

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



Profesor Patrocinante:

Dr. Hugo E. Opazo M.

Informe de Memoria de Título
para optar al título de:

Ingeniero Civil Eléctrico

Evaluación del Estado en Líneas de Alta Tensión Mediante Inspección en Infrarrojo

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Profesor Patrocinante:
Dr. Hugo E. Opazo M.

Evaluación del Estado en Líneas de Alta Tensión Mediante Inspección Termográfica e Infrarrojo

Diego Andrés Palma Sánchez

Informe de Memoria de Título
para optar al Título de

Ingeniero Civil Eléctrico

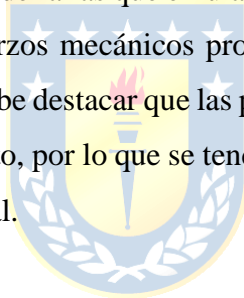
Junio 2014

Resumen

En este documento se realiza un estudio de las técnicas utilizadas en la actualidad para la mantención de líneas AT. Además se realiza una revisión bibliográfica de la teoría detrás del diseño de las líneas AT, de las últimas técnicas de inspección que se han investigado y de la tendencia a la que apuntan las nuevas tecnologías en lo que se denominan las técnicas no destructivas. El enfoque de este documento es el estudio de la inspección del espectro infrarrojo de un conductor aéreo con el fin de detectar anomalías o puntos críticos que podrían eventualmente causar severos problemas en la transmisión de energía eléctrica

Se presenta un experimento hecho en laboratorio que consiste en realizar fotografías en infrarrojo de un conductor con diversas anomalías. Con la ayuda de estándares y cálculos por computador se logra determinar cómo varía la temperatura en un conductor en los puntos donde hay defectos y se visualizan en el espectro infrarrojo.

Se experimenta con distintos tipos de fallas que emulan el deterioro de un conductor con el paso del tiempo, ya sea por corrosión, esfuerzos mecánicos prolongados u otros factores imprevistos al momento del diseño de una línea AT. Cabe destacar que las pruebas no consideran cambios climáticos ni condiciones como presión por el viento, por lo que se tendrán ciertas limitaciones con respecto a la operación de una línea en un entorno real.





A la gente que estimo.

Agradecimientos

Primero que todo, me llena de felicidad poder al fin escribir estas líneas. Cuando inicié la carrera pensé que este momento nunca llegaría. Conocí mucha gente en esta etapa universitaria y la verdad, debo agradecimientos a bastantes. Sin embargo, espero que alguien no se sienta ofendido si es que no aparece en esta sección, la verdad se me puede haber olvidado.

Me gustaría agradecer infinitamente a mi madre *Isabel Sánchez* por todo lo que ha hecho por mí. La educación, valores y enseñanzas que me dio, lo que me permitió ser la persona que soy hoy. Agradezco por tu infinita paciencia y apoyo incondicional durante todas las etapas de mi vida. Creo que faltan palabras para describir cuán agradecido estoy que seas mi madre, por ello gracias. No soy bueno con las palabras, así que agradeceré en general a los otros familiares que estimo, gracias por estar ahí cuando los necesito.

También me gustaría mencionar a mis amigos *Felipe, Jesús, y Enrique*, ya que han estado ahí cuando los necesito, y tenemos vivencias buenas y malas las que de alguna manera influenciaron mi desarrollo como persona. También me gustaría mencionar a mi amiga especial *Gabriela*, con la que últimamente he tenido bastante cercanía y hemos compartido risas, y experiencias que me han enriquecido como persona.

No puedo olvidarme de *chimbombos F.C.*, y con ellos me refiero a mis compañeros de la universidad que ahora podré llamar colegas. Todos vivimos una dura etapa y nos hemos ayudado a crecer como personas y como estudiantes para llegar a esta etapa. En verdad agradezco bastante que me haya tocado compartir con gente tan diversa, debo decir que pese a los malos momentos fui feliz con este grupo de personas. Jamás olvidaré las juntas en esos tugurios que hay en los alrededores de concepción, los torneos de fútbol en los que apoyé al equipo, y esos partidos amistosos que se formaban. No mencionaré nombres, por temor a olvidar a alguno, sin embargo, haré mención especial a mi gran amigo *Jaime Salazar*. En realidad sabes que no soy bueno con las palabras, pero creo que sin tu ayuda y tus consejos, me habría rendido a mitad de camino. Estoy seguro de que serás un gran ingeniero y agradezco que en estos últimos semestres nos haya tocado trabajar en conjunto.

Finalmente, me gustaría agradecer al cuerpo docente del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Concepción, pues la disponibilidad de los profes es destacable y siempre buscan tiempo para resolver las dudas, por muy básicas que sean. Agradezco al profesor *Hugo Opazo* por el patrocinio de esta memoria y por la ayuda brindada para su desarrollo.

