo diferente al objeto de medición y por el propio termógrafo puede causar errores en la medida. Existen dos procedimientos para la compensación en la medición de esta temperatura reflejada, método reflector y el método directo. Estos procedimientos pueden ser usados en el campo o el laboratorio usando materiales comunes disponibles [22].

---

<sup>15</sup> Estándar del año 1997 reaprobado en 2010

**Alcance.** Esta práctica cubre procedimientos para mediciones y compensación de temperatura reflejada cuando estamos midiendo la temperatura de la superficie con un medidor de infrarrojo generador de imagen. Estos procedimientos pueden involucrar el uso de equipo y materiales en presencia de calor, energizados eléctricamente o ambos.

**Estándar ASTM E1933 – 99a<sup>16</sup> Standard Practice for Measuring and Compensating for Emissivity Using Infrared Imaging Radiometers**

**Significado y uso.** La emisividad de un objetivo puede causar errores de medición de temperatura hay dos procedimientos para compensar estos errores en la emisividad, que pueden ser usados en el campo o en el laboratorio usando materiales comunes disponibles. Los valores de emisividad son definidos con el propósito de controlar el proceso de la evaluación no destructiva de materiales [23].

**Alcance.** Esta práctica cubre procedimientos de medida y compensación de emisividad cuando medimos la temperatura de la superficie de un objetivo, usando medidores de radiación infrarroja en presencia de calor energizados eléctricamente.

**ISO**

International Standardization Organization es la entidad internacional encargada de favorecer normas de fabricación, comercio y comunicación en todo el mundo. Con sede en Ginebra, es una federación de organismos nacionales entre los que se incluyen AENOR en España, DIN en Alemania, AFNOR en Francia... Entre otros de Europa. [24].

**Norma ISO 18434-1 Condition monitoring and diagnostics of machines – Thermography**

**Significado y uso.** La Norma ISO 18434 proporciona una introducción a la aplicación de la termografía infrarroja (IRT) en la condición de control y diagnóstico de maquinaria, con o sin accionamiento eléctrico. Introduce la terminología de termografía Infrarroja (TI) en lo

---

<sup>16</sup> Estándar del año 1999 reaprobado en 2010

que respecta a la condición de control y diagnóstico de máquinas, describe los tipos de procedimientos de TI y sus méritos, proporciona orientación sobre el establecimiento de criterios de evaluación de la severidad de las anomalías detectadas por el TI, describe los métodos y requisitos para la realización de TI de máquinas, incluyendo recomendaciones de seguridad, proporciona información sobre la interpretación de datos y criterios de evaluación y de información, proporciona procedimientos para determinar y compensar la temperatura aparente reflejada, emisividad y la atenuación de los medios de comunicación.[25]

**Alcance.** Proporciona orientación sobre el uso de la TI como parte de un programa de seguimiento y diagnóstico de máquinas de estado. La TI se puede utilizar para identificar anomalías para los fines de control de estado de las máquinas. Estas anomalías generalmente son causadas por mecanismos tales como la operación, lubricación inadecuada, mala alineación, los componentes desgastados o anomalías de carga mecánica.

# ASTM E 1934-99a



Designation: E 1934 – 99a

## Standard Guide for Examining Electrical and Mechanical Equipment with Infrared Thermography<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation E 1934, the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

### 1. Scope

1.1 This guide lists the responsibilities of the end user and the infrared thermographer when examining electrical and mechanical systems.

1.2 This guide outlines the specific content required to document qualitative and quantitative infrared examinations of electrical and mechanical equipment<sup>2</sup>

1.3 *This guide may involve use of equipment and materials in the presence of heated, moving or all of these or electrically energized equipment.*

1.4 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

### 2. Referenced Documents

- 2.1 *ASTM Standards:*  
E 1316 Terminology for Nondestructive Examinations<sup>3</sup>

### 3. Terminology

#### 3.1 Definitions:

3.1.1 *end user*—the person responsible for using the information provided by an infrared examination.

3.1.2 *exception*—an abnormally warm or cool connector, conductor or component.

3.1.3 *infrared examination*—the use of an infrared imaging system to provide thermal data about a structure, system, object or process.

