



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

**DESARROLLO DE UNA GUÍA PRÁCTICA PARA UBICAR FALLAS EN SUBESTACIONES  
DE MEDIA Y ALTA TENSIÓN, POR MEDIO DE ESTUDIOS TERMOGRÁFICOS**

**Héctor Aníbal Alvizures Aguilar**

Asesorado por el Ing. José Guillermo Bedoya Barrios

Guatemala, septiembre de 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DESARROLLO DE UNA GUÍA PRÁCTICA PARA UBICAR FALLAS EN SUBESTACIONES  
DE MEDIA Y ALTA TENSIÓN, POR MEDIO DE ESTUDIOS TERMOGRÁFICOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**HÉCTOR ANÍBAL ALVIZURES AGUILAR**

ASESORADO POR EL ING. JOSÉ GUILLERMO BEDOYA BARRIOS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO ELECTRICISTA**

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

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

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

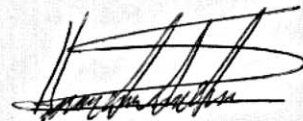
DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Julio Rolando Barrios Archila
EXAMINADOR	Ing. Saúl Cabezas Durán
EXAMINADOR	Ing. Armando Gálvez Castillo
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

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

**DESARROLLO DE UNA GUÍA PRÁCTICA PARA UBICAR FALLAS EN SUBESTACIONES DE MEDIA Y ALTA TENSIÓN, POR MEDIO DE ESTUDIOS TERMOGRÁFICOS**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 13 de agosto 2015.



**Héctor Aníbal Alvizures Aguilar**

Guatemala, 04 de febrero 2016

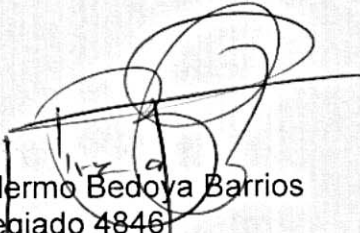
Ingeniero  
Gustavo Benigno Orozco Godínez  
Coordinador del Área de Potencia  
Escuela Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Muy atentamente lo saludo.

Por este medio me permito informarle que he revisado el trabajo de graduación del estudiante HÉCTOR ANÍBAL ALVIZURES AGUILAR, con carne 2006-11661 titulado: **Desarrollo de una guía práctica para ubicar fallas en subestaciones de media y alta tensión, por medio de estudios termográficos.**

El mencionado trabajo llena los requisitos para dar mi aprobación, indicarle que el autor y mi persona somos responsables por el contenido y conclusiones del mismo.

Atentamente

  
Ing. José Guillermo Bedoya Barrios  
Colegiado 4846  
Asesor

ING. ELECTRICISTA  
JOSE GUILLERMO BEDOYA BARRIOS  
COLEGIADO No. 4846



Ref. EIME 38. 2016.  
Guatemala, 8 de marzo 2016.

Señor Director  
Ing. Francisco Javier González López  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:  
**DESARROLLO DE UNA GUÍA PRÁCTICA PARA UBICAR FALLAS EN SUBESTACIONES DE MEDIA Y ALTA TENSIÓN, POR MEDIO DE ESTUDIOS TERMOGRÁFICOS,** del estudiante Héctor Aníbal Alvizures Aguilar, que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,  
D Y ENSEÑADA TODOS

Ing. Gustavo Benigno Orozco Godínez  
Coordinador Área Potencia



sro



REF. EIME 38. 2016.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; **HÉCTOR ANÍBAL ALVIZURES AGUILAR**, titulado: **DESARROLLO DE UNA GUÍA PRÁCTICA PARA UBICAR FALLAS EN SUBESTACIONES DE MEDIA Y ALTA TENSIÓN, POR MEDIO DE ESTUDIOS TERMOGRÁFICOS**, procede a la autorización del mismo.

Ing. Francisco Javier González López



GUATEMALA, 3 DE AGOSTO 2016.

Universidad de San Carlos  
de Guatemala

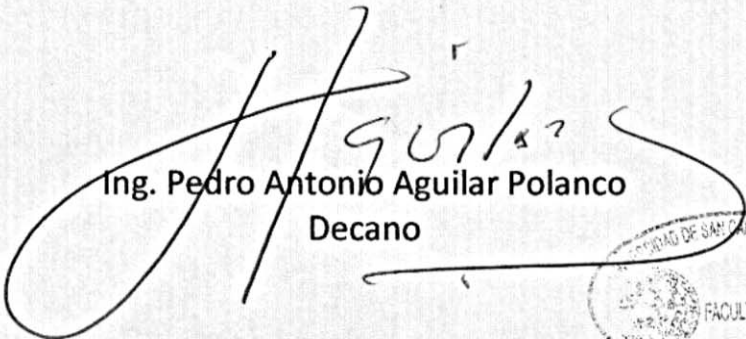


Facultad de Ingeniería  
Decanato

DTG. 405.2016

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **DESARROLLO DE UNA GUÍA PRÁCTICA PARA UBICAR FALLAS EN SUBESTACIONES DE MEDIA Y ALTA TENSIÓN, POR MEDIO DE ESTUDIOS TERMOGRÁFICOS**, presentado por el estudiante universitario: **Héctor Aníbal Alvizurez Aguilar**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano

Guatemala, septiembre de 2016



/gdech



## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Dios</b>	Por hacer posible la finalización de esta etapa de mi vida.
<b>Mis padres</b>	Héctor Conrado Alvizures Ortega y Mayra Susana Aguilar De Paz.
<b>Mi esposa</b>	Daneida del Rosario Arévalo Medrano.
<b>Mi hijo</b>	Héctor Alberto Alvizures Arévalo.
<b>Mi hermano</b>	Pedro Alfredo Alvizures Aguilar.
<b>Mis abuelos paternos</b>	Pedro Albizures y Umbelina Ortega (q. e. p. d.)
<b>Mis abuelos maternos</b>	Julio Aguilar y Blanca De Paz.
<b>Mi familia</b>	En general.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Dios</b>	Sin Él nada es posible.
<b>Mis padres</b>	Por su apoyo incondicional y ser fuente de inspiración.
<b>Mi esposa</b>	Por apoyarme y estar a mi lado en estos momentos de mi vida.
<b>Mi hijo</b>	Por alegrar mis días y mis noches.
<b>Mi hermano</b>	Por su apoyo.
<b>Mis abuelos</b>	Por su apoyo y ejemplo de vida.
<b>Mi familia</b>	En general, por estar presente en todo momento, y darme su apoyo en cada una de las facetas de mi vida.
<b>Mis amigos</b>	Por compartir conmigo muchos momentos de mi vida.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN.....	XI
OBJETIVOS.....	XIII
INTRODUCCIÓN.....	XV
1. TIPOS DE FALLAS EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS.....	1
1.1. Definición de subestación eléctrica .....	1
1.2. Clasificación de una subestación eléctrica .....	1
1.3. Fallas de tipo mecánico .....	2
1.3.1. Soltura o sobrepresión en conexiones eléctricas.....	2
1.3.1.1. Seccionadores.....	3
1.3.1.2. Barras colectoras.....	4
1.3.2. Óxido o suciedad en conexiones eléctricas.....	4
1.3.2.1. Tableros eléctricos.....	5
1.3.3. Par galvánico.....	5
1.3.3.1. Conexiones o uniones eléctricas .....	8
1.3.4. Anomalías en la circulación del aceite en los radiadores de los transformadores .....	8
1.3.4.1. Transformador de potencia.....	9
1.3.4.1.1. Tipos de enfriamiento en transformadores .....	9
1.3.5. Falla en la conexión a tierras físicas.....	11
1.3.5.1. Pararrayos .....	11

1.4.	Fallas de tipo eléctrico.....	12
1.4.1.	Armónicas múltiplos de tres .....	12
1.4.2.	Desbalance de voltaje .....	14
1.4.2.1.	Transformadores de instrumentación... ..	15
1.4.3.	Desbalance de carga .....	16
1.4.3.1.	Interruptor de potencia .....	18
2.	CONCEPTOS DE TERMOGRAFÍA .....	19
2.1.	Definición de la termografía infrarroja .....	19
2.2.	Principios básicos de termodinámica .....	21
2.2.1.	Métodos de transferencia del calor .....	23
2.3.	Espectro electromagnético.....	24
2.3.1.	Definición de emisividad.....	28
2.4.	Importancia de la termografía .....	33
3.	PRINCIPIOS DE UNA CÁMARA TERMOGRÁFICA.....	35
3.1.	Funcionamiento de las cámaras termográficas.....	35
3.2.	Componentes de las cámaras termográficas .....	36
3.2.1.	Lente .....	36
3.2.2.	Detector.....	38
3.2.3.	Controles.....	38
3.2.4.	Pantalla .....	38
3.2.5.	Disparador.....	39
3.2.6.	Cámara digital .....	39
3.2.7.	Software de procedimiento de datos y creación de informes.....	39
3.3.	El campo de visión .....	40
3.3.1.	Campo de visión instantáneo .....	41

3.3.1.1.	Campo de visión instantáneo de medida.....	42
4.	EJEMPLOS DE UBICACIÓN DE FALLAS .....	43
4.1.	Soltura o sobrepresión en conexiones eléctricas .....	43
4.2.	Óxido o suciedad en conexiones eléctricas.....	44
4.3.	Par galvánico .....	45
4.4.	Anomalía en circulación de aceite en los transformadores.....	47
4.5.	Fallas en la conexión a tierras físicas.....	48
4.6.	Armónicas triples .....	49
4.7.	Desbalance de voltajes y cargas .....	52
4.8.	Efecto del viento .....	53
	CONCLUSIONES .....	55
	RECOMENDACIONES.....	57
	BIBLIOGRAFÍA.....	59



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Ejemplo de microgrietas.....	3
2.	Par galvánico .....	6
3.	Componentes del par galvánico.....	7
4.	Tercera armónica.....	13
5.	Desbalance de voltaje.....	15
6.	Desbalance de carga .....	17
7.	Espectro electromagnético.....	25
8.	Tipos de radiación infrarroja.....	28
9.	Campo de visión (FOV).....	41
10.	Resolución espacial y de medida.....	42
11.	Alta resistencia en conexión de barra .....	43
12.	Seccionador con problemas en la conexión eléctrica .....	45
13.	Par galvánico .....	46
14.	Radiadores con problemas de circulación de aceite .....	47
15.	Problema de conexión a tierra física .....	49
16.	Neutro de transformador con calentamiento .....	50
17.	Calentamiento en conductores.....	50
18.	Efecto piel .....	51
19.	Desbalance de carga visto en los CT.....	53
20.	Efecto del viento en un estudio termográfico .....	54

## TABLAS

I.	Escala galvánica.....	7
II.	Valores de emisividad de materiales comunes.....	30



## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
<b>A</b>	Amperio
<b>a</b>	Área
<b><math>\sigma</math></b>	Constante de Stefan-Boltzmann
<b>°C</b>	Grado Celsius
<b>°F</b>	Grado Fahrenheit
<b>K</b>	Grado Kelvin
<b>J</b>	Joule
<b>kV</b>	Kilovoltio
<b>kW</b>	Kilovatio
<b>l</b>	Longitud
<b>MVA</b>	Megavoltioamperio
<b>m</b>	Metro
<b>mm</b>	Milímetro
<b><math>\mu\text{m}</math></b>	Micrómetro
<b>nm</b>	Nanómetro
<b><math>\rho</math></b>	Resistividad
<b>R</b>	Resistencia
<b>V</b>	Voltio



## GLOSARIO

<b>Adiabático</b>	En termodinámica, es aquel proceso en el cual el sistema termodinámico (generalmente, un fluido que realiza un trabajo) no intercambia calor con su entorno.
<b>Anomalía</b>	Condición en la que se presenta una situación diferente a la operación normal.
<b>Bornes</b>	Puntos de conexión de equipos, instrumentos, entre otros.
<b><i>Bushing</i> aisladores</b>	Terminales de las bobinas de alta y baja tensión que atraviesan el tanque o tapa del transformador.
<b>Campo</b>	Conjunto de equipos, conductores y aisladores, que reciben o entregan energía eléctrica a las líneas de transmisión.
<b>CA</b>	Corriente alterna.
<b>Empalme</b>	Unión de conductores eléctricos.
<b>Microbolómetro</b>	Capacidad de captar la radiación que se genera de manera directamente proporcional con el aumento de la temperatura de un cuerpo.

<b>Patio</b>	Conjunto de campos con cierto nivel de tensión, dentro de una subestación.
<b>Píxel</b>	Número de puntos de una imagen térmica, con su propio valor de temperatura correspondiente a un color particular.
<b>Seccionador <i>by-pass</i></b>	Seccionador utilizado para desviar la energía eléctrica de un circuito que recibirá mantenimiento.
<b>Termocopla</b>	Dos conductores de diferentes coeficientes térmicos unidos en un extremo, que entregan una señal eléctrica proporcional a la temperatura a la que se somete la unión.
<b>Trifásico</b>	Sistema compuesto por tres tensiones de igual magnitud, desfasadas 120° eléctricos.