Queda mucho por decir, pero los detalles son para las memorias y la intención es lo que cuenta. Nuevamente agradezco a todos los que me apoyaron.

Tabla de Contenidos

LISTA DE TABLAS	VIII
NOMENCLATURA.....	XI
ABREVIACIONES.....	XIII
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
1.2. OBJETIVOS.....	2
1.2.1 <i>Objetivo General</i>	2
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i>	2
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE.....	3
2.1. INTRODUCCIÓN	3
2.2. TRABAJOS PREVIOS.....	3
2.2.1 <i>Diseño de Líneas de Alta Tensión</i>	3
2.2.2 <i>Inspección y Mantenimiento en Líneas de Alta Tensión</i>	4
2.2.3 <i>Técnicas NDT aplicadas a Líneas AT</i>	6
2.2.4 <i>Tecnología Infrarroja Aplicada a Líneas de Alta Tensión</i>	7
2.2.5 <i>Discusión</i>	8
CAPÍTULO 3. ESTUDIO DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS PARA INSPECCIÓN DE LÍNEAS AT.....	9
3.1. INTRODUCCIÓN	9
3.2. PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS.....	9
3.2.1 <i>Inspección Visual</i>	9
3.2.2 <i>Penetración Líquida</i>	11
3.2.3 <i>Partículas Magnéticas</i>	13
3.2.4 <i>Monitoreo de Emisión Acústica</i>	14
3.2.5 <i>Método de las Corrientes Parásitas</i>	15
3.2.6 <i>Inspección por Ultrasonido</i>	17
3.2.7 <i>Inspección Radiográfica</i>	19
3.3. APLICACIÓN DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS A LÍNEAS AT	21
3.3.1 <i>Ondas de Ultrasonido</i>	21
3.3.2 <i>Inspección Electromagnética</i>	25
3.3.3 <i>Inducción de Corrientes de Eddy</i>	26
3.3.4 <i>Medición de Resistencia en Uniones</i>	28
3.3.5 <i>Termografía e Infrarrojo</i>	30
3.4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	33
CAPÍTULO 4. APLICACIÓN DE TÉCNICAS Y EQUIPOS EXISTENTES PARA DETECTAR FALLAS EN LÍNEAS AT.....	34
4.1. INTRODUCCIÓN	34
4.2. CÁMARAS EN INFRARROJO Y TERMOGRAFÍA	34
4.2.1 <i>Consideraciones del Espectro Infrarrojo</i>	35
4.2.2 <i>Principios de la Radiación Térmica</i>	36
4.2.3 <i>Emisividad</i>	37
4.2.4 <i>Influencia Atmosférica</i>	38
4.2.5 <i>Mediciones de Temperatura</i>	39
4.3. PROPUESTA DE SET-UP	40
4.3.1 <i>Características de los Conductores</i>	40
4.3.2 <i>Equipos Utilizados</i>	41
4.4. ANOMALÍAS REALIZADAS EN LOS CONDUCTORES	46
4.5. CONSIDERACIONES PREVIAS	49
CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS	51

5.1.	INTRODUCCIÓN	51
5.2.	RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN	51
5.2.1	Conductor ACSR.....	51
5.2.2	Conductor de Cobre	54
5.2.3	Conductor de Aluminio.....	57
5.3.	COMPARACIÓN CON OTROS MÉTODOS.....	60
5.3.1	Comparación Método de Inspección Electromagnética	60
5.3.2	Comparación con Método de Fuga de Flujo Magnético.....	62
5.3.3	Comparación con Método de Procesamiento de Vídeo.....	64
5.3.4	Comparación con Método de Medición con Ohmstik.....	65
5.3.5	Comparación con Método de Inducción de Corrientes de Eddy	67
5.4.	COMPARACIÓN CON OTRAS PUBLICACIONES EN INSPECCIÓN IR	70
5.5.	Aporte realizado en esta memoria	71
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES		73
6.1.	SUMARIO	73
6.2.	CONCLUSIONES	73
6.3.	TRABAJO FUTURO.....	74
BIBLIOGRAFÍA.....		75
ANEXO A. ANÁLISIS TÉRMICO EN LÍNEAS AT		77
A.1.	IEEE STANDARD 738.....	77
A.2.	CÁLCULOS EN ESTADO ESTACIONARIO	77
A.3.	CÁLCULOS TRANSIENTES.....	78
A.4.	ANÁLISIS TÉRMICO Y ESTUDIO DE AMPACIDAD	79
A.4.1	MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR	79
A.4.2	CONDUCCIÓN.....	80
A.4.3	CONVECCIÓN	80
A.4.4	RADIACIÓN TÉRMICA.....	82
A.4.5	GANANCIA SOLAR	84
A.4.6	EQUILIBRIO TÉRMICO	87
A.5.	EJEMPLO DE CÁLCULO DE AMPACIDAD	88
A.6.	TABLAS DE DATOS DEL STANDARD 738	91
ANEXO B. NORMATIVA CHILENA		94
B.1.	ARTÍCULO 94.....	94
B.2.	ARTÍCULO 107	94
ANEXO C. CÓDIGOS IMPLEMENTADOS EN MATLAB.....		95