3.1.4 *inventory list*—a list of the equipment by the infrared thermographer.

3.1.5 *qualified assistant*—a person provided and authorized by the end user to perform the tasks required by the infrared thermographer. He/she shall be knowledgeable of the operation and history of the equipment to be examined and of all safety

practices and rules of the end user.

3.1.6 *qualitative infrared inspection*—an infrared examination that provides images of exceptions but not temperature data.

3.1.7 *quantitative infrared inspection*—an infrared examination that provides both images of exceptions and temperature data.

3.2 See also Terminology E 1316.

### 4. Significance and Use

4.1 This guide can be used by an end user to specify infrared examinations of electrical and mechanical equipment and an infrared thermographer to perform them.

4.2 This guide lists the joint responsibilities of the end user and the infrared thermographer when using infrared thermography.

4.3 The purpose of an infrared examination is to identify and document exceptions in the end user's electrical or mechanical systems, or both.

4.3.1 In electrical equipment, warm exceptions are usually created by an increase in resistance caused by loose or deteriorated connections, short circuits, overloads, load imbalances or faulty, mismatched or improperly installed components. Cool exceptions are usually caused by failed components.

4.3.2 In mechanical equipment, warm exceptions are usually created by friction caused by improper lubrication, misalignment, worn components or mechanical loading anomalies. Cool exceptions are usually caused by failed components.

4.3.3 Exceptions in insulation systems are usually caused by missing or deteriorated materials, improper installation or insufficient amounts of material.

4.4 Providing opinions about the causes of exceptions, the integrity of the equipment or recommendations for corrective actions require knowledge and skills beyond those of infrared thermography.

4.5 Infrared examinations provide data about equipment at the time of examination only.

4.6 Infrared examinations are not remedial.


4.7 An infrared examination of electrical and mechanical equipment does not assure its proper operation. Other tests and proper maintenance are necessary to ensure their reliable performance.

<sup>1</sup> This guide is under the jurisdiction of ASTM Committee E-7 on Nondestructive Testing and is the direct responsibility of Subcommittee E07.10 on Emerging NDT Methods.

Current edition approved Dec. 10, 1999. Published February 2000. Originally published as E 1934 – 97. Last previous edition E 1934 – 99.

<sup>2</sup> This guide is adapted from the *Guideline for Infrared Inspection and Mechanical Systems* developed by Inspection Institute, 1971 Shelburne Road, Shelburne, VT 05482, 1993.

<sup>3</sup> *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 03.03.

 E 1934

### 5. Personnel Responsibilities

5.1 The infrared thermographer shall:

5.1.1 Have sufficient knowledge of the components, construction and theory of electrical or mechanical equipment, or both, to understand the observed patterns of radiation.

5.1.2 Be knowledgeable of, and comply with, the safety practices and rules of the end user, and

5.1.3 Use an infrared imaging system with imaging or radiometric capabilities, or both, sufficient to meet the examination requirements.

5.2 Unless he/she is a licensed electrician, professional engineer or has other equivalent qualifications, the infrared thermographer:

5.2.1 Shall not perform any tasks that are normally done by these personnel. Unless so qualified and authorized by the end user, the infrared thermographer,

5.2.2 Shall not remove or replace covers or open or close cabinets containing electrical or mechanical equipment,

5.2.3 Shall not measure electric loads of equipment, and

5.2.4 Shall not touch any equipment and shall maintain a safe distance from it.

5.3 The qualified assistant shall fulfill the responsibilities listed in 3.1.5, 6.1, 6.2, 6.4 through 6.4.3, 6.7.1, and 6.8.

5.4 The end user shall assume full responsibility for consequences resulting from actions taken, or not taken, as a result of data provided by an infrared examination.

### 6. Procedure

6.1 The end user shall provide, to accompany the infrared thermographer, a qualified assistant who is knowledgeable of the operation and history of the equipment to be examined.

6.2 With the assistance of the qualified assistant, the infrared thermographer shall develop an inventory list of the equipment to be examined in a logical, efficient and safe route through the facility.