## RESUMEN

Las subestaciones son una parte importante en los sistemas de potencia, ya que en ellas están los equipos necesarios para prevenir, vigilar y medir el comportamiento de los flujos de energía. Otra de sus funciones es la de aumentar o disminuir el nivel de voltaje, de acuerdo al tipo de subestación que sea (de transformación o de maniobra), como del tipo de circuito al que pertenezca (generación, transmisión, distribución o demanda).

La termografía es una ciencia que estudia la radiación infrarroja, la cual está fuertemente ligada al calor que emite, refleja y transmite un objeto. Este calor se puede visualizar con una cámara termográfica, que convierte la radiación infrarroja a una paleta de colores que se pueden interpretar como temperatura. Siempre debe tomarse en cuenta la emisividad del objeto en estudio, la temperatura del ambiente y, al hacer estudios en exteriores, es muy importante la posición del sol y el viento, para considerar el efecto de reflexión y convección que estos dos elementos van a provocar.

Las pruebas no invasivas en subestación por medio de cámaras termográficas ayudan a hacer múltiples pruebas, sin necesidad de sacar de funcionamiento a la subestación. De hecho, para tener buenas mediciones con las cámaras termográficas, es conveniente que la subestación esté en su máximo funcionamiento, ya que esto ayuda a que las fallas de baja magnitud sean más fáciles de detectar. Para facilitar aún más la detección de fallas, es conveniente reducir o eliminar el efecto del sol en los equipos que se están analizando, como en Guatemala la máxima demanda transcurre entre 18:00 y 22:00 horas, este periodo es el mejor para hacer las pruebas de termografía.



## **OBJETIVOS**

### **General**

Motivar una cultura de prevención y mantenimiento por medio de estudios no invasivos.

### **Específicos**

1. Reducir los riesgos humanos, disminuyendo la necesidad de hacer mantenimientos en circuitos energizados.
2. Reducir los costos de reparaciones, al realizar mantenimientos continuos de observación y análisis.
3. Demostrar los beneficios que tienen los estudios termográficos para la detección de fallas en subestaciones.
4. Impulsar la utilización de estudios termográficos en la prevención de fallas por medio de guías rutinarias, como parte de los mantenimientos.
5. Promover, en los encargados de las áreas de mantenimiento, la inquietud para el uso de programas efectivos de guías prácticas.





## INTRODUCCIÓN

El fin primordial del presente trabajo de graduación es crear una guía de trabajo para prevenir y ubicar fallas en subestaciones de media y alta tensión, enfocada esencialmente en el uso de la termografía infrarroja, ya que es una tecnología que permite realizar dicho trabajo sin necesidad de tener contacto físico o eléctrico con los componentes de la subestación.

Para ello, se hace un breve repaso de las definiciones básicas de las subestaciones, los componentes que las conforman y cómo funcionan cada una de ellas. Se explican las fallas más comunes que se pueden encontrar en una subestación, utilizando una cámara termográfica como herramienta de inspección.

También se detallarán los conceptos de termografía, necesarios para interpretar y analizar los resultados que se obtendrán con una cámara termográfica. Se describirá cómo están compuestas las cámaras termográficas, presentando definiciones como emisividad ( $\epsilon$ ) y campo de visión (FOV), las cuales son necesarias para tener buenos resultados en los análisis termográficos.

Se mostrarán varios ejemplos de cómo se ven las diferentes fallas y cómo interpretar el flujo energía que recorre los elementos en forma de calor, para ubicar la fuente que está generando la falla en los equipos que se están analizando.



# **1. TIPOS DE FALLAS EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS**

## **1.1. Definición de subestación eléctrica**

Una subestación eléctrica es un nodo de un sistema eléctrico de potencia, en el cual el voltaje se transforma a niveles adecuados para su transporte, distribución o consumo, con determinados requerimientos de calidad. Está conformada por un conjunto de dispositivos utilizados para controlar el flujo de energía y garantizar la seguridad del sistema por medio de dispositivos automáticos de protección.

## **1.2. Clasificación de una subestación eléctrica**

Existen varias formas de clasificar a las subestaciones, a continuación se presentan las más utilizadas.

- Según la función que desarrollan
  - De transformación
  - De maniobra
  - Mixtas (combinación de las anteriores)
  
- Según la potencia y tensión que manejan
  - De transmisión (arriba de 138 kV)
  - De subtransmisión (69 kV)
  - De distribución primaria (entre 34,5 kV y 13,8 kV)
  - De distribución secundaria (debajo de 13,8 kV)

### **1.3. Fallas de tipo mecánico**

Son aquellas fallas originadas por elementos externos, como el medio ambiente, la mala calidad de materiales, las conexiones inadecuadas o la mala operación del personal a cargo de las instalaciones.

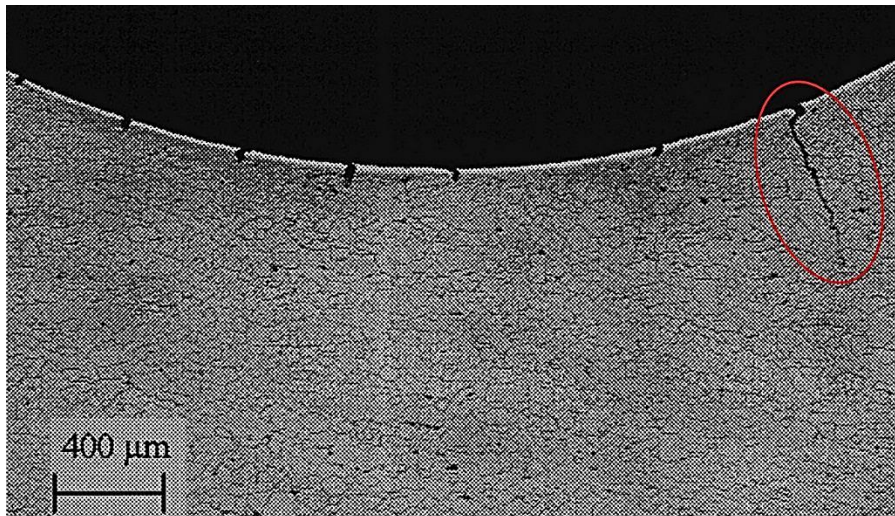
#### **1.3.1. Soltura o sobrepresión en conexiones eléctricas**

Este tipo de falla se debe a que no se aplicó el torque adecuado en las terminales eléctricas. Lo más común es que se aplique menos torque de lo necesario, provocando que la terminal quede floja y se produzca un punto caliente debido a la disminución del área de contacto en una conexión eléctrica.

En aquellas terminales que usan dos o más tornillos, una causa común que produce este tipo de falla se debe a la práctica inadecuada de apriete sin utilizar adecuadamente una llave dinamométrica o utilizándola y ejercer un par de apriete desigual en cada tornillo.

Sin embargo, aplicar la mayor cantidad posible de torque para que “no quede flojo” no es una buena práctica, ya que esto suele generar fatiga en los componentes involucrados, lo cual también provoca, una alta resistencia, debido a las microgrietas producto de la fatiga existente. Estas irregularidades en los materiales se convierten en un punto caliente debido a la interacción a nivel atómico en estas áreas.

Figura 1. **Ejemplo de microgrietas**



Fuente: *Metal mecánica*. <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/138576-Integridad-de-pieza-Concierno-a-un-mecanizador.html>. Consulta: 16 de octubre de 2015.

El calentamiento producido por soldadura o bajo torque es mayor, por lo que es más fácil de detectar y solucionar, ya que solo es de aplicar el torque adecuado. Por el contrario, al existir una sobrepresión o torque alto, que ya es fácilmente detectable, es recomendable cambiar la pieza debido a que el daño está en el material mismo.

Este tipo de fallas se pueden encontrar en diferentes partes de la subestación, entre las cuales están las que siguen.

#### **1.3.1.1. Seccionadores**

Estos pueden desempeñar diversas funciones en las redes eléctricas, siendo la más común la de seccionamiento de circuitos por necesidades de operación o por necesidad de aislar componentes del sistema (equipos o

líneas) para realizar su mantenimiento. En este último caso, los seccionadores abiertos que aíslan componentes en mantenimiento deben tener una resistencia a los esfuerzos dieléctricos entre terminales, de tal forma que el personal de campo pueda ejecutar el servicio de mantenimiento en condiciones adecuadas de seguridad.

### **1.3.1.2. Barras colectoras**

La barra colectora, como su nombre lo indica, se encarga de unir los diferentes circuitos de una subestación. Debido a la naturaleza dinámica de una subestación, es difícil generalizar o categorizar las barras por su capacidad, regularmente cada barra colectora es estudiada por aparte, según las diferentes etapas de crecimiento de la subestación. Las barras colectoras pueden ser flexibles o rígidas, esto depende principalmente de la actividad sistema del área donde estará la subestación.

### **1.3.2. Óxido o suciedad en conexiones eléctricas**

Esta falla puede ocurrir en cualquier conexión dentro de la subestación eléctrica, desde las conexiones a tierra física en los tableros de control, hasta las terminales de alta tensión en los transformadores o cuchillas.

Estas son una de las fallas más fáciles de detectar, ya que se puede ver sin ninguna medición. Sin embargo, no toda terminal sucia o corroída es punto de falla crítico, ya que, si es superficial, no influye en gran medida en el flujo de electricidad. Incluso, puede ser una ayuda para ver la temperatura real de una conexión eléctrica, ya que el óxido de cualquier metal, el polvo o la grasa que represente la suciedad tiene mejor emisividad (ver inciso 2.3.1) que el cobre o el aluminio.

Este efecto empieza a ser significativo cuando el óxido o corrosión afecta el área de contacto entre ambos metales. En el caso de la suciedad, cuando se hacen ajustes en las conexiones y no se hace limpieza en el área, la suciedad queda entre las dos áreas de contacto, lo que causa una resistencia al flujo normal de la corriente eléctrica provocando calentamiento.

Este tipo de fallas se pueden encontrar en diferentes partes de la subestación, como las que se describen a continuación.

#### **1.3.2.1. Tableros eléctricos**

Son estructuras que soportan los instrumentos de control, medición y protección; el bus mímico; los indicadores y alarmas en una subestación. Generalmente se fabrican con lámina de acero y están anclados a la base de concreto de las casetas de tableros.

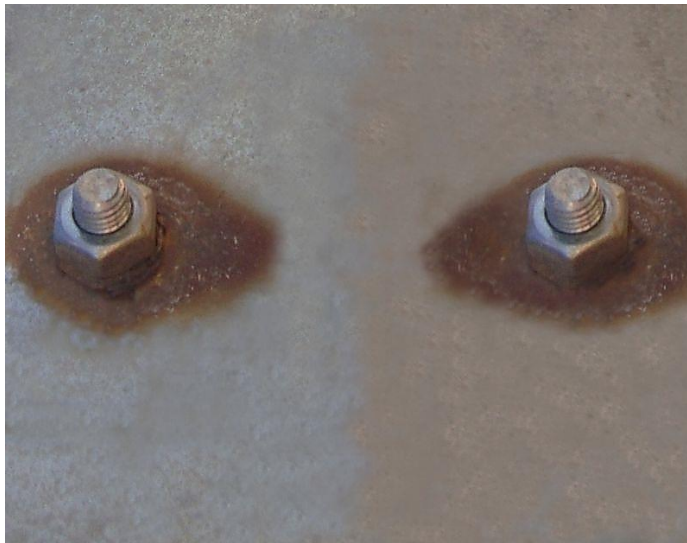
Estos regularmente trabajan a media y baja tensión, para seguridad de los operarios, tienen dos accesos uno frontal, que es donde están todos los instrumentos de medición y control, y uno trasero, que es donde se tiene acceso a la conexión eléctrica. En el caso de los tableros de media tensión se requiere de equipo especializado para trabajar de forma segura.

#### **1.3.3. Par galvánico**

Cuando dos metales o aleaciones diferentes o de posiciones de series electromotrices están en contacto cada uno con un electrolito, se forma un par galvánico que da como resultado la corrosión de uno de los metales, conocido como el ánodo de la pareja. En otras palabras, la corrosión galvánica no afecta al cátodo, que se conoce como metal noble. Esta forma de ataque corrosivo se

conoce como corrosión galvánica, ya que todo el sistema se comporta como una célula galvánica.