Lista de Tablas

TABLA 4.1 Características del Conductor Raven.....	40
TABLA 4.2 Características del Conductor de Cobre.....	40
TABLA 4.3 Características del Conductor Violet.....	41
TABLA 4.4 Especificaciones Técnicas Multi-Amp.....	41
TABLA 4.5 Especificación cámara CEDIP.....	44
TABLA 4.6 Especificaciones cámara FLUKE Ti 25.....	44
TABLA 4.7. Salidas de corriente para Omicron CPC 100.....	46
TABLA 5.1. Estado de la unión en referencia al valor de la razón calculada.....	67
TABLA 5.2. Cuadro comparativo de métodos de inspección de Líneas AT.....	72
TABLA A.1 Variables involucradas en el cálculo de la tasa de pérdidas por convección.....	91
TABLA A.2 Azimutal y altura solar para distintos horarios.....	92
TABLA A.3 Tipos de Formatos de Títulos.....	92
TABLA A.4 Valores para el flujo de calor debido a la radiación solar para distintas alturas solares, dependiendo de la atmósfera.....	93
TABLA A.5 Factor de corrección del flujo de calor por radiación solar, para distintas alturas sobre el nivel del mar.....	93
TABLA B.1 Alturas de los conductores sobre el suelo.....	94



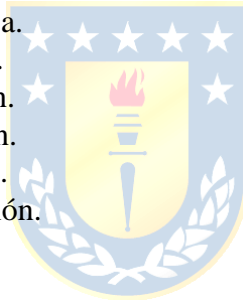
Lista de Figuras

Fig. 3.1 Diferentes apoyos para la realización de la inspección visual.	10
Fig. 3.2 Prueba con líquido penetrante.....	12
Fig. 3.3 Principio básico de la prueba de partículas magnéticas.....	13
Fig. 3.4. Generación de corrientes parásitas en el objeto a inspeccionar y distorsión de la corriente parásita debido a un defecto en el objeto.	16
Fig. 3.5 Tipos de sondas para método de las corrientes parásitas.....	17
Fig. 3.6 Componentes básicos en la prueba de ultrasonido.....	18
Fig. 3.7 Arreglo para realizar la inspección.....	20
Fig. 3.8 Esquema de detección de fallas mediante ultrasonido.....	21
Fig. 3.9 Vara cilíndrica con sus coordenadas.....	22
Fig. 3.10 Disposición de Equipos para la detección de fallas en la línea de transmisión.....	23
Fig. 3.11 Señal de salida del transductor para una línea de transmisión con y sin daños.....	24
Fig. 3.12 Amplitud máxima de la onda reflejada, para distintos niveles de daño.....	24
Fig. 3.13 Ilustración del método de inspección electromagnética.....	26
Fig. 3.14 Cambio de voltaje inducido en el sensor debido a fallas en el cable.....	26
Fig. 3.15 Principio de funcionamiento de método de inducción electromagnética.....	27
Fig. 3.16 Condición de detección de falla.....	28
Fig. 3.17 Representación adimensional de la resistencia de la unión como función de la resistencia de contacto.....	29
Fig. 3.18 Ohmstik.....	30
Fig. 3.19 Relación entre viento y temperatura del conductor considerando el resto de las variables constantes.....	31
Fig. 3.20 Medición de Temperatura a partir de calibración de 2 puntos.....	32
Fig. 4.1. Diagrama de bloques simplificado de una cámara IR.....	35
Fig. 4.2 Ejemplos de materiales detectores y sus respuestas espectrales relativas a distintas bandas de IR.....	36
Fig. 4.3 Atenuación atmosférica (áreas blancas) con un cuadro de los gases y el vapor causantes de la mayoría de esta. Las áreas bajo la curva representan la máxima transmisión IR.....	39
Fig. 4.4 Multi-Amp.....	41
Fig. 4.5. Muestra de conductor tendido.....	42
Fig. 4.6. Propuesta de set-up para realizar las pruebas.....	42
Fig. 4.7. Cámara CEDIP.....	43
Fig. 4.8. Cámara FLUKE Ti25.....	43
Fig. 4.9. Omicron CPC 100.....	45
Fig. 4.10. Amplificador de corriente para Omicron CPC 100.....	45
Fig. 4.11. Reducción del área transversal en conductor ACSR.....	46
Fig. 4.12. Corte de 2.5 [mm] de profundidad en conductor ACSR.....	46
Fig. 4.13. Corte de 2 [cm] de hebra en conductor ACSR.....	46
Fig. 4.14 Reducción del área transversal en conductor de Cobre.....	47
Fig. 4.15 Corte de 2.5 [mm] de profundidad en conductor de Cobre.....	47
Fig. 4.16 Corte de 2 [cm] de hebra en conductor de Cobre.....	47
Fig. 4.17. Reducción de área transversal del conductor de aluminio.....	47
Fig. 4.18. Cortes en el conductor de aluminio.....	48
Fig. 4.19. Corte de 2 [cm] de hebra en conductor de aluminio.....	48
Fig. 5.1. Espectro infrarrojo para reducción del área transversal utilizando cámara CEDIP.....	51