6.3 The infrared thermographer shall perform a calibration test(s), before each quantitative infrared examination, to ensure that all temperature-measuring equipment is within the manufacturers' standard specifications for accuracy.

6.4 The qualified assistant shall prepare the equipment for examination by:

6.4.1 Obtaining authorization necessary to gain access to the equipment to be examined and notifying operations personnel of the examination activities,

6.4.2 Opening or removing, or both, all necessary cabinet and enclosure covers immediately before examination to provide the infrared thermographer with direct views of the equipment.

6.4.3 Ensuring that the equipment to be examined is under adequate load, creating satisfactory loads when necessary, and allowing sufficient time for recently energized equipment to produce stable thermal patterns.

6.5 When examining the equipment, the thermographer will comply with all safety rules, regulations and practices of the end user.

6.6 The infrared thermographer shall perform examinations when the environmental and physical conditions, such as solar gain, wind, surface and atmospheric moisture and heat transfer

are favorable to gathering accurate data.

6.7 The infrared thermographer shall document any exceptions found by recording the data required in 7.2 through 7.2.9 or 7.3 through 7.3.6, or all of these.

*NOTE 1—Special care must be exercised when examining surfaces having low emissivities (<0.5). In these circumstances exceptions may be more difficult to detect. Also, such surfaces produce reflections that can be misleading. The infrared thermographer should be aware of these potential error sources and use techniques to minimize them, such as moving the position of the imager and blocking the surfaces from reflected sources.*

6.7.1 When requested by the infrared thermographer, the qualified assistant shall measure the loads of electrical equipment.

6.8 The qualified assistant shall close or replace, or both, the cabinet and enclosure covers that had been opened or removed in 6.4.2 immediately after examination and documentation by the infrared thermographer.

6.9 The infrared thermographer shall prepare a report for the end user containing the appropriate content listed in Section 7.

6.10 The infrared thermographer shall, when requested by the end user, re-examine each exception after repair to assure that its operating temperature is normal and the potential problem corrected.

### 7. Report

7.1 The infrared thermographer shall provide documentation for all infrared examinations. The following information shall be included in a report to the end user:

7.1.1 The name, affiliation, address, and telephone number of the infrared thermographer, and his/her certification level and number, if applicable.

7.1.2 The name and address of the end user,

7.1.3 The name(s) of the assistant(s) accompanying the infrared thermographer during the examination.

7.1.4 The manufacturer, model and serial number of the infrared imaging system used,

7.1.5 The inventory list (see 6.2) with notations of the items of equipment that were examined and explanations for the items not examined. Also, the items with low-emissivity surfaces (see Note 1) should be identified.

7.1.6 The date(s) of the inspection and when the report was prepared.

7.2 When performing a qualitative infrared examination, the infrared thermographer shall provide the following information for each exception identified:

7.2.1 Its exact location,

7.2.2 A description, such as its significant nameplate data, phase or circuit number, rated voltage, current rating and/or rotation speed,

7.2.3 The ambient air temperature and, when relevant, the wind speed and direction and the sky conditions at the time of the examination,


7.2.4 The time the exception was documented,

7.2.5 Hardcopies of the thermal image (thermogram) and of a corresponding visible-light image,

7.2.6 The field of view or magnification multiplier of the infrared imager lens, and any imager settings that could affect the accuracy, reliability, or repeatability of the inspection data.

7.2.7 Notation of any attenuating media, such as windows,



 E 1934

filters, atmospheres or external optics,

7.2.8 If desired, a subjective repair priority rating provided by the qualified assistant or end user representative, or both, based on the importance of the exception to the safe and profitable operation of the facility, and

7.2.9 Any other information or special conditions which may affect the results, repeatability or interpretation of the exception.

7.3 When performing a quantitative infrared examination, the infrared thermographer shall provide the following additional information for each exception:

**NOTE 2**—The purpose of a quantitative infrared inspection is to produce temperature data. If temperature data are not desired or required, then the infrared thermographer performs a qualitative infrared inspection and does not measure or provide temperatures.