Figura 2. **Par galvánico**

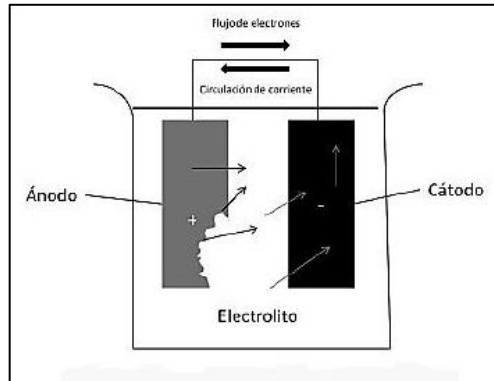


Fuente: *Wikipedia*. [https://es.wikipedia.org/wiki/Corrosi3n\\_galvanica](https://es.wikipedia.org/wiki/Corrosi3n_galvanica). Consulta: 16 de octubre de 2015.

La corrosión galvánica también ocurre en el mismo grupo de metales debido a imperfecciones o heterogeneidades en las superficies del metal o debido a variaciones químicas. Para que esto suceda se requieren cuatro componentes esenciales: ánodo, cátodo, electrolito y trayectoria metálica entre el ánodo y cátodo que completa el circuito (ver figura 3).



Figura 3. **Componentes del par galvánico**



Fuente: *Scielo*. <http://www.scielo.org.mx/img/revistas/tip/v16n1/a3f1.jpg>. Consulta: 21 de octubre de 2015.

Tabla I. **Escala galvánica**

ESCALA GALVÁNICA		
	Platino	
	Mercurio	
	Oro	
	Titanio	
	Plata	
	Níquel	
	Cobre	
	Bronce	
	Latón	
	Estaño	
	Plomo	
	Acero	
	Cadmio	
	Aluminio	
	Cinc	
	Magnesio	
Más Noble – Catódico ↑ ↑		Menos Noble – Anódico ↓ ↓

Fuente: *Witblits*. <http://www.witblits.eu/ca/corrosion-ii/>. Consulta: 30 de octubre de 2015.

Este tipo de fallas se pueden encontrar en diferentes partes de la subestación, como las que se detallan a continuación.

#### **1.3.3.1. Conexiones o uniones eléctricas**

Son los accesorios o componentes que se utilizan, como su nombre lo dice para conectar los cables o barras, fijándolos a los aisladores, también tienen que soportar los esfuerzos mecánicos existentes en su instalación. Los accesorios que más se usan son los conectores y se encuentran en las barras colectoras y en las puestas a tierra. Estos pueden ser soldados, mecánicos o de compresión.

#### **1.3.4. Anomalías en la circulación del aceite en los radiadores de los transformadores**

Este es un problema poco común en los transformadores, sin embargo el no detectarlos a tiempo puede producir otras fallas más perjudiciales para el transformador.

Este tipo de anomalías son provocadas por partículas de polvo o escoria que se acumula en el aceite, ya sea por una mala práctica de mantenimiento, contaminando el aceite, o por el mismo desgaste del transformador que va la descomposición del aceite, provocando acumulación de lodo en los radiadores y en el papel aislante. Esto produce una pared adiabática que reduce la eficiencia de enfriamiento natural del transformador, ocasionando, más desgaste en este.

### **1.3.4.1. Transformador de potencia**

Los transformadores son componentes esenciales en los sistemas eléctricos de potencia. Los transformadores de potencia se utilizan para convertir la energía de alta tensión en energía de baja tensión y viceversa. La potencia puede fluir en ambas direcciones: desde el lado de alta tensión al lado de baja tensión o desde el lado de baja tensión al lado de alta tensión. Un transformador de potencia está compuesto por tres partes principales: activa, pasiva y accesorios.

#### **1.3.4.1.1. Tipos de enfriamiento en transformadores**

Para comprender más este tipo de anomalías, es importante mencionar los tipos de aislamiento que existen, ya que la disipación del calor influye mucho en el tiempo de vida y capacidad de carga, así como en el área de su instalación y su costo.

- Tipo OA: transformador sumergido en aceite con enfriamiento natural. En estos transformadores el aceite aislante circula por convección natural dentro de un tanque que tiene paredes lisas o corrugadas o bien provistos con tubos radiadores.
- Tipo OA/FA: transformador sumergido en líquido aislante con enfriamiento propio y con enfriamiento por aire forzado, es básicamente un transformador OA con la adición de ventiladores para aumentar la capacidad de disipación de calor en las superficies de enfriamiento.

- Tipo OA/FOA/FOA: transformador sumergido en líquido aislante con enfriamiento propio/con aceite forzado – aire forzado/con aceite forzado/aire forzado. Con este tipo de enfriamiento se trata de incrementar el régimen de carga del transformador tipo OA por medio del empleo combinado de bombas y ventiladores. El aumento de la capacidad se hace en dos pasos:
  - Se usa la mitad de los radiadores y la mitad de las bombas con lo que se logra aumentar en 1,33 veces la capacidad del tipo OA,
  - Se hace trabajar la totalidad de los radiadores y bombas con lo que se logra un aumento de 1,667 veces la capacidad del OA.
- Tipo FOA: sumergido en líquido aislante con enfriamiento por aceite forzado y aire forzado. Estos transformadores pueden absorber cualquier carga de pico a plena capacidad, ya que se usa con los ventiladores y las bombas de aceite trabajando al mismo tiempo.
- Tipo OW: sumergido en líquido aislante con enfriamiento por agua. En estos transformadores el agua de enfriamiento es conducida por serpentines, los cuales están en contacto con el aceite aislante del transformador y se drena por gravedad o por medio de una bomba independiente, el aceite circula alrededor de los serpentines por convección natural.
- Tipo FOW: transformador sumergido en líquido aislante con enfriamiento de aceite forzado y con enfriadores de agua forzada. Este tipo de transformadores es prácticamente igual que el FO, solo que el cambiador

de calor es del tipo agua – aceite y se hace el enfriamiento por agua sin tener ventiladores.

### **1.3.5. Falla en la conexión a tierras físicas**

Este tipo de falla puede ser provocada por algunas de las que se han mencionado anteriormente, como soltura o sobrepresión en conexiones eléctricas (ver inciso 2.1.1), óxido o suciedad en conexiones eléctricas (ver inciso 2.1.2) y par galvánico (ver inciso 2.1.3). Adicional a estas, también puede ser provocado por el mal estado de las varillas o mallas que conforman la red de tierras físicas o que el cable que conecta las estructuras con la red de tierras físicas esté en malas condiciones o sea de mala calidad.

Este tipo de falla no afecta de forma constante el funcionamiento de la subestación, sin embargo sí afecta en gran medida cuando existe una falla en los hilos de guarda o en la estructura de la subestación, ya que regularmente estas se drenan a través de los hilos de guarda hacia la tierra, evitando un problema en los equipos vitales de la subestación. Por lo tanto una mala conexión, esta puede repercutir en el buen funcionamiento de la subestación durante una falla, como descargas electroatmosféricas, fallas línea-línea, fallas línea-neutro, entre otras.

Este tipo de fallas se pueden encontrar en diferentes partes de la subestación, como las que se describen a continuación.

#### **1.3.5.1. Pararrayos**

Son elementos de protección de los equipos de las subestaciones contra sobretensiones. Inicialmente, los pararrayos se fabricaban con descargadores y

resistencias no lineales de carburo de silicio (SiC), pero recientemente se han ido reemplazando por pararrayos construidos con resistencias no lineales de óxido de zinc (ZnO) sin descargadores.

El resistor del pararrayos tiene una característica tensión-corriente no lineal y actúa como una baja resistencia al flujo de altas corrientes de descarga, limitando de esa manera la tensión a través del pararrayos y como una alta resistencia a las corrientes normales que corresponden a la tensión de frecuencia industrial del sistema, limitando de esta manera las corrientes residuales. Así, cuando fluyen altas corrientes a través del pararrayos, la baja resistencia mantiene la caída de la tensión (tensión residual) por debajo del máximo esfuerzo eléctrico que resiste el equipo protegido. Al mismo tiempo, la energía de la corriente de descarga y de la corriente residual se convierten en calor en el resistor.

#### **1.4. Fallas de tipo eléctrico**

Son las fallas originadas por elementos propios de la red eléctrica, las cuales afectan el buen funcionamiento o durabilidad de los componentes del sistema eléctrico.

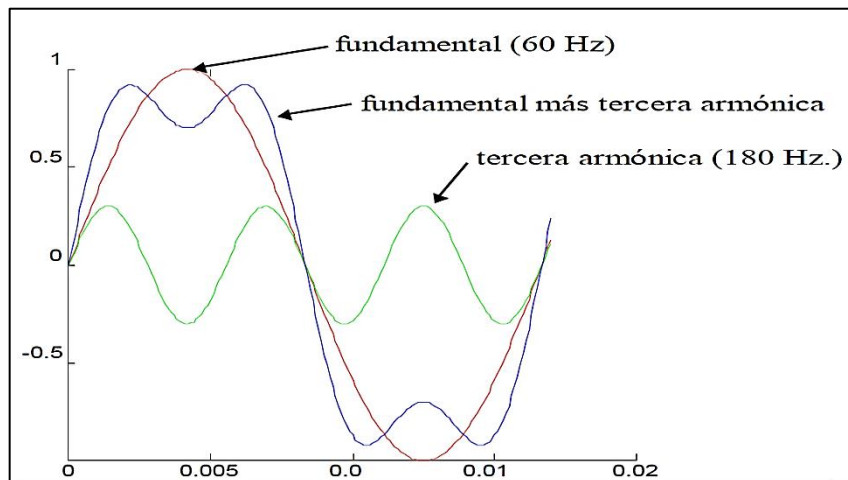
##### **1.4.1. Armónicas múltiplos de tres**

Las armónicas son corrientes o voltajes presentes en un sistema eléctrico, con una frecuencia múltiplo de la frecuencia fundamental. Así, en sistemas con frecuencia de 60 Hz y cargas monofásicas, las armónicas características son la tercera (180 Hz), quinta (300 Hz) y séptima (420 Hz), por ejemplo.

El tema de armónicas es muy extenso e involucra una gran gama de efectos y fallas, por lo cual se enfocarán solo en los múltiplos de tres, ya que estos son los más frecuentes en sistemas de alto voltaje.

Cuando hay transformadores conectados en delta - estrella (comúnmente de distribución) que suministran cargas no lineales monofásicas, como pueden ser fuentes reguladas por conmutación, las armónicas múltiplos de tres circularán por las fases y el neutro del lado de la estrella, pero no aparecerán en el lado de la delta (caso balanceado), ya que se quedan atrapadas en esta produciendo sobrecalentamiento de los devanados. Debido a esto, se debe tener especial cuidado al determinar la capacidad de corriente de estos transformadores bajo condiciones de carga no lineal, puesto que es posible que los voltiamperios medidos en el lado primario sean menores que en el secundario.

Figura 4. Tercera armónica



Fuente: *U-cursos*. [https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2011/2/EL5203/1/material\\_docente/bajar?id\\_materia=384495](https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2011/2/EL5203/1/material_docente/bajar?id_materia=384495). Consulta: 23 de octubre de 2015.

Este tipo de fallas se pueden encontrar en diferentes partes de la subestación, entre las que están las conexiones eléctricas (ver inciso 1.3.3.1) y los transformadores de potencia (ver inciso 1.3.4.1).

#### **1.4.2. Desbalance de voltaje**

El desbalance trifásico es el fenómeno que ocurre en sistemas trifásicos donde las tensiones o ángulos entre fases consecutivas no son iguales. Al existir desbalance de voltaje, el vector del voltaje se ha dividido en tres secuencias, positiva, negativa y cero.

La presencia de secuencia positiva corresponde al flujo de potencia que proviene de la red hacia la carga, es decir, desde el generador hacia la carga.

La presencia de secuencia negativa es una indicación de la medida de desbalance existente en el sistema (trifásico), es decir, de la falta de simetría entre los fasores de tensión en el punto de conexión.

La presencia de componentes de secuencia cero se vincula a la conexión respecto a tierra. Las corrientes de secuencia cero son aquellas que no cierran el circuito por las fases activas, sino que lo hacen por el neutro o por tierra. Las tensiones de secuencia cero en un sistema estrella se encuentran en el centro de cargas, cuya magnitud se mide respecto a tierra o en el neutro eléctrico del lado de generación.



Figura 5. Desbalance de voltaje

Unbalance				
DEMO 0:00:58				
	Vneg.	Vzero	Aneg.	Azero
Unbal.(%)	1.6	0.9	8.7	6.5
	A	B	C	N
Vfund	116.6	112.6	112.5	0.4
Hz	60.16			
$\bar{V}(\circ)$	-360	-121	-240	-95
$\bar{V}_A-V(\circ)$	-8	-15	-1	0
	A	B	C	N
Afund	286	274	283	0
09/16/04 04:44:38 120V 60Hz 3Ø WYE EMS0160				
		TREND		HOLD RUN

Fuente: Fluke Corporation. *Applying powerquality measurements to predictive maintenance.* p. 3.