Fig. 5.2. Espectro infrarrojo para reducción del área transversal utilizando cámara FLUKE Ti25...	52
Fig. 5.3. Espectro infrarrojo para corte de 2.5 [mm] de profundidad, utilizando cámara CEDIP.	52
Fig. 5.4 Espectro infrarrojo para corte de 2.5 [mm] de profundidad, utilizando cámara FLUKE Ti25.	52
Fig. 5.5. Espectro infrarrojo para corte de 2 [cm] de una hebra, utilizando cámara CEDIP.	53
Fig. 5.6 Espectro infrarrojo para corte de 2 [cm] de una hebra, utilizando cámara FLUKE Ti25.....	53
Fig. 5.7. Espectro infrarrojo para reducción del área transversal utilizando cámara CEDIP.....	54
Fig. 5.8. Espectro infrarrojo para reducción del área transversal utilizando cámara FLUKE Ti 25 y una corriente de 200 [A].....	55
Fig. 5.9. Espectro infrarrojo para corte de 2.5 [mm] de profundidad, utilizando cámara CEDIP	55
Fig. 5.10. Espectro infrarrojo para corte de 2.5 [mm] de profundidad, utilizando cámara FLUKE Ti25, inyectando 200 [A] al conductor.	55
Fig. 5.11. Espectro infrarrojo para corte de 2 [cm] de una hebra, utilizando cámara CEDIP	56
Fig. 5.12. Espectro infrarrojo para corte de 2 [cm] de una hebra, utilizando cámara FLUKE Ti25, con una corriente de 200 [A] circulando en el conductor.	56
Fig. 5.13. Espectro Infrarrojo de las anomalías en el conductor de Aluminio (200 [A]).....	57
Fig. 5.14. Espectro Infrarrojo de las anomalías en el conductor de Aluminio (500 [A] – 10 [min]).	58
Fig. 5.15. Espectro Infrarrojo de las anomalías en el conductor de Aluminio (800 [A] – 5 [min])...	58
Fig. 5.16. Espectro Infrarrojo de las anomalías en el conductor de Aluminio utilizando cámara Fluke.....	59
Fig. 5.17. Anomalías estudiadas con el método de Inspección Electromagnética.....	60
Fig. 5.18. Datos sensados con método de Inducción Electromagnética para distintas fallas.....	61
Fig. 5.19. Esquema del método de detección de flujo magnético de fuga.	62
Fig. 5.20. Detección de fallas mediante el método de Fuga de Flujo Magnético.	63
Fig. 5.21. Área disminuida de la imagen capturada del conductor.	64
Fig. 5.22. Detección de falla mediante comparación de brillo.....	65
Fig. 5.23. Detección de falla mediante comparación de contorno.	65
Fig. 5.24. Medición de Resistencia utilizando Ohmstik.	66
Fig. 5.25. Proceso de evaluación del estado de una unión utilizando Ohmstik.	66
Fig. 5.26. Diagrama eléctrico que representa el método de medición.	68
Fig. 5.27. Impedancia medida alimentando derivación de 98 vueltas a 1 [kHz] para inspección de conductor AAC.	69
Fig. 5.28. Termografía de una unión desgastada. La corriente que fluye en los conductores es de 250 [A].	70
Fig. 5.29. Termografía de una unión desgastada luego de 3 minutos en test de laboratorio. La corriente para la prueba es de 60 [A].	70
Fig. 5.30. Termografía de una unión desgastada luego de 50 minutos en test de laboratorio. La corriente para la prueba es de 60 [A].	71
Fig. 5.31. Termografía de una unión desgastada en un día soleado con viento sobre los 2 [m/s].	71
Fig. A.1 Cambio en escalón de la corriente y respuesta en la temperatura.....	79
Fig. A.2 Transferencia de calor por convección.	82
Fig. A.3 Ángulos en la ganancia de calor solar.....	85
Fig. A.4 Declinación Solar.....	86
Fig. A.5 Balance Térmico en el conductor Aéreo.....	87