7.3.1 The distance from the infrared camera to the exception.

7.3.2 Whenever possible, the maximum rated load of an electrical system exception and its measured load at the time of the examination, and

7.3.2.1 The percentage load on the electrical exception,

calculated by dividing its measured load by its rated load and multiplying by 100.

7.3.3 The reflected temperature, emissivity and transmission values used to calculate the temperature(s) of the exception,

7.3.4 The temperature of the exception.

**NOTE 3**—Actual temperatures of surfaces having low emissivities may differ from corrected radiometric measurements.

7.3.5 If requested, the difference between the temperature of the exception and the temperature of a defined reference such as a similar component under similar load, ambient temperature or a standard (see Note 3), and

7.3.6 If requested, a comparison of the measured temperatures with reference standards, and complete identification of these standards, including their sources.

## 8. Keywords

8.1 imaging; infrared; infrared examination; infrared inspection; infrared testing; infrared thermography; nondestructive testing; radiometry; temperature criteria; temperature measurement

*The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.*

*This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.*

*This standard is copyrighted by ASTM, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).*

## **ANEXO C. Elementos del procedimiento para inspección por termografía infrarroja según estándar ASTM E-1934-99**

### **TÍTULO**

En este ítem se menciona que se va inspeccionar y con cual técnica

### **OBJETIVO**

En este ítem se describe en donde se realizará la inspección, que proceso o maquinaria se inspeccionará y el nombre de la técnica que se aplicará.

### **ALCANCE**

En el alcance se listan los componentes a evaluar y se da la ruta de inspección para los componentes

### **DOCUMENTOS TÉCNICOS DE REFERENCIA.**

Se deben relacionar, las normas técnicas, estándares y regulaciones técnicas pertinentes a la técnica y componentes bajo estudio.

### **NOMENCLATURA**

En este ítem se relacionan las palabras claves, los acrónimos técnicos, abreviaturas etc.

### **RESPONSABILIDADES Y CALIFICACIÓN DEL PERSONAL**

Sé debe especificar la cantidad de personas requeridas para la inspección, describiendo las competencias técnicas y certificaciones que debe tener cada una de estas personas

### **MATERIALES DE LOS COMPONENTES A INSPECCIONAR:**

Acá se hace una relación y/o descripción de los materiales y/o composición de los componentes a inspeccionar.

### **TÉCNICA USADA**

Acá se consigna una descripción sucinta de la técnica de ensayos no destructivos a usará.

**EQUIPO**

Descripción del equipo a usar, marcar, referencia, especificaciones y las especificaciones técnicas relevantes.

**DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO**

En este ítem hay que describir paso a paso el proceso de inspección, describiendo brevemente los aspectos técnicos inherentes al proceso y/o aplicación.

**INTERPRETACIÓN DE IMÁGENES E INDICACIONES**

Se debe describir bajo que documentos técnicos de referencia, bajo que método o software se analizarán las imágenes o indicaciones encontradas en la inspección.

**NORMAS DE SEGURIDAD**

Se describe si hay alguna norma o aspectos de seguridad de seguridad aplicables para la inspección de equipos mecánicos y eléctricos.