Este tipo de fallas se pueden encontrar en diferentes partes de la subestación, como las que se presentan a continuación.

#### 1.4.2.1. Transformadores de instrumentación

Son equipos encargados de disminuir las magnitudes de corriente y voltajes a valores seguros y de fácil monitoreo, para la medición y protección de los sistemas de potencia conectados a la subestación.

- Transformador de corriente: estos transformadores son utilizados para efectuar mediciones de corriente en los sistemas de potencia eléctricos. Tienen su devanado primario conectado en serie con el circuito de alto voltaje. La impedancia del transformador de corriente, vista desde el lado

del devanado primario, es despreciable, comparada con la del sistema en el cual estará instalado, aún si se tiene en cuenta la carga que se conecta en su secundario. En esta forma, la corriente que circulará en el primario, está determinada por el circuito de potencia.

- Transformador de potencial: en sistemas con tensiones superiores a 600 V, mediciones de voltaje o potencial no son realizadas directamente en la red, sino a través de equipos denominados transformadores de potencial, cuyos propósitos son los siguientes:
  - Aislar el circuito de baja tensión (secundario) del circuito de alta tensión (primario).
  - Procurar que los efectos transitorios y de régimen permanente existentes en el circuito de alta sean reflejados lo mejor posible en el circuito de baja tensión.

### **1.4.3. Desbalance de carga**

Suele ocurrir en las subestaciones que están conectadas a cargas de distribución, ya que, a pesar de que los circuitos primarios de una subestación son trifásicos, es muy común atender usuarios que en su mayoría son monofásicos. Esto se debe a que es más barato construir circuitos primarios con un tramo principal trifásico y derivaciones de una o dos fases hacia sectores de menor carga, y utilizar transformadores de distribución y redes secundarias monofásicas.

Otra razón por la cual puede existir desbalance de carga es por un desbalance de voltaje, ya que la ley de Ohm indica que la corriente es directamente proporcional al voltaje e inversamente proporcional a la

impedancia del circuito y, al permanecer esta última constante, al aumentar el voltaje aumentará la corriente en la fase donde está el desbalance de voltaje.

Figura 6. Desbalance de carga

Volt/Amps/Hertz				
	A	B	C	N
U <sub>rms</sub>	116.7	112.9	112.6	1.5
U <sub>pk</sub>	167	163	158	4
CF	1.4	1.4	1.4	2.4
Hz	60.16			
A <sub>rms</sub>	288	277	285	1
A <sub>pk</sub>	420	410	430	0
CF	1.5	1.5	1.5	1.9
09/16/04 04:35:06 120V 60Hz 3Ø WYE EN50160				
				TREND
				HOLD RUN

Fuente: Fluke Corporation. *Applying power quality measurements to predictive maintenance*. p. 2.

En la figura 6, en la fase A, donde existe una diferencia significativa de voltaje en comparación con las otras dos fases, existe también un aumento de corriente en la misma fase, con lo que se concluye que el desbalance de voltaje no es el responsable directo del calentamiento, sino el desbalance de carga.

Este tipo de fallas se pueden encontrar en diferentes partes de la subestación, como en la siguiente.

#### **1.4.3.1. Interruptor de potencia**

Son dispositivos mecánicos de interrupción capaces de conducir, interrumpir y establecer corrientes en condiciones normales, así como de conducir durante un tiempo especificado, interrumpir y establecer corrientes en condiciones anormales, como las de cortocircuito. Su función básica es conectar o desconectar del sistema o circuito energizado en líneas de transmisión, transformadores, reactores o barrajes.

Según los elementos utilizados para abrir y apagar el arco que se produce en las cámaras de extinción, se clasifican en interruptores de aceite, neumáticos y en hexafluoruro de azufre.

## **2. CONCEPTOS DE TERMOGRAFÍA**

### **2.1. Definición de la termografía infrarroja**

La termografía por infrarrojos es la técnica que estudia el uso de dispositivos optoelectrónicos para detectar y medir la radiación, a partir de la cual se obtiene la temperatura de las superficies bajo estudio. La radiación es la transferencia de calor que se produce en forma de energía radiante u ondas electromagnéticas, sin que exista un medio directo de transferencia, la termografía por infrarrojos moderna se usa para detectar y medir la temperatura superficial de la estructura del objeto en inspección, cuantificando la cantidad de radiación infrarroja que esta superficie emite.

A nivel semántico, la palabra infrarrojo se deriva de dos palabras, “infra” y “rojo”, es decir, por debajo del rojo, refiriéndose al lugar que ocupa esta longitud de onda en el espectro de la radiación electromagnética. El termino termografía, a su vez, se deriva de raíces semánticas que significan imagen de la temperatura. Los sistemas infrarrojos pueden clasificarse de dos categorías: los de medición de puntos y los de imágenes térmicas.

El primer sistema es de menor costo, pues posee únicamente un detector térmico. Una limitación es que resulta difícil calcular el lugar donde se está apuntando el sensor exactamente, aunque muchos de estos equipos poseen un puntero láser que indica el punto central de la medición, no indica el área total que está siendo medida por el sensor. También se debe considerar que el área de medición del sensor varía de diámetro a medida que se aleja o acerca el medidor al objeto medido, lo cual puede causar mediciones erróneas.

Básicamente, se puede decir que estos equipos están diseñados, dependiendo del fabricante y del modelo, para realizar mediciones a cierta distancia, la cual debe aclarar el fabricante. No existe ningún factor de corrección para las mediciones más allá de la distancia límite que el equipo soporta, pudiendo ser estas mediciones realizadas muy lejanas a la realidad.

El segundo sistema es conocido como imágenes térmicas, está compuesto por un sistema de matriz de plano focal, este es el resultado de una matriz de sensores para crear una imagen térmica en la que se puede medir la temperatura de los objetos presentes de manera independiente y exacta. Es en este tipo de tecnología en la que se basará este documento. Las matrices modernas de las cámaras termográficas van desde 16x16 hasta 640x640 microbolómetros. Para comprender mejor lo anteriormente indicado se puede hacer una analogía con los pixeles de una cámara termográfica, donde una cámara con una matriz de 160x120, tendría un total de 19 200 pixeles o 19.2 megapixeles. En este caso, a lo que se le llama pixeles se le conoce como “microbolómetros” en los sistemas infrarrojos, donde un microbolómetro tiene la capacidad de captar la radiación que se genera de manera directamente proporcional con el aumento de la temperatura de un cuerpo.

El sistema de imágenes térmicas es muy fácil de comprender, pues asigna un arreglo de colores o paleta de colores a cada rango de temperatura. No existe un código de colores para indicar mayor o menor presencia de temperatura en una imagen, por ejemplo, para distintas inspecciones termográficas el color rojo puede representar un dispositivo caliente, pero no siempre se deberá representar un equipo caliente con dicho color. En algunas paletas se puede asociar el punto más caliente de un termograma con los colores amarillo, blanco y negro.

Para comprender esto de una manera más concreta, se puede indicar que la paleta de colores está compuesta por dos o más colores, los cuales en sus diferentes tonalidades cubrirán el rango completo de medición que se está inspeccionando en ese momento. Si, por ejemplo, se está inspeccionando un lugar muy frío y el rango de la cámara va desde -5 a 10 °C, un objeto puede aparecer como el más caliente y tendrá una temperatura máxima cercana a los 10 °C y ser de color rojo, negro, blanco o amarillo, dependiendo de la paleta que se utilice.

Muchas personas prefieren una paleta de colores en la que el punto más caliente esté resaltado con rojo, para hacerlo más familiar con el color asociado a algo caliente. Realmente no existe un estándar que indique qué color se debe usar en una paleta para asociarlo con lo que se conoce como caliente.

## **2.2. Principios básicos de termodinámica**

La termodinámica es la ciencia que estudia cómo la energía térmica (calor) se comporta, transforma y afecta la materia. Para utilizar los equipos de medición por infrarrojo es esencial entender los principios básicos de la transferencia de calor, y así comprender cómo se comporta la temperatura del objeto que se está inspeccionando y lo que se puede esperar del comportamiento de dicha temperatura en función del tiempo sobre el objeto.

Se debe tener en cuenta que, pese a la extraordinaria capacidad de los equipos modernos, estos no pueden pensar por sí mismos y su funcionamiento se encuentra en función de la habilidad del técnico para interpretar los datos, lo cual requiere una comprensión práctica de los principios básicos de la transferencia de calor y de la física de la radiación de energía.

Se comenzará definiendo que la energía es la capacidad de realizar un trabajo, esta se manifiesta de varias formas, por ejemplo, una planta de energía termoeléctrica transforma la energía térmica de la combustión en energía mecánica, es decir, transforma la energía liberada por la combustión en movimientos de un generador de turbina. Luego este movimiento se transforma en energía eléctrica, como las leyes del electromagnetismo lo explican. Se debe resaltar que durante estas transformaciones que sufre la energía, no se pierde ni una parte de ella, toda se transforma en otro tipo de energía. A continuación se mencionan dos leyes de la termodinámica que nos ayudaran a comprender un poco más el comportamiento de la temperatura de un objeto.

La ley cero de la termodinámica dice que cuando existe una diferencia de temperatura entre dos objetos, la energía térmica se transfiere de las zonas más cálidas, o con mayor energía, a las zonas más frías, o de menor energía, hasta alcanzar un equilibrio térmico, lo que implica que ambos objetos tendrán la misma temperatura. Una transferencia de calor tiene como resultado una transferencia de electrones o un aumento de la vibración molecular, por ejemplo, una taza de café se enfriará a temperatura ambiente a menos que se suministre calor adicional para mantenerla caliente. Esto ayudará al momento de realizar inspecciones para entender que el calor buscará siempre transmitirse de las partes más calientes de un objeto a las más frías y esta transmisión seguirá sucediendo mientras se siga alimentando un suministro adicional de energía.

La primera ley de la termodinámica explica que el cambio de la energía interna de un sistema será igual al trabajo que sobre el mismo se realice, más el calor que fluye hacia dicho sistema. Se debe resaltar que la energía ni se crea ni se destruye, únicamente se transforma. Esta ley no es más que la conservación de la energía y servirá para entender que mucha de la energía



que se inyecta a un sistema puede ser disipada en forma de calor, este calor excesivo puede ser una muestra de la manera ineficiente en que se está consumiendo la energía en un proceso dado.

La temperatura es una medida de la energía interna de un objeto, existiendo varias escalas que toman como fundamento diversos puntos de referencia. Para enfriar un cuerpo se deberá crear el mecanismo que extraiga calor del mismo.

También se debe resaltar el hecho que todos los cuerpos en la Tierra irradian luz infrarroja, esto debido a que todo cuerpo que esté arriba de la temperatura del cero absoluto, o cero grados Kelvin, produce energía infrarroja y todos los cuerpos conocidos en la Tierra están arriba de esta temperatura, por ejemplo, la nieve y el hielo irradian luz infrarroja. Es por esta razón que se puede asegurar que se podrá medir la temperatura por medio de la termografía de cualquier cuerpo en este planeta. La única limitación que poseerán las cámaras termográficas son los límites de medición térmica para los que fueron diseñados, es decir, un fabricante podría realizar una cámara que únicamente sea capaz de percibir radiación infrarroja desde los -40 a los 600 °C, pero otros podrían fabricar cámaras que posean un rango mucho más amplio o más reducido.

### **2.2.1. Métodos de transferencia del calor**

La energía térmica se puede transferir por tres métodos distintos, los cuales se mencionan a continuación:

- La conducción, que es la transferencia de energía térmica desde un objeto a otro mediante el contacto directo. Esta se da principalmente en

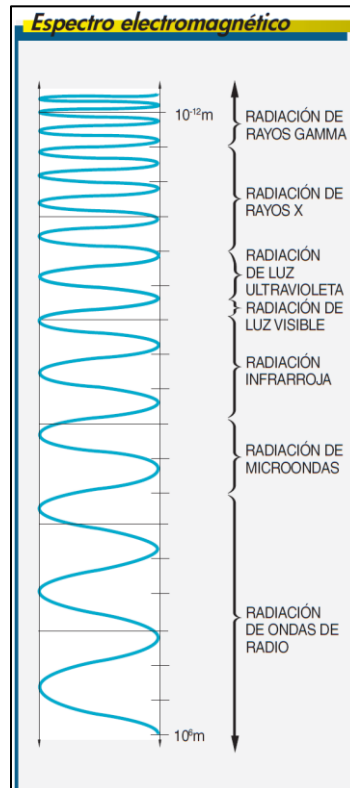
los sólidos, aunque también se da en los fluidos, ya que las moléculas más calientes transfieren su energía directamente a las adyacentes más frías. El coeficiente con el que se produce dicha transferencia de calor depende de la conductividad de los materiales y de la diferencia de temperatura ( $\Delta T$ ) entre los objetos.