Nomenclatura

N	: Número de espiras de la bobina.
B	: Campo magnético
A	: Área transversal.
Φ	: Flujo magnético.
v	: Voltaje inducido en la bobina.
J_0	: Función de Bessel de orden 0.
J_1	: Función de Bessel de orden 1.
ω	: Frecuencia $2\pi f$.
k	: Número de onda.
c_B	: Porción de la velocidad de la onda en un medio limitado.
c_S	: Velocidad de la onda de corte.
u_r	: Desplazamiento radial de los modos longitudinales.
u_z	: Desplazamiento axial de los modos longitudinales.
Δz	: Separación entre dos puntos distintos.
J	: Densidad de corrientes parásitas.
f	: Frecuencia
μ	: Permeabilidad magnética.
σ	: Conductividad eléctrica.
x	: Distancia de penetración.
α	: Coeficiente de absorción.
ρ	: Coeficiente de reflexión.
τ	: Coeficiente de transmisión.
W	: Radiación total.
ε	: Emisividad.
λ	: Longitud de Onda.
T	: Temperatura Absoluta.
σ	: Constante de Stefan-Boltzmann.
W_{obj}	: Energía emitida por un objeto.
W_{bb}	: Energía emitida por un cuerpo negro.
W_{amb}	: Energía emitida por el ambiente.
W_{atm}	: Energía emitida desde la atmósfera.
q_{cond}	: Calor transferido por unidad de longitud.
k	: Conductividad Térmica.
$R(T_c)$: Resistencia del conductor a la temperatura T_c .
$R(T_{high})$: Resistencia del conductor a la temperatura T_{high} .
$R(T_{low})$: Resistencia del conductor a la temperatura T_{low} .
q_{cn}	: Tasa de pérdidas de calor por convección natural.
ρ_f	: Densidad del aire.
D	: Diámetro del conductor.
T_c	: Temperatura del conductor en °C.
T_a	: Temperatura ambiente en °C.
V_w	: Velocidad del viento.
μ_f	: Viscosidad dinámica del aire.



k_f	: Conductividad térmica del aire.
T_{film}	: Temperatura promedio entre el aire y el conductor.
K_{angle}	: Factor de corrección para la dirección del viento.
q_r	: Tasa de pérdidas de calor por radiación.
q_s	: Tasa de flujo de calor.
A'	: Área proyectada del conductor por unidad de longitud.
Q_{se}	: Flujo total corregido de calor por radiación solar.
θ	: Ángulo efectivo de incidencia de los rayos solares.
H_c	: Altitud del sol.
Z_c	: Azimutal del sol.
Z_l	: Azimutal de la línea.
δ	: Declinación solar.
Lat	: Latitud.
ω	: Ángulo horario.
K_{solar}	: Factor de corrección del flujo de calor por radiación solar.
H_e	: Altura sobre el nivel del mar.
C_p	: Calor específico del material del conductor.
m	: Masa por unidad de longitud del conductor.



Abreviaciones

Mayúsculas

AT	: Alta tensión.
IR	: Infrarrojo.
FPA	: Focal Plane Array.
QWIP	: Quantum Well Infrared Photon.
MWIR	: Medium Wavelength IR.
LW	: Long Wavelength.
NDT	: Non-Destructive Testing
EPRI	: Electric Power Research Institute



Capítulo 1. Introducción

1.1. Introducción General

En líneas de transmisión, los conductores se encuentran expuestos a distintas condiciones climáticas tales como viento, lluvia, etc. Un problema que ocurre con dichos conductores es el desgaste gradual que sufren, el cual, si no es detectado a tiempo puede provocar su ruptura lo que conlleva a serios problemas de operación. Mientras más años de uso tenga una línea de transmisión los conductores son más susceptibles a presentar problemas. La mayoría de las empresas de transmisión, y en menor medida de distribución, inspeccionan sus conductores de forma rutinaria intentando encontrar imperfecciones para reducir los problemas mencionados. Sin embargo, algunos métodos usados para realizar esta tarea no tienen la suficiente precisión y pueden llevar a realizar un diagnóstico erróneo. Como consecuencia, muchos conductores podrían ser reemplazados prematuramente, mientras que otros restantes que permanecen en servicio podrían encontrarse seriamente dañados y en condiciones en las cuales podrían fallar en cualquier momento.

Las razones más comunes por las cuales los conductores fallan son fatiga, desgaste, corrosión, y sobrecargas mecánicas. La corrosión es una de las principales causas del deterioro de los conductores. Los puntos corrosivos causan concentración de tensión y limitan el libre movimiento de los cables y alambres aumentando la tensión mecánica a la que se ven expuestos. Las líneas podrían también degradarse junto a su superficie, esto se traduce en una reducción de su sección transversal y en consecuencia de sus propiedades mecánicas. La severidad de la corrosión varía a lo largo del conductor y es más evidente en las áreas de alta polución y en donde ocurren cambios repentinos de temperatura o humedad.