**ELEMENTOS RELEVANTES DEL REPORTE SEGÚN NUMERAL 7 DEL ESTÁNDAR  
ASTM E1933 – 99A**


<b>EMPRESA</b>		<b>Protocolo</b>																										
<b>DESCRIPCIÓN UBICACIÓN</b>		<b>Cámara:</b>																										
<b>EQUIPO Y ELEMENTO</b>		<b>Fecha:</b>																										
<b>TIPO DE INSPECCIÓN</b>		<b>IR 01</b>																										
<b>IMAGEN TERMOGRÁFICA</b>	<b>IMAGEN NORMAL</b>																											
<b>Evaluación:</b>	<b>Evaluación:</b>																											
<b>ANÁLISIS TÉRMICO</b>																												
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2"><b>CLASIFICACION DE FALLA</b></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><math>\Delta T</math> O/S</td> <td></td> </tr> <tr> <td>CONDICIÓN</td> <td></td> </tr> <tr> <td>RESOLUCIO DE IR</td> <td></td> </tr> <tr> <td>LENTE</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	<b>CLASIFICACION DE FALLA</b>		$\Delta T$ O/S		CONDICIÓN		RESOLUCIO DE IR		LENTE		<table border="1"> <thead> <tr> <th><b>SPOT</b></th> <th><b>Valor Medido</b></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Emisividad</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Distancia</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Trefl</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Sp1</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Sp2</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Sp3</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Sp4</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	<b>SPOT</b>	<b>Valor Medido</b>	Emisividad		Distancia		Trefl		Sp1		Sp2		Sp3		Sp4		
<b>CLASIFICACION DE FALLA</b>																												
$\Delta T$ O/S																												
CONDICIÓN																												
RESOLUCIO DE IR																												
LENTE																												
<b>SPOT</b>	<b>Valor Medido</b>																											
Emisividad																												
Distancia																												
Trefl																												
Sp1																												
Sp2																												
Sp3																												
Sp4																												
<b>CRITERIOS DE ACEPTACIÓN O RECHAZO BAJO DOCUMENTACION TÉCNICA, ESTADISITICAS O VALIDADCIÓN CON MODELOS MATEMÁTICOS SEGÚN SEA EL CASO</b>																												
<b>DIAGNÓSTICO</b>																												
<b>RECOMENDACIONES</b>																												

### ANEXO D. Reportes de mantenimiento línea 1 de extrusión de la Empresa Tuboplex S.A

MANTENIMIENTO						
FECHA	PROBLEMA	TIEMPO DE EJECUCIÓN (En Minutos)	Área	Componente	tipo	Mayor a 50 mil pesos
2/09/2014	Rodamiento dañado en la caja	60	Halador	Rodamiento	Mecánico	SI
28/09/2014	La resistencia no calienta porque está en corto	5	Barril	Resistencia	Eléctrico	SI
2/11/2014	Al control de flujo esta torcido por un golpe	10	Sierra	Controlador flujo	Neumático	NO
9/11/2014	Correas rotas	5	Sierra	Correa	Mecánico	NO
4/12/2014	la válvula se quedó pegada	10	Sierra	Válvula	Mecánico	NO
6/12/2014	Se dañaron piñones y rodamientos	4 días	Halador	Rodamiento	Mecánico	SI
6/12/2014	Micro descabezado de la meza	15	Sierra	Pulsador	Eléctrico	NO
9/12/2014	La bobina de la electroválvula esta quemada	10	Acampanador	Bobina	Eléctrico	SI
13/12/2014	Los cilindros presentan demasiado escape de alta en la nariz	30	Sierra	Cilindro	Neumático	NO
19/12/2014	El racor del pisador no mantiene la manguera	10	Sierra	Pisador	Neumático	NO
14/01/2015	Cable está pegado con la resistencia y lo pelo	5	Barril	Cable	Eléctrico	NO
25/01/2015	Hay un cable en el micro suelto	15	Sierra	Pulsador	Eléctrico	NO
11/02/2015	La manguera que va hacia el cilindro está rota	10	Acampanador	Manguera	Neumático	NO
18/03/2015	Contactador en los fases	15	Acampanador	Contactador	Eléctrico	SI
1/04/2015	La clavija tipo plancha esta quemada	15	Cabezal	Resistencia	Eléctrico	SI
4/04/2015	El micro se partió por la mitad porque la sierra siguió de largo	20	Sierra	Pulsador	Eléctrico	NO
11/04/2015	Correas quemadas y desgastadas	5	Sierra	Correa	Mecánico	SI
25/04/2015	El cilindro de avance tiene demasiada fuga por el empaque de la nariz	60	Sierra	Cilindro	Neumático	SI
3/05/2015	La bobina se quema	10	Acampanador	Bobina	Eléctrico	SI
14/05/2015	La prendieron y en la punta del espiral una lona y se atascó no prende	10	Motor	Espiral	Mecánico	SI
22/05/2015	La válvula se queda pegada cuando se acciona	10	Sierra	Válvula	Mecánico	NO
23/05/2015	Se dañaron los rodamientos de la caja inferior	90	Halador	Rodamiento	Mecánico	SI
29/05/2015	Los tiempos del logo están mal digitados	10	Marcador	tiempos	Software	NO
7/06/2015	En la universal presenta fuga, no carga porque chupa aire	30	Acampanador	Bomba	Mecánico	NO
17/06/2015	Tornillos con lo que calibran esta partido 1	90	Cabezal	Boquilla	Mecánico	SI
26/06/2015	El conducto de la refrigeración está roto	120	Barril	Refrigeración	Mecánico	SI
5/09/2015	Zapatas desgastadas	30	Sierra	Zapata	Mecánico	SI