- La convección, que es la transferencia de calor que se produce cuando las moléculas se mueven, es decir, las corrientes de aire, gases o fluidos circulan entre las regiones calientes y frías. Esta se da en los fluidos como gases o líquidos e implica el movimiento en masa de moléculas a diferente temperatura. Por ejemplo, las nubes son un buen ejemplo de convección producida a gran escala, donde las masas de aire caliente suben y las de aire frío bajan.
- La radiación, es la transferencia de energía que se produce entre dos objetos a la velocidad de la luz, mediante energía electromagnética, la radiación se puede dar incluso en el vacío. La energía electromagnética es radiación en forma de ondas con propiedades eléctricas magnéticas y puede presentarse de varias formas, por ejemplo, luz visible, ondas de radio y radiación infrarroja. Se puede decir que la radiación térmica es la transmisión de calor mediante ondas electromagnéticas y será este tipo de transferencia de calor la que podrá ser cuantificada por la cámara termográfica, específicamente por el bolómetro.

### **2.3. Espectro electromagnético**

Es el rango de todos los tipos de radiación electromagnética clasificados por longitud de onda. A continuación, se muestra la división de este espectro.

Figura 7. Espectro electromagnético



Fuente: Fluke Corporation & The Snell Group. *Introducción a los principios de termografía*. p. 23.

Las longitudes de onda entre 2 y 100 micrómetros (de  $2 \times 10^{-6}$  a  $1 \times 10^{-4}$ ) de longitud, se denominan radiación infrarroja, región que puede verse remarcada en la figura 7. En este punto se debe indicar que existen dos tipos de cámaras termográficas, las que funcionan en onda larga, es decir, que detectan energía infrarroja en la banda que va desde los 8 hasta los 15  $\mu\text{m}$ , y las cámaras de onda media, que detectan energía infrarroja entre los rangos de 2,5 a 6  $\mu\text{m}$ . Este documento se basará en las cámaras de onda larga.

La radiación electromagnética se puede clasificar por su longitud de onda. Los físicos también hablan de la radiación electromagnética como fotones o haces de energía, a fin de describir cómo interactúan con las superficies. La radiación infrarroja, al interactuar con una superficie, posee varias propiedades:

- Puede ser reflejada, tal como la luz en un espejo, por ejemplo, los metales brillantes.
- Puede ser absorbida, en cuyo caso ocasiona un cambio en la temperatura de la superficie, por ejemplo, el color negro absorbe más energía.
- Puede ser transmitida por la superficie, es decir que la energía atraviesa el objeto, un ejemplo de estos son los lentes de las cámaras termográficas. Pero se debe resaltar que la mayoría de los cuerpos son opacos a la luz infrarroja, es decir que no permiten que la luz se transmita a través de ella.
- Puede ser emitida por el objeto, es decir que el objeto es la fuente que genera dicha energía. Esta radiación emitida es la de mayor interés y es irradiada del cuerpo bajo estudio. La exactitud de la medición depende de la cantidad de energía emitida y luego medida en cada bolómetro. También se debe mencionar que será la radiación reflejada la que causará mayores dificultades al realizar mediciones termográficas, pues no indica la energía que posee una superficie, solo indica la cantidad de energía que emiten otros cuerpos cercanos.

A continuación, se presenta la relación que existe entre los coeficientes antes mencionados:

$$R + A + T = 1$$

Donde

R = coeficiente de energía reflejada

A = coeficiente de energía

T = coeficiente de energía transmitida o emitida

Un ejemplo práctico de este problema puede ser una barra de cobre pulido que tiene un coeficiente de energía reflejada de 0,98, como se sabe, este material no permite que se transmita la radiación infrarroja a través de él, por lo que el coeficiente de energía transmitida es de 0,0, de allí se puede calcular que su coeficiente de energía emitida o emisividad es:

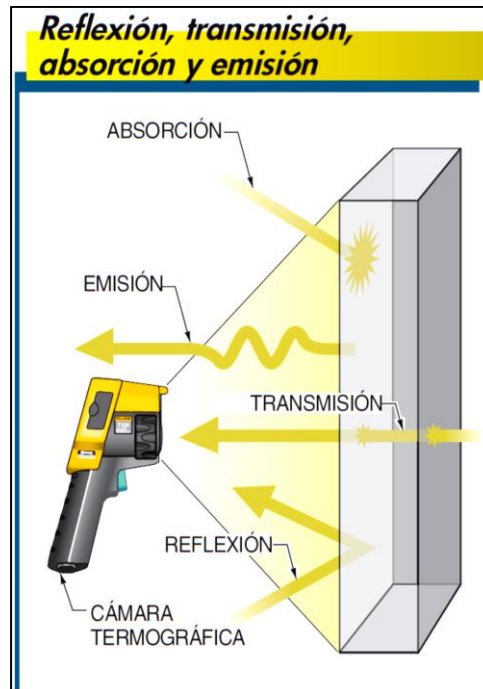
$$0,98+A+0,0=1$$

$$A=1-0,98$$

$$A=0,02$$

Este efecto permite comprender lo siguiente, la radiación transmitida a través de un material o reflejada por el mismo no afecta dicho material. La energía presente en un material es irradiada en el espectro infrarrojo.

Figura 8. Tipos de radiación infrarroja



Fuente: Fluke Corporation y The Snell Group. *Introducción a los principios de termografía*. p. 24.

### 2.3.1. Definición de emisividad

La cantidad de luz infrarroja irradiada por una superficie está determinada por la eficiencia con que la misma emite energía. Por ejemplo, la mayoría de los materiales no metálicos como superficies pintadas, la piel humana, madera, entre otros, emiten energía de manera muy eficiente. Otros materiales como metales son menos eficientes al momento de irradiar la energía. Es decir, cuando se calienta una superficie metálica desnuda, el nivel de aumento de transferencia de calor radiante es comparativamente más pequeño, por lo que resulta difícil distinguir entre una superficie metálica tibia y una caliente, esto tanto para nuestros ojos (luz visible), como para la termografía (infrarrojo).

En este punto se puede decir que los metales tienen baja emisividad, por lo que se recomienda que, al momento de inspeccionar cables eléctricos, la inspección se realice sobre el forro aislante del cable para obtener una medición lo más cercana a la realidad. Otro método que puede resultar muy útil, al realizar inspecciones termográficas sobre piezas metálicas, es usar el método de comparación para observar si existe diferencia de temperatura entre los dispositivos.

La emisividad de la superficie de un cuerpo se cuantifica con un valor que varía desde un mínimo de 0,0 hasta un máximo de 1,0, es decir, entre mejor sea la propiedad física que tiene un cuerpo de irradiar energía infrarroja a mayor temperatura, más se acercará su valor de emisividad a 1,0. En otras palabras, la emisividad es la capacidad que tiene un cuerpo para emitir energía infrarroja a medida que sube la temperatura en el mismo, lo que permite medir de una manera más certera su temperatura. Dos ejemplos de superficies con alto valor de emisividad de un cuerpo son la cinta de aislar con 0,96 y la pintura mate con 0,90.

Para tener una idea del valor aproximado de la emisividad en varios cuerpos, a continuación se muestra la tabla II, con algunos valores para diferentes materiales.

Tabla II. **Valores de emisividad de materiales comunes**

Material	Emisividad ( $\epsilon$ )
Aluminio, pulido	0.05
Ladrillo, común	0.85
Ladrillo, refractario, basto	0.94
Hierro fundido, fundición esbozada	0.81
Hormigón	0.54
Cobre, pulido	0.01
Cobre, negro oxidado	0.88
Cinta aislante, plástico negro	0.95
Vidrio	0.92
Barniz, Bakelita	0.93
Pintura, sintética normal	0.94
Papel, negro, mate	0.94
Porcelana, vidriada	0.92
Goma	0.93
Acero, galvanizado	0.28
Acero, muy oxidado	0.88
Papel de alquitrán	0.92
Agua	0.98

Fuente: Fluke Corporation y The Snell Group. *Introducción a los principios de termografía*. p. 25.

Un factor que afecta el valor de emisividad de un material es el estado de la superficie del mismo. Se puede verificar en los valores indicados anteriormente que el valor de la emisividad no es el mismo para el cobre pulido y para el cobre oxidado. Se puede afirmar que el cobre puede tener varios valores de emisividad dependiendo qué tan bien o mal pulida este su superficie, lo importante a entender es que, si un metal está muy oxidado, su emisividad no es confiable para tomar una medición, haciendo la aclaración que el cobre muy oxidado representa un problema para la conducción eléctrica, por lo que no se desea encontrar cobre oxidado en las inspecciones térmicas relacionadas a la electricidad y electrónica.



Se debe resaltar que calcular la emisividad exacta de un cuerpo es extremadamente difícil en inspecciones en campo, por lo que generalmente las cámaras cuentan, dentro de sus funciones, con una pantalla que muestra una tabla con los valores de emisividad de varios materiales. También, pintar el material o pegarle un cuerpo con emisividad conocida, como lo puede ser la cinta de aislar, y así realizar la inspección con superficies de las cuales se conoce su emisividad.

Para explicar cómo afecta el valor de la emisividad de un cuerpo en la medición de la temperatura por medio de la cámara termográfica, se debe considerar la ecuación Stefan-Boltzman que se muestra a continuación:

$$Q = \sigma \times \varepsilon \times |T^4|$$

Donde

Q= energía transferida por la radiación

$\sigma$ = constante Stefan-Boltzman ( $5,670400 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \times \text{k}^4)$ )

$\varepsilon$ = valor de la emisividad de la superficie

T= temperatura absoluta de la superficie

Como se puede observar en la ecuación, la emisividad está multiplicando el valor absoluto de la temperatura, al máximo valor posible de la emisividad que es 1,0. Un equipo o material con este valor de emisividad produce una medición exacta del valor de la temperatura en la superficie del mismo. Valores más pequeños de emisividad afectarán la exactitud de la medición de temperatura, haciéndola menos exacta, por esta razón no se recomienda realizar inspecciones en cuerpos cuya emisividad sea menor a 0,6.

Por lo anterior, la exactitud de la medición de la temperatura por infrarrojo de un cuerpo depende del tipo de cuerpo que se esté midiendo, debido a su valor de emisividad. Para ejemplificar se puede proponer un experimento práctico: si se toma un cuerpo fabricado de cobre y se mide con la cámara termográfica su temperatura (estando el mismo mucho más alto que la temperatura ambiental), no se obtendrá una medición confiable. Para obtener la medición correcta se debe realizar la medición sobre una emisividad confiable, como puede ser la pintura o la cinta de aislar, es decir, se puede pegar un pedazo de cinta de aislar o pintar una parte del cuerpo fabricado de cobre, esperar un momento y realizar la medición sobre esta nueva superficie. Se observará que los valores obtenidos sobre el cobre y sobre la otra superficie con buena emisividad varían significativamente, donde el valor correcto es el medido en la superficie con emisividad confiable.

Se debe resaltar que, aunque se cuente con un valor de referencia de la emisividad de cierto material y aunque se puede variar dicho valor en la cámara, la desviación en las mediciones de cuerpos con emisividad baja es muy grande, por lo que se recomienda realizar las inspecciones con un valor fijo arriba de 0,9 en la cámara termográfica. En la medida de lo posible, se debe evitar hacer mediciones sobre cuerpos con emisividad menor a 0,6, ya que como se observa en la ecuación anterior, el valor de emisividad está multiplicando la temperatura y al ser el valor de la emisividad muy pequeño dará como resultado un menor valor de energía transferida por radiación, es decir no mostrará el valor real de la temperatura de la superficie del objeto.

Si al realizar una inspección se observa un problema potencial, en un cuerpo con baja emisividad, se recomienda verificar el mismo desde diferentes ángulos de visión para evitar que dicho cuerpo esté reflejando la temperatura de otra fuente de temperatura, pues los materiales con baja emisividad funcionan

como espejos de la luz infrarroja. En conclusión, se recomienda utilizar el método de comparación en cuerpos con emisividad menor a 0,6 para detectar problemas potenciales.

Es en este punto que se debe resaltar que la termografía no fue diseñada para la medición exacta de temperatura, básicamente se concibió para observar comportamientos anormales de la temperatura en los cuerpos, debido a que es imposible determinar con exactitud la emisividad real del cuerpo medido. Por ello no se recomienda utilizar la termografía en el control de procesos industriales. En el mercado se encuentran cámaras con exactitud entre los  $\pm 5$  o  $\pm 2$  grados Celsius, esto más la incerteza introducida por un bajo valor de emisividad de la superficie del objeto puede dar como resultado un valor de temperatura que puede estar alejado de la realidad. Es allí donde nuevamente toma mucha importancia el método de comparación entre dos cuerpos iguales funcionando en igualdad de condiciones, para así detectar comportamientos anormales.