Intentando minimizar los riesgos de falla y sus consecuencias se han elaborado normas de seguridad y códigos que recomiendan la realización periódica de inspecciones para conocer el estado actual del cable [6]. Dichos estándares muestran métodos de inspección, las causas de fallas más comunes, criterios de reemplazo, y procedimientos de mantención de cables.

Se realizarán pruebas utilizando la tecnología en infrarrojo y termografía. Con las bases teóricas y los datos medidos se determinará el estado de la línea logrando detectar fallas o defectos.

1.2. Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Utilizar equipamiento, tecnología infrarroja y termografía con el objetivo de detectar anomalías o defectos en líneas de Alta Tensión.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Analizar las pruebas y tecnología existentes para la detección de defectos en líneas AT.
- Detectar defectos físicos en líneas AT utilizando la tecnología en infrarrojo con equipos existentes en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Concepción.



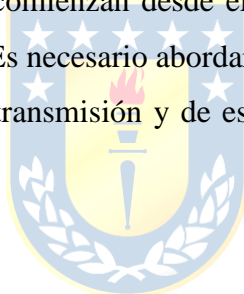
Capítulo 2. Estado del Arte

2.1. Introducción

Al aumentar la demanda de potencia en los distintos países, nace la necesidad de construir líneas de alta tensión para transmitir la energía. La mantención de este tipo de construcciones es algo esencial para disminuir los costos y tener una correcta evaluación del estado de la línea.

En general, en las últimas décadas se han desarrollado diferentes técnicas para realizar la mantención acordes a la tecnología existente. La tendencia actualmente apunta a técnicas electrónicas que se complementen con la clásica “inspección visual”. Tales técnicas se fundamentan en lo que se llaman las NDT (por su sigla en inglés “Non-destructive Testing”). Se revisaron distintos trabajos para conocer lo que se hace actualmente y hacia lo que se apunta en términos de tener un método menos costoso y más eficiente para realizar la mantención de líneas de alta tensión.

Los trabajos previos escogidos comienzan desde el diseño de la línea hasta las técnicas de mantención utilizadas en la actualidad. Es necesario abordar todo este escenario para comprender los fenómenos que afectan a una línea de transmisión y de esta forma poder atacar el problema de la mantención de forma eficiente.



2.2. Trabajos Previos.

2.2.1 Diseño de Líneas de Alta Tensión

- ♣ ENDESA, “Manual de Supervisores de Líneas de Transmisión”, 1974. [1].

En este manual también se aborda el diseño de líneas de transmisión de energía. Explica cómo se debe realizar el cálculo para el diseño mecánico de líneas de transmisión en Chile. También se discuten otros tópicos como lo es la determinación de las condiciones meteorológicas para ver el efecto de la humedad o la posible caída de rayos y otras características que podrían afectar a la línea de transmisión. Se proponen ejemplos de análisis mecánico para determinar la flecha para distintas condiciones y de esa forma verificar si la altura de la catenaria cumple con lo que exige norma. El documento muestra el cálculo de las tensiones mecánicas y considera los efectos del viento y manguitos de hielo dependiendo de la zona en que se encuentre ubicada la línea. En resumen, es un complemento para el tema del diseño y estudio de líneas de alta tensión.

- ♣ L.M Checa. “Líneas de Transporte de Energía”, 3ra Edición, 2004, [2].

Se presenta una metodología para el diseño de una línea de transmisión en alta tensión. Se comienza desde la teoría y luego se desarrollan los modelos matemáticos de las leyes físicas que rigen esta materia. Se discute el diseño mecánico de la línea, identificando los materiales y las consideraciones que se deben tener en la construcción de las mismas, tales como factores ambientales, normas exigidas, y en general las ecuaciones para determinar la flecha, las tensiones, y otras variables relevantes. En general da una mirada teórica a los factores que podrían causar problemas en este tipo de construcciones.

- ♣ J.P. Romero. “Guía Práctica para el Diseño y Proyecto de Líneas de Transmisión de Alta Tensión en Chile”, 2010, [3].

Esta es una memoria de título realizada en la Universidad de Chile en la cual se comenta y se realiza una guía detallada para diseñar y proyectar Líneas de Transmisión en alta tensión. Explica los efectos mecánicos y térmicos que sufren las líneas de alta tensión y también comenta la tendencia que hay en Chile a construir y proyectar más líneas de transmisión debido al aumento de la demanda energética. Además se realiza una revisión de los nuevos conductores que están entrando al mercado cuyas características son superiores a las de los que se usan actualmente, pues entre sus beneficios destacan baja flecha y operación a altas temperaturas. También explica algunos efectos a considerar los cuales podrían ser relevantes a la hora de realizar un estudio de mantención en una línea eléctrica.

2.2.2 Inspección y Mantención en Líneas de Alta Tensión

- ♣ B. Avidar. “Electronic Airborne Inspection Method for Overhead Transmission Power-Lines”, IEEE, 1993, [4].