FECHA	PROBLEMA	TIEMPO DE EJECUCIÓN (En Minutos)	Area	Componente	tipo	Mayor a 50 mil pesos
9/09/2015	La bobina del solenoide esta quemada	30	Sierra	Bobina	Eléctrico	SI
28/09/2015	El micro de la sierra está dañado	10	Sierra	Pulsador	Eléctrico	NO
7/10/2015	La bobina de la electroválvula esta quemada	15	Acampanador	Bobina	Eléctrico	SI
12/10/2015	Piñones partidos caja superior	15	Halador	Piñon	Mecánico	SI
25/10/2015	El sello de la motobomba se daño	30	Tolva	Motobomba	Mecánico	SI
26/10/2015	Se soltaron los tornillos de la tapa inferior	10	Halador	Tornillo	Mecánico	NO
29/10/2015	Corto del cable de la motobomba	15	Tolva	Motobomba	Mecánico	NO
12/11/2015	Mini breaker tiene una fase dañado	20	Barril	Resistencia	Eléctrico	NO
28/11/2015	Daño de rodamiento del acople doble piñon 29420	2 dias	Caja reductora	Rodamiento	Mecánico	SI
11/12/2015	La resistencia de la acampanadora esta en corto	15	Acampanador	Resistencia	Eléctrico	SI
26/01/2016	Resistencia en corto	10	Sierra	Resistencia	Eléctrico	SI
28/01/2016	Resistencia estallada	15	Acampanador	Resistencia	Eléctrico	SI
8/02/2016	Maquina en corto motor principal	60	Motor	Bobina	Eléctrico	NO
13/02/2016	El acople esta suelto	40	Tolva	Dosificador	Eléctrico	NO
15/03/2016	Se soltaron 2 cables y termocupla dañada	30	Barril	Termocupla	Eléctrico	SI
21/03/2016	Cambio de pantalla dañada	30	Rac eléctrico	Indicador	Eléctrico	SI
1/04/2016	Un cable se encontraba roto	20	Cabezal	Resistencia	Eléctrico	NO
28/04/2016	Cables desconectados en el tablero	60	Cabezal	Resistencia	Eléctrico	NO
20/07/2016	La válvula de pie se cayo	30	Tina	Bomba	Mecánico	NO
4/08/2016	Zapatas desgastados son 12 zapatas	60	Halador	Zapata	Mecánico	SI
12/08/2016	La válvula de pie esta tapada	30	Tina	Bomba	Mecánico	NO
30/08/2016	Se encontró que los piñones se rompieron	45	Halador	Piñon	Mecánico	SI
3/09/2016	Termocupla desconectada	15	Cabezal	Termocupla	Eléctrico	NO
5/09/2016	Estaba tapada la tubería en cobre	20	Barril	Refrigeración	Mecánico	NO
25/10/2016	Se encontró falla en 2 resistencias	30	Cabezal	Resistencia	Eléctrico	SI
4/11/2016	Daño de electroválvula bobina interna quemada y centro tapado	30	Tina	Bomba	Eléctrico	SI
6/11/2016	El pulsador y contactor se dañaron	30	Rac eléctrico	Contactor	Eléctrico	SI
7/12/2016	Daño en el micro que baja automáticamente	15	Botador	Pulsador	Eléctrico	NO
10/01/2017	Bomba de vacío, acoples dañados vibrador desconectado los pases bornera, cables mal posicionados	15	Rac eléctrico	Bornera	Eléctrico	SI
18/01/2017	Cambio de resistencia	15	Acampanador	Resistencia	Eléctrico	SI
19/02/2017	Fuga de aire por unos pisadores y mangueras	30	Sierra	Pisador	Neumático	SI
26/02/2017	Daño en termocuplas y cambio de resistencias zona 1	15	Barril	Resistencia	Eléctrico	SI