#### **2.4. Importancia de la termografía**

La termografía por infrarrojo tiene un papel importante en la resolución de problemas industriales y comerciales. Con frecuencia aparecen dudas sobre el correcto funcionamiento de un equipo, debido a algunas situaciones evidentes, cosas tan simples como una vibración o un sonido perceptible. Muchas veces pueden ser detalles tan sutiles que el origen del problema puede ser difícil o imposible de determinar.

Se debe comenzar definiendo que una firma térmica es una imagen en cierta paleta de colores que muestra la energía infrarroja o calor emitido desde un objeto. La comparación de esta firma o patrón térmico de un equipo que

funciona con normalidad contra uno con funcionamiento anormal con la misma paleta de colores, es un medio excelente para la localización de problemas potenciales. La ventaja principal de la termografía radica en que las comprobaciones pueden realizarse con rapidez y sin realizar pruebas destructivas.

Además, dado que las cámaras termográficas no necesitan tener contacto físico con los equipos que se examinan, se pueden realizar inspecciones de un equipo o componente mientras está en funcionamiento. La clave para llevar a cabo la resolución de problemas con éxito mediante la termografía es tener una buena comprensión de los requisitos básicos y criterios necesarios para detectar problemas potenciales o estados anormales en cualquier componente específico en un equipo, lo cual únicamente se logra a través de la experiencia al realizar mediciones termográficas.

No siempre resulta fácil saber con exactitud las condiciones necesarias para llevar a cabo la inspección y análisis de los problemas en un equipo o caso particular, se necesita una comprensión sólida de todas las variables, como la transferencia del calor, la radiometría, el uso de la cámara y el funcionamiento del equipo para conseguir una resolución o localización de problemas de manera eficaz.

### **3. PRINCIPIOS DE UNA CÁMARA TERMOGRÁFICA**

#### **3.1. Funcionamiento de las cámaras termográficas**

Es muy útil tener una comprensión general de cómo funcionan las cámaras termográficas, pues es importante que el termógrafo, que es la persona capacitada y entrenada para usar la cámara termográfica, trabaje dentro de las limitaciones del equipo, pues el mismo está regido por las leyes físicas que delimitan el comportamiento de la radiación infrarroja. El propósito de una cámara termográfica es destacar y medir, con cierta inexactitud, la radiación infrarroja que emite un blanco o cuerpo inspeccionado y transformarlo en una imagen radiométrica.

El funcionamiento de una cámara termográfica es de la siguiente manera: la radiación infrarroja converge, debido al diseño de la óptica o lente de la cámara termográfica, en el detector, el cual está compuesto por varios bolómetros de los que se obtiene una medición de la energía irradiada. Esta medición es resultado de un cambio de tensión o resistencia eléctrica en cada bolómetro en dependencia a la cantidad de radiación que está impactando. Estos cambios son agrupados por un multiplexor que arregla la información en una sola señal, la cual luego es amplificada.

Esta señal es convertida de análoga a digital, convertida a un formato de imagen, luego pasa por la corrección de energía gamma para pasar a un filtro reconstructor de la imagen y, finalmente, la señal producida se despliega en una imagen en la pantalla, llamada termograma. Un termograma es la imagen de un blanco electrónicamente procesado, donde los distintos tonos de color

corresponden a la distribución de la cantidad de radiación infrarroja en la superficie del blanco. Con este sencillo proceso, el termógrafo es capaz de observar el termograma e interpretar el comportamiento de la temperatura en la superficie de un blanco.

En el caso de los colores asociados con los diferentes rangos de temperatura en un termograma, la cámara cuenta con varias paletas de colores, la distribución de dichos colores se desplegará en el monitor de la cámara termográfica a la par de la escala de temperatura. Por ejemplo, puede limitarse la paleta de colores a una escala de grises, donde la variación de temperatura en el termograma se mostrará únicamente con base en el cambio de dos colores, el negro y el blanco, y las diferentes tonalidades de estos colores se colocarán a la par del rango de escala de temperatura a la que pertenecen, para que el usuario pueda asociar una tonalidad de temperatura con un rango definido para ese preciso instante.

### **3.2. Componentes de las cámaras termográficas**

Las cámaras termográficas están compuestas de varios componentes que son fundamentales y facilitan su utilización, estos se detallan a continuación.

#### **3.2.1. Lente**

Las cámaras termográficas cuentan con, al menos, un lente que recoge la radiación infrarroja y la enfoca en el detector de infrarrojos. Los lentes de la mayoría de las cámaras se fabrican de germanio (Ge) y se utilizan finas capas de revestimiento antirreflejante para mejorar la transmisión de la radiación infrarroja en los mismos. Estos lentes están diseñados para reflejar la luz, por lo que no hay diferencia en realizar inspecciones termográficas con o sin luz

visible. Por lo general, las cámaras cuentan con una tapa para proteger el lente mientras el equipo no se utiliza o está guardado.

Básicamente existen dos tipos de lentes disponibles y se debe elegir el apropiado dependiendo del trabajo. Los factores a considerar cuando se elige un lente son la visión de campo y el enfoque mínimo. La mayoría de las cámaras termográficas traerá incorporado un lente angular normal o ancho, que no se puede cambiar, y que permite que la cámara pueda tener un campo de visión más ancho en distancias cortas, pero que dará como resultado que no se pueda medir la temperatura de objetos muy pequeños a distancias muy lejanas.

Ciertas cámaras tienen la posibilidad de intercambiar el lente, lo que brindará la oportunidad de gradar también un lente teleobjetivo o telefoto, para tomar imágenes termográficas a largas distancias reduciendo el ángulo de visión, pero logrando un mayor enfoque y, por ende, alcance de objetos más pequeños a distancias más largas. Realmente, los tamaños de objetos y las distancias que podrían alcanzar estas cámaras termográficas con sus dos tipos de lentes dependen del fabricante de la cámara, ya que no existe un estándar de cómo deben realizarlos, al igual que en las cámaras termográficas normales.

Un aspecto importante en las cámaras termográficas es que cuenten con enfoque manual del lente, pues esto ayuda a analizar el comportamiento de la temperatura de un objeto a diferentes distancias y si no se enfoca de manera correcta, las mediciones serán aún más inexactas. Para tener una mejor comprensión del tamaño de objeto que algunas de las cámaras termográficas pueden medir, se debe indicar que ciertos modelos de diferentes fabricantes cuentan con un puntero, el cual sirve para señalar, dentro de la pantalla de la cámara, el objeto al que se está apuntando. Este puntero en su centro tiene un pequeño cuadro. Por lo regular, si el objeto que se está midiendo es capaz de

llenar por si solo completamente ese cuadrado, no importa la distancia a la que esté, se podría medir con cierta inexactitud la temperatura de dicho cuerpo.

### **3.2.2. Detector**

Es aquí donde se centra la radiación proveniente del lente y es donde se produce una respuesta medible, ya sea como carga eléctrica o un cambio de resistencia, es decir, que los detectores son elementos que convierten la radiación infrarroja en una señal eléctrica. Los materiales comúnmente usados para fabricar los detectores son siliciuro de platino (PtSi), telurio de cadmio y mercurio (HgCdTe) o antimonio de indio (InSb). Es esta parte donde se arreglan los detectores o bolómetros en forma matricial para formar una termograma. Haciendo una analogía con las cámaras digitales normales, esta es la parte que indica la cantidad de pixeles o resolución que tiene la cámara.

### **3.2.3. Controles**

Son los que permiten realizar ajustes para manipular las variables de la cámara termográfica, como los valores de emisividad o rango nivel, y para verificar las imágenes almacenadas en la memoria. También, estos controles ayudan a ingresar datos como la fecha y hora, para tener un registro de cuándo se realizó la captura.

### **3.2.4. Pantalla**

Las imágenes térmicas se muestran en una pantalla de cristal líquido (LCD), esta debe ser lo suficientemente grande y brillante para ver y analizar con facilidad en campo. En la pantalla también se puede mostrar información útil como la carga de la batería, fecha, hora, fusión de imagen visible y térmica



(*blending*), paleta de colores escogida y la dimensional de la temperatura (grados Fahrenheit o grados Celsius).

### **3.2.5. Disparador**

Es el componente que permite tomar imágenes del blanco captado por el detector y mostrado en pantalla. En algunas cámaras, este congela la imagen y luego se debe seleccionar si se desea almacenar el termograma. Muchas cámaras incluyen la función de grabación de voz, imágenes adicionales o texto para asignar una referencia a la imagen térmica.

### **3.2.6. Cámara digital**

La mayoría de cámaras termográficas actuales cuentan con una cámara digital, aparte de la cámara infrarroja, para mezclar las imágenes térmicas y digitales en la pantalla y que sea mucho más fácil comprender lo que se observa en la pantalla. Para el uso de estas cámaras es necesario que haya una fuente de luz visible, algunas de las cámaras ya las incorporan.

### **3.2.7. Software de procedimiento de datos y creación de informes**

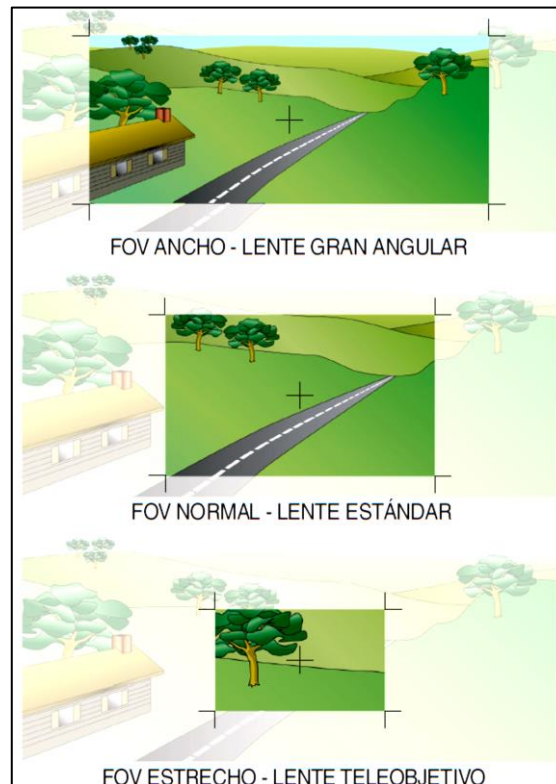
En la actualidad, es imprescindible que las cámaras termográficas cuenten con un software compatible con las computadoras para ajustar y realizar cambios en las variables de las imágenes almacenadas en la memoria, para su correcto análisis y posterior presentación. Estas imágenes deben ser ordenadas y presentadas en un informe o reporte, el cual debe ser realizado por medio de plantillas ya establecidas en el software, de manera que se puedan imprimir o enviar de manera digital.

### 3.3. El campo de visión

Campo de visión, o FOV (por sus siglas en inglés, *field of view*), es una característica que define el tamaño del área total que se ve en una imagen térmica. La lente es el componente de mayor influencia en la conformación del campo de visión, independientemente del tamaño de la matriz del sensor. Por lo regular este valor está dado en grados lineales, por ejemplo 20°x15°. Se puede variar el campo de visión, acercándose o alejándose de un objetivo. De esta manera, si se desea abarcar una mayor área total de imagen térmica, el termógrafo debe alejarse del blanco, lo suficiente para que toda el área deseada quede desplegada en la pantalla, pero si se quiere abarcar una menor área del total, se debe acercar al blanco. Siempre se debe enfocar la cámara cada vez que se varía la distancia del blanco.

Cuando no se tiene la facilidad de acercarse o alejarse del blanco, se debe recurrir a lentes especiales para disminuir o agrandar el campo de visión, como el lente teleobjetivo, que disminuye a la mitad el FOV, o el lente gran angular, que duplica el FOV.

Figura 9. **Campo de visión (FOV)**



Fuente: Fluke Corporation y The Snell Group. *Introducción a los principios de termografía*. p. 27.