En esta publicación se detallan los distintos métodos de inspección y mantención realizados en líneas de alta tensión. Se explican las características de cada uno de ellos y las ventajas y desventajas que poseen. Entre las desventajas que comparten los métodos se encuentran la complejidad, la necesidad de personal especializado con experiencia, el tiempo requerido para la inspección, y el costo que esta actividad conlleva. También menciona las tendencias que apuntan a técnicas electromagnéticas para realizar la mantención, lo cual deja abierto a seguir investigando en este tema.

- ♣ D. Faucher, J. Lessard, P. Rondot, J. Côté. “Ground Operated Teleoperation System for Live Power Line Maintenance”, IEEE, 1996, [5].

En esta publicación se detalla el trabajo realizado para el desarrollo de un sistema operado por tierra para la realización de la mantención “On-Line” de líneas de alta tensión. La propuesta realizada en esta publicación es un vehículo que tiene un sistema que facilitaría la inspección por tierra. En síntesis, el vehículo sería comandado por 3 personas y lo que se realizaría sería una inspección visual. Consta de un sistema de acercamiento hacia la línea, que es una plataforma móvil adosada a un brazo mecánico con distintos grados de libertad, lo cual tendría como consecuencia la disminución en cuanto a la presión en la persona que esté realizando la inspección y la dificultad de la labor. Fue probado con distintos trabajadores y se deja abierta la investigación a seguir desarrollando el sistema.

- ♣ L. Hill, “Inspection & Assessment of Overhead Line Conductors”, A State-of-the-Science Report, EPRI, November 2000, [6].

Esta publicación realizada por el EPRI muestra las nuevas tendencias para la inspección de líneas aéreas. En general expone sobre las técnicas no destructivas, en particular las técnicas electromagnéticas y los equipos utilizados para realizar éste tipo de inspecciones. Aborda el tema de forma teórica de métodos tales como el de inspección electromagnética y el de las corrientes parásitas. También muestra los nuevos desarrollos en los equipamientos que utilizan estos principios de operación, los cuales se buscan mejorar en términos de eficiencia y costos.

- ♣ IAEA. “Training Guidelines in Non-destructive Testing Techniques: Leak Testing at Level 2”, Training Course Series, 2012, [7].

Este documento tiene por objetivo mostrar y explicar los métodos descubiertos para realizar pruebas e inspección en distintos materiales. En general da una mirada a la tendencia de las pruebas no destructivas mostrando diferentes enfoques y técnicas complementarias, las cuales, dependiendo del caso podrían servir para aplicarse en distintas áreas. Puesto que los materiales a inspeccionar tienen distintas propiedades y características, el libro muestra las ventajas y desventajas de las pruebas y además cuándo es posible aplicarlas y bajo qué condiciones. También explica las técnicas electromagnéticas dado que en las últimas investigaciones respecto al tema de mantención de líneas de alta tensión han sido las con mejores resultados.

2.2.3 Técnicas NDT aplicadas a Líneas AT

♣ M. Komoda, T. Kawashima, M. Minemura, A. Mineyama, M. Aihara, Y. Ebinuma, T. Kanno, M. Kiuchi, “Electromagnetic Induction Method for Detecting and Locating Flaws on Overhead Transmission Lines”, IEEE, 1990, [8].

Se realizan pruebas utilizando un método el cual llaman “método de la inducción electromagnética” el cual consiste en 2 bobinas que se van desplazando a través de la línea, siendo excitadas con corriente alterna para producir campos magnéticos variables. A medida que el equipo avanza a través del conductor se mide la impedancia de las bobinas y al encontrar una falla habrá una diferencia entre la fuerza electromotriz en cada bobina lo cual se traducirá en un cambio en la impedancia lo que permitirá detectar la anomalía y su ubicación. Según lo estudiado en la publicación, el método es de los más eficientes considerados entre las pruebas no destructivas aplicadas a las líneas de alta tensión.

♣ S. L. Branham, M. S. Wilson, S. Hurlebaus, B. M. Beadle, L. Gaul “Nondestructive Testing of Overhead Transmission Lines”, NDT, 2006, [9].

Esta publicación trata acerca de la implementación de pruebas no destructivas, en particular ondas de ultrasonido en líneas de transmisión. Se muestra el modelo matemático, y los equipamientos necesarios para realizar dicha prueba. Se explica un método de detección de fallas en el que se aplica una onda de ultrasonido esperando la reflexión de una fracción de la onda (o en su totalidad en caso de ser una falla severa), y dependiendo de la magnitud de la onda reflejada se verificará si hay o no falla en el conductor. Mediante equipos electrónicos se realiza la medición del tiempo en que demora la onda en viajar y volver. Sin embargo, la implementación de este método está en etapa de pruebas y no ha sido probado en una línea real por las limitantes técnicas de los equipos necesarios.