## ANEXO E: Ficha técnica línea 1 de extrusión

		FICHA TECNICA MAQUINARIA Y/O EQUIPOS						TP-FMTO-002	
								Versión	
								0	2013-19-13
<b>1, DATOS TECNICOS</b>							Consecutivo N°		
NOMBRE:	LINEA 1			UBICACIÓN		Planta			
REFERENCIA:	EXTRUSORA CM 55								
TIPO	BITRUDAT								
<b>2, ESPECIFICACIONES MAQUINA</b>									
<b>MOTOR PRINCIPAL</b>			<b>REDUCTOR</b>			<b>CAJA REDUCTORA EXTRUSORA</b>			
Marca	W T G		Marca	WTG	Tipo de engranaje				
Potencia	HP	EW	Relación	25,7	Referencia rodamientos				
	30	22	Potencia	30	Rodamiento axial conico REF 24416 (4)				
Resoluciones	1765		Revoluciones	1700	Rodamiento oscilantes de rodillos REF 22212 (3)				
Tensión	75,4		Torque		Rodamiento oscilantes de rodillo REF 22213 (2)				
Corriente	220 V.		Lubricante	Aceite 220	Rodamiento oscilantes de rodillo REF 22217 (1)				
Frecuencia	60 H z		Volumen de aceite	2 galones	<b>Bomba de vacio</b>				
			Tipo de engranaje	p. Helicoidales	Marca	WTG			
<b>BARRIL</b>					Potencia	HP	2	KW	
Referencia	cm 55				Tension	5,8 A			
<b>Resistencias</b>					Corriente	220 V			
Zona 1	240 x 65 -1700 w.				Frecuencia	60 Hz			
Zona 2	200 x 60 - 1600 w.				Sello mecanico	40179			
Zona 3	200 x 60 - 1600 w.				Mangueras	1/4			
Zona 4	175 x 80 - 1400 w.				<b>Bomba centrifuga</b>				
Refrigeración	Cobre 3/8				Marca	WTG			
Electrovalvulas	2/2				Potencia	HP	2	KW	
					Tension	5,8 A			
					Corriente	220 v			
					Frecuencia	60 Hz			
					Sello mecanico	0			
					Mangueras	1/4			
<b>HALADO PULLER</b>					<b>SIERRA</b>				
<b>Motoreductor</b>					<b>Motor</b>				
Marca	Semitomo				Marca	SIEMENS			
Potencia	3				Potencia	HP	3	KW	
Revoluciones	1750				Tension	5,6			
Tensión	8,3 A				Corriente	220 v			
Corriente	220 V.				Frecuencia	60 Hz			
Frecuencia	60 Hz				Revoluciones	1750			
Relación	60/1				<b>Mandril</b>				
Potencia	3				Rodamientos REF.	62,05			
Revoluciones	1750				Correas Ref.	A 29			
Torque					<b>Cilindros Neumaticos</b>				
Lubricante	Aceite 220				Pisador	632 X 100			
Volumen de aceite	3 Litros				Avance	50 X 800			
Tipo de engranaje	P Eholdatos				Disco	63 X 150			
<b>Sist de traccon zapatas</b>					<b>Botador</b>				
<b>ACAMPANADOR</b>									
Marca	Siemens	ew	Marca	Cobra					
	HP		Relación	3 o 11					
Potencia	2		Potencia	2 A					
Revoluciones	1700		Revoluciones	1700	Cilindros Neum		63 X 300		
Tensión	7 A		Torque		Cilindros de pisador		80 X 200 Doble Vast 490		
Corriente	220 V.		Lubricante	Aceite 220	Cilindros de Acampanador		63 x 300		
Frecuencia	60 Hz		Volumen de aceite	1/4 6 Lon	Cilindros de traslado		50 x 300		
			Tipo de engranaje	Sinfín cetana	Cilindros de Retroceder				