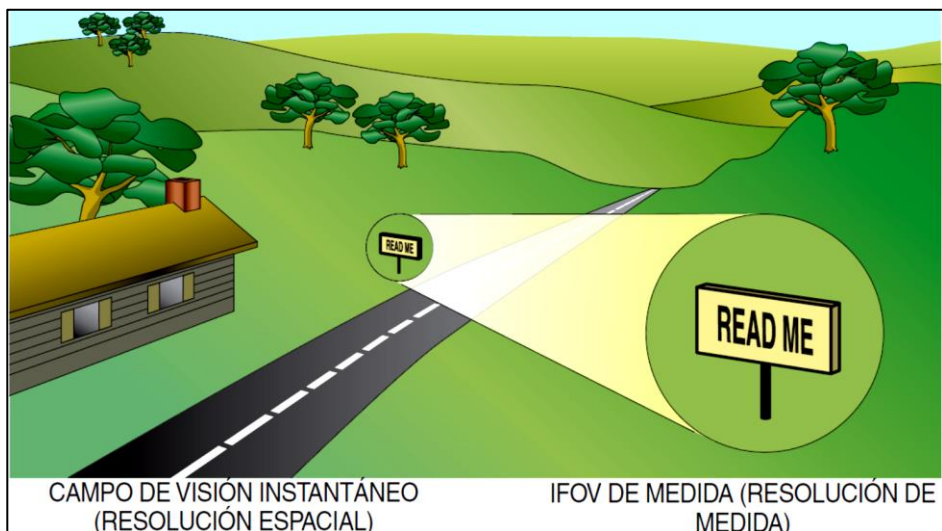
### 3.3.1. **Campo de visión instantáneo**

El campo de visión instantáneo, o IFOV (por sus siglas en inglés, *instantaneous field of view*) se usa para describir las características de resolución espacial instantánea de los equipos termográficos, es decir, se define como el objeto más pequeño que el sistema puede ver a cierta distancia y en cualquier instante. El IFOV se especifica en miliradianes (mRad) y es el resultado de la combinación del detector y el lente.

### 3.3.1.1. Campo de visión instantáneo de medida

El campo de visión de medida o  $IFOV_{medible}$  se usa para describir la resolución de la medición radiométrica de un sistema de matriz de plano focal y define el objeto más pequeño que se puede medir radiométricamente en un instante dado, a una cierta distancia. Una norma general indica que el IFOV es tres veces mayor al  $IFOV_{medible}$ . Una analogía con la vida diaria: si se va por la calle y se observa una valla publicitaria a 9 metros, se necesita estar a 3 metros para poder leerla.

Figura 10. Resolución espacial y de medida



Fuente: Fluke Corporation y The Snell Group. *Introducción a los principios de Termografía*. p. 28.

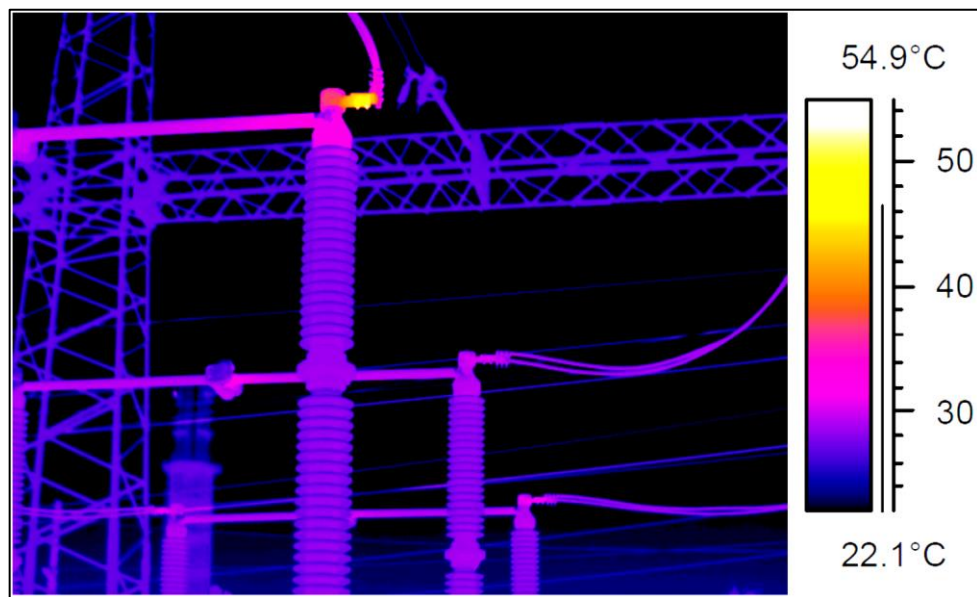
## 4. EJEMPLOS DE UBICACIÓN DE FALLAS

En este capítulo se utilizará la teoría recopilada en los capítulos anteriores para ubicar e interpretar diferentes fallas en una subestación eléctrica, vistas en el capítulo 2.

### 4.1. Soltura o sobrepresión en conexiones eléctricas

Este tipo de fallas generan un patrón térmico, como el que se observa en la figura 11, y es de las fallas más comunes que se encuentran en una subestación, debido a los diferentes puntos de conexión que existen.

Figura 11. **Alta resistencia en conexión de barra**



Fuente: Instituto Nacional de Electrificación.

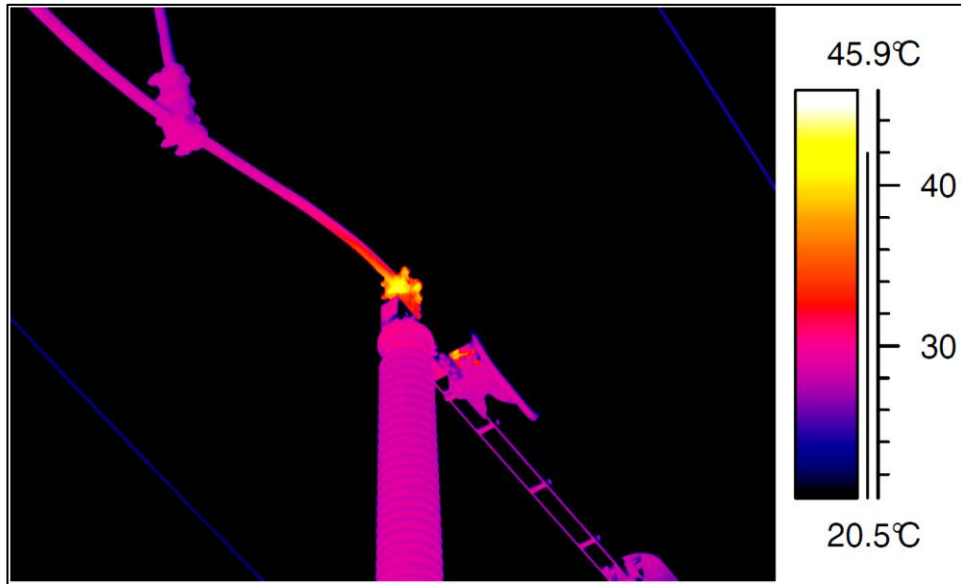
Este tipo de falla se caracteriza porque el origen del patrón de calor se ubica exactamente en el punto de unión de dos terminales o dos superficies, y disminuye rápidamente en ambos elementos.

Se debe tener cuidado con la reflectancia de los materiales, ya que las terminales regularmente son buenas reflectoras de la radiación infrarroja, por lo que se recomienda hacer tomas en diferentes ángulos, y así asegurarse de no estar viendo el reflejo del sol o alguna otra fuente de calor cercana al objeto de estudio.

#### **4.2. Óxido o suciedad en conexiones eléctricas**

El patrón térmico de este tipo de falla es muy similar al anterior, pero hay dos formas de diferenciarlos. La primera es de forma visual y observar si existen señales de suciedad u óxido en la conexión. La segunda es haciendo una toma más cercana y ver a detalle el comportamiento del patrón térmico, si el calor se origina a un lado de la conexión, formando un patrón diagonal, como se ve en la figura 12, se trata de óxido o suciedad.

Figura 12. **Seccionador con problemas en la conexión eléctrica**



Fuente: Instituto Nacional de Electrificación.

Al igual que en la falla anterior, se debe tener cuidado en la reflectancia del objeto en estudio. Además, es recomendable hacer los estudios en horas de baja intensidad solar y alta demanda de potencia, ya que este tipo de fallas generan poco calor y son difíciles de detectar con baja demanda o con la radiación del sol en pleno día.

#### 4.3. **Par galvánico**

Esta es una de las fallas que son muy poco comunes, sin embargo, pueden confundirse con las dos anteriores. La diferencia radica en que el origen del patrón térmico no es la unión entre las dos terminales, más bien es en la unión entre el cable y la terminal, justo como se ve en la figura 13.

Figura 13. **Par galvánico**



Fuente: *Infraredtraining*. <http://www.infraredtraining.com/community/boards/thread/5596/>.

Consulta: 29 de octubre de 2015.

Esto suele ocurrir cuando se usan dos metales con diferente propiedad galvánica. De tal forma, cómo se observa en la tabla I, si se usa una terminal de aluminio en un cable de cobre, al estar muy distantes en la escala galvánica, seguramente producirán el efecto de par galvánico.

Siempre se deben tomar en cuenta otro tipo de inspecciones para asegurar el diagnóstico. Por ejemplo, revisar de forma visual la instalación ayuda a descartar una a una las diferentes fallas, en este caso el ver los materiales involucrados en la instalación (cobre, aluminio, bronce, acero u otros).



#### 4.4. Anomalía en circulación de aceite en los transformadores

Este tipo de falla es fácil de identificar y de ver, debido al funcionamiento del transformador, los aceites refrigerantes y su circulación constante. Como se observa en la figura 14, los primeros cinco conjuntos de paletas del radiador tienen una tonalidad fría con respecto al resto de paletas. En este caso es normal que las paletas estén calientes debido a que en ellas circula el aceite del transformador para enfriarlo y volver a entrar en el transformador.

Figura 14. Radiadores con problemas de circulación de aceite



Fuente: *Irinfo*. <http://www.irinfo.org/04-01-2009-brady/>. Consulta: 29 de octubre de 2015.

Para entender bien este fenómeno es necesario saber cómo funciona un radiador:

- El aceite es calentado por el funcionamiento propio del transformador.
- Por convección, el aceite más caliente tiende a estar por arriba del aceite menos caliente.

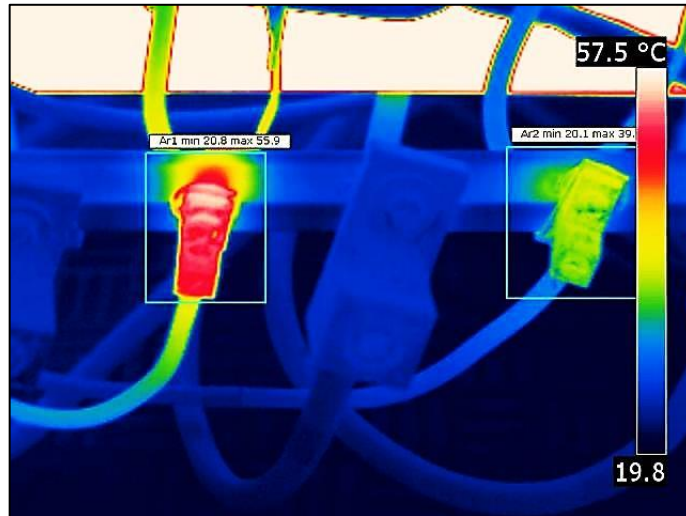
- Las paletas aumentan el área de radiación, aumentando la velocidad con que el aceite se enfría.
- Por el mismo concepto de convección, el aceite enfriado tiende a moverse por debajo del aceite no enfriado
- Al estar todo sellado, se crea una circulación de aceite por el efecto convección dentro del transformador, de esta forma se mantiene la temperatura adecuada para su buen funcionamiento.

De esta manera, es normal ver el radiador de un transformador de potencia, donde la parte de arriba esté más caliente que la parte de abajo, como se ve en las paletas en buen estado de la figura 14.

#### **4.5. Fallas en la conexión a tierras físicas**

Este tipo de falla es difícil de visualizar con la cámara termográfica, ya que regularmente no circula corriente en la tierra física, por lo que no existe un generador de calor para ver una potencial falla.

Figura 15. **Problema de conexión a tierra física**



Fuente: *Houston thermal inspections*. <http://www.houstonthermalinspections.com/Commercial-electrical-transformer>. Consulta: 29 de octubre de 2015.

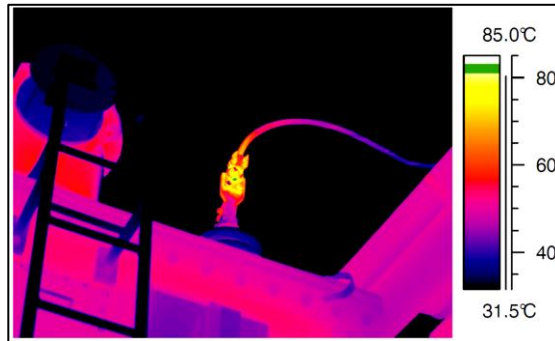
Por ello, cuando se encuentra una conexión caliente, por más pequeño que sea el gradiente térmico entre el punto de referencia y el que se está estudiando, la falla puede ser muy significativa.

En la figura 15 se observan tres terminales, de las cuales, las que están dentro de los recuadros, tienen problemas en la conexión, la de la derecha más que la de la izquierda, y la del centro es como se vería regularmente una terminal a tierra física en estado normal.

#### 4.6. **Armónicas triples**

Este tipo de armónicas se concentran en el neutro de los sistemas eléctricos, ya sean neutros flotantes o aterrizados, al igual que la tierra física, el neutro en sistema balanceado no lleva corriente, por lo tanto, no genera calor.

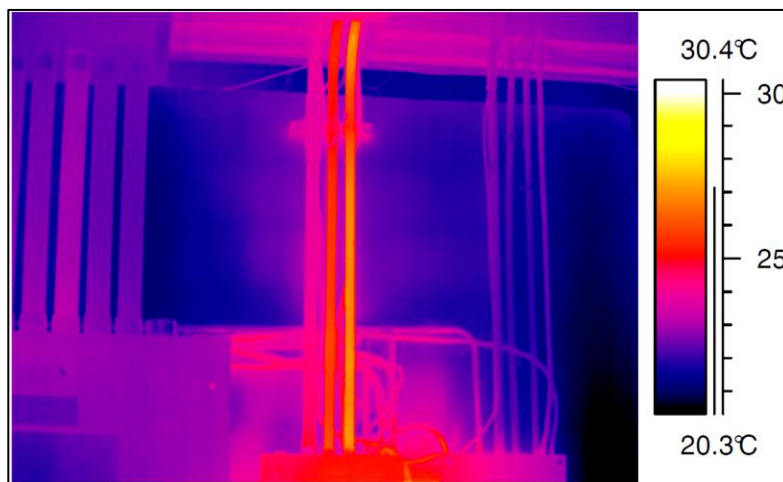
Figura 16. **Neutro de transformador con calentamiento**



Fuente: Instituto Nacional de Electrificación.

Cuando el nivel de corriente por armónica es bastante bajo, este tipo de fallas es difícil de verlo en los conductores, sin embargo, es más fácil verlo en las terminales o puntos de unión, buscando una falla como en la figura 16, alimentada por corrientes armónicas.

Figura 17. **Calentamiento en conductores**

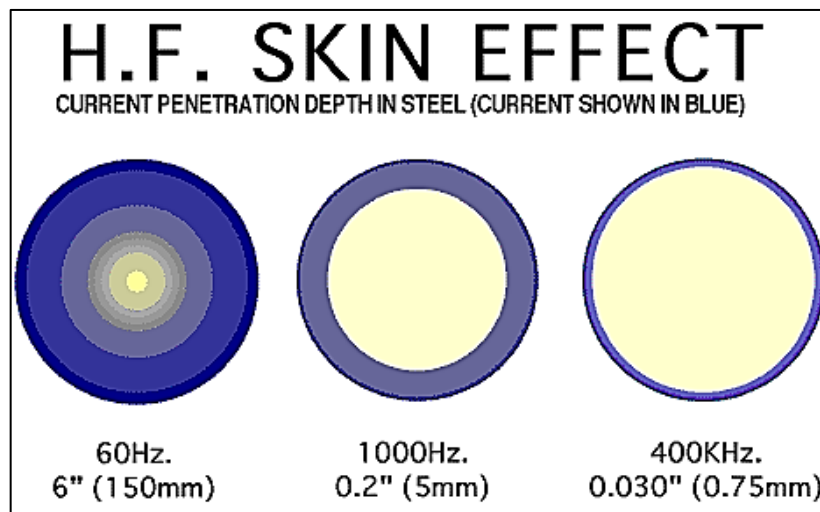


Fuente: Instituto Nacional de Electrificación.

Cuando el nivel armónico es bastante alto, el conductor se puede ver como en la figura 17, donde ya genera el calor suficiente para ver todo el conductor con una temperatura mayor respecto a otros conductores.

Este calentamiento es debido a que, regularmente, el conductor de neutro no está dimensionado para la circulación de corriente constante en él. Adicionalmente, por ser corrientes armónicas las involucradas, las frecuencias son altas (180, 360, 540, 720 Hz, entre otras), provocando en el conductor el efecto piel, el cual hace que el área de circulación del conductor se vea reducida.

Figura 18. **Efecto piel**



Fuente: *Ecured*. [http://www.ecured.cu/index.php/Efecto\\_pelicular](http://www.ecured.cu/index.php/Efecto_pelicular). Consulta: 5 de noviembre de 2015.

En la figura 18 se ejemplifica cómo el área útil donde circula la corriente se va reduciendo conforme se va a aumentado la frecuencia. El área útil de conductor, al llegar a los 1 000 Hz, se reduce a un 10 % con respecto al área

útil que está cuando la frecuencia es 60 Hz. Si se usa la ecuación de la resistencia:

$$R = \rho \frac{l}{a}$$

Donde

R: resistencia del conductor

$\rho$ : resistividad del conductor

l: longitud del cable

a: área útil de un conductor

Se observa que, al reducir el área útil del conductor, aumenta la resistencia del cable. Si se usa la ecuación de pérdida por calentamiento en un conductor:

$$P = I^2 R$$

Donde

P: pérdidas por calentamiento del conductor

I: corriente que circula en el conductor

R: resistencia del conductor

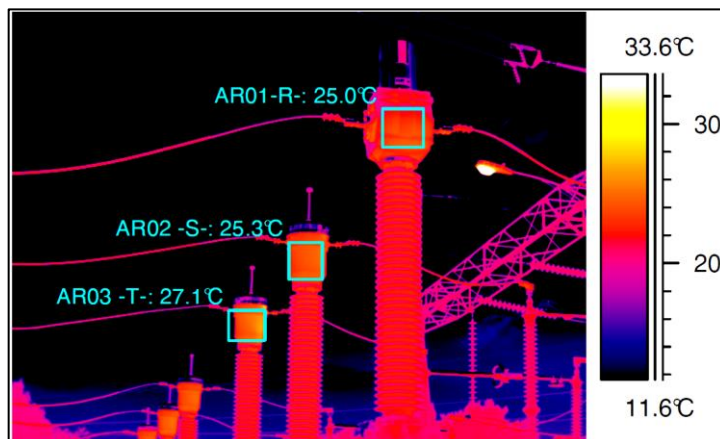
Se observa que, al aumentar la resistencia del conductor, aumenta la pérdida por calentamiento, lo cual se transforma en energía térmica que se detecta con una cámara termográfica.

#### **4.7. Desbalance de voltajes y cargas**

Estas dos fallas se pueden explicar juntas debido a que ambas tienen un comportamiento similar, por el hecho de que el desbalance de carga produce un

desbalance de voltaje. La forma de diferenciar cuál de las dos está sucediendo es haciendo mediciones eléctricas en los tableros de medición.

Figura 19. **Desbalance de carga visto en los CT**



Fuente: Instituto Nacional de Electrificación.

Debido a lo anterior, en la figura 19, de forma representativa, se observa cómo la temperatura en el CT de la fase T es mayor por dos grados aproximadamente que las otras dos fases (S y R).

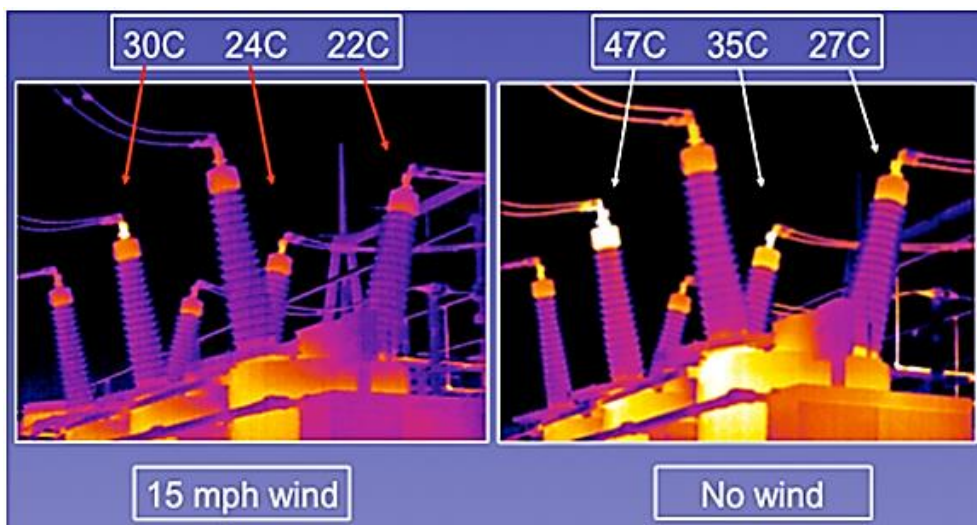
Este tipo de fallas se van a identificar muchas veces en los componentes como los CT seccionadores, entre otros, ya que por la naturaleza de los cables y su baja emisividad es difícil de verlo en estos, aunque sería lo más adecuado, sería un caso muy similar a la figura 19.

#### 4.8. Efecto del viento

Como toda prueba en exterior, es recomendable siempre tomar en cuenta la posición del sol u otras fuentes de calor que puedan afectar el análisis, como

el viento, ya que este puede afectar fácilmente la medición cuando la velocidad del viento excede los 16  $\text{km/h}$  (ver figura 20). Por lo que es recomendable contar con anemómetro, para verificar los parámetros de viento, previo a hacer el estudio.

Figura 20. **Efecto del viento en un estudio termográfico**



Fuente: *Thermal imaging*. <http://thermal-imaging-blog.com/index.php/page/7/#.VjZK3rcvIV>.

Consulta: 1 de noviembre de 2015.



## CONCLUSIONES

1. La termografía sirve para identificar diferentes fallas, interpretando el patrón de temperatura que genera una fuente de calor por medio de imágenes infrarrojas.
2. La única limitante para escoger una cámara termográfica apropiada es la distancia a la que está el objeto de estudio y el punto más cercano al que se puede estar.
3. La termografía no es una herramienta precisa para predecir con exactitud una falla, sin embargo, es una buena herramienta para saber que existe un problema. Además, no requiere desconexión de equipos, ni contacto con equipos energizados, por lo que ayuda a hacer más eficiente el mantenimiento en una subestación eléctrica o en un sistema de alta tensión en general.
4. Tomando en cuenta las condiciones ambientales, se puede decir que la mejor hora para hacer los análisis termográficos está entre las 18:00 y las 22:00 horas, ya que el sol ya no es un factor influyente y el Sistema Nacional Interconectado está en el horario de máxima demanda del día.



## RECOMENDACIONES

1. Comprender los mecanismos de falla que pueden ocurrir en una subestación para facilitar la interpretación de las diferentes imágenes termográficas que se tomen en una inspección
2. Escoger una cámara termográfica adecuada según la distancia a la que van a estar los componentes es muy importante, ya que sí se escoge una cámara económica puede ser que las imágenes no brinden la información necesaria para hacer un diagnóstico, mientras que, si se escoge una cámara de muy altas prestaciones, el retorno de inversión puede llegar a ser muy extenso.
3. Para subestaciones se puede utilizar una cámara termográfica con las siguientes especificaciones mínimas.
  - Matriz de plano focal de 200 x 150 microbolómetros
  - Campo de visión instantáneo 1,05 miliradianes
  - Enfoque ajustable
  - Fácil de usar en condiciones usuales de trabajo
  - Soporte el uso en exteriores
  - Con buena autonomía de la batería, 4 horas en adelante
  - Identificadores para las imágenes térmicas (notas de voz, texto o imágenes fotográficas)
4. Debido a que la mayor parte de subestaciones en Guatemala están a la intemperie, se debe tener muy en cuenta las condiciones climáticas en

el momento de hacer un estudio, ya que factores como el sol o el viento pueden influir en las mediciones y afectar el análisis.

5. Además de las condiciones climáticas, es muy importante tener en cuenta que mientras más carga esté circulando en los circuitos de la subestación, la anomalía va a ser más notoria con la cámara termográfica.
6. Debido a que algunas fallas presentan bastantes similitudes, es necesario ayudarse con otros métodos como inspecciones visuales, mediciones eléctricas, vibraciones o ultrasonido, para tener un mejor diagnóstico sobre el tipo de falla.

## BIBLIOGRAFÍA

1. CONNER, Ron y FRITZ, Jim. *Introducción a los principios de termografía*. Estados Unidos: American Technical Publishers, 2009. 180 p.
2. \_\_\_\_\_. *Aplicaciones de termografía infrarroja*. Estados Unidos: Snell Infrared, 2007. 168 p.
3. RAMÍREZ, Carlos Felipe. *Subestaciones de alta y extra alta tensión*. 2a ed. Colombia: Mejía Villegas, 2003. 220 p.
4. SAGÜI VALENZUELA, Issam Ricardo. *Detección de fallas por medio de la aplicación de termografía infrarroja en las subestaciones de Guate Norte, Guate Sur, Guate Este y Escuintla*. Trabajo de graduación de Ing. Eléctrica. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2006. 190 p.
5. SERWAY, Raymond y JEWETT Jr., John. *Física para ciencias e ingeniería con física moderna*. 7a ed. México: Cengage Learning, 2009.