♣ P. Debenest, M. Guarnieri, K. Takita, E.F. Fukushima, S. Hirose, K. Tamura, A. Kimura, H. Kubokawa, N. Iwama, F. Shiga “Expliner – Robot for Inspection of Transmission Lines”, IEEE, 2008, [10]

En esta publicación se muestra el desarrollo de un robot operado a distancia que permite realizar el trabajo de inspeccionar una línea de transmisión de energía eléctrica mediante la inspección visual a través de cámaras de vídeo. El objetivo de este robot es mejorar y facilitar la realización de esta labor, pues normalmente es bastante tediosa y pone en peligro al personal debido a que deben trabajar cerca de las líneas de alta tensión donde hay diversos riesgos. La ventaja del robot diseñado es que posee un mecanismo con diferentes grados de libertad que le permite rodear obstáculos que

podrían presentarse mientras recorre el conductor. Dichos obstáculos eran los limitantes al desarrollo de esta tecnología. También se menciona que se probó el robot en un entorno real de operación con resultados satisfactorios.

♣ P. L. Moreira, E. M. Lourenco, C. R. Lourenco, M. Z. Sebrao, I. Sant'Anna, J.F. Wavrik. "Internal Corrosion in Conductor Cables of Power Transmission Lines: Characterization of the Atmosphere and Techniques for Faults Detection", IIS, 2009, [11].

Esta publicación tiene como fin caracterizar la atmósfera en diferentes entornos para determinar la polución y cómo influirá ésta en la corrosión del material del conductor. Además, se realizaron pruebas utilizando las técnicas no destructivas, en particular se mencionó el método de las corrientes parásitas y la inspección electromagnética. El primero no se realizó pero se menciona en qué consiste el método. Para el caso de la inspección electromagnética se tomaron distintos conductores y se realizaron diferentes tipos de fallas y se probó el método obteniendo resultados satisfactorios. Ambos métodos se basan en las leyes clásicas del electromagnetismo y se han estado desarrollando por diferentes empresas.

♣ A. Pinto, M. Z. Sebrao, C. R. Lourenco, I. Sant'Anna, "Remote Detection of Internal Corrosion in Conductor Cables of Power Transmission Lines", IEEE, 2010, [12]

Se muestra el diseño de un equipo cuyo propósito es realizar una inspección en una línea de transmisión de alta tensión. Este equipamiento desarrollado cuenta con cámaras que permiten realizar inspección visual, y además un equipo que permite efectuar la inspección electromagnética para detectar fallas internas en el núcleo del conductor (considerando un conductor ACSR). El equipamiento es un robot que se transporta en la línea y es comandado a distancia, lo cual permite detectar fallas externas y la posible corrosión del conductor. Se efectuó la prueba para distintas fallas simuladas (es decir se tomó un conductor y se le hicieron distintos cortes para detectar las fallas) y además se realizó la prueba en una línea real.

2.2.4 Tecnología Infrarroja Aplicada a Líneas de Alta Tensión

♣ Williamson Corporation, Infrared Basics, [http://www.deltat.com/pdf/Infrared %20Energy, %20Emissivity,%20Reflection%20%26%20Transmission.pdf](http://www.deltat.com/pdf/Infrared%20Energy,%20Emissivity,%20Reflection%20%26%20Transmission.pdf), [13].

Se explican los conceptos básicos del infrarrojo. Se explica el principio de operación de esta tecnología y se dan las definiciones importantes en el tema, tales como la emisividad, absorptividad, coeficiente de transmisión, irradiación de calor, etc. También se explica en términos generales las

diferencias que tienen los distintos materiales en términos de emisiones de calor en forma de onda electromagnética.

♣ J. Frate, D. Gagnon, “Evaluation of Overhead Line and Joint Performance with High-Definition Thermography”, IEEE, 2000, [14].

Se realiza una comparación entre 2 métodos utilizados para evaluar el estado de una línea de alta tensión, los cuales son termografía, y medición de resistencia en uniones mediante un instrumento llamado Ohmstik. Se describen las ventajas y desventajas de los métodos, además de las dificultades que se presentan al momento de llevarse a la práctica. También se contrastan resultados obtenidos mediante simulaciones con resultados medidos en laboratorio.

♣ J. Snell, J. Renowden, “Improving Results of Thermographic inspections of Electrical Transmission and Distribution Lines”, IEEE, 2000, [15].

Se discute la importancia de tener mejores inspecciones, es decir, la obtención de datos confiables que permitirán decidir si es necesario hacer una mantención. Se discuten los factores que llevan a errores de interpretación de resultados y la importancia de tener en consideración los mismos, como por ejemplo: la emisividad, la velocidad del viento, las condiciones climáticas, y la experiencia de la persona que realizará la medición. Se muestran simulaciones y algunos consejos para mejorar la inspección de líneas utilizando tecnología infrarroja.

2.2.5 Discusión

Entre los avances, debido a las limitantes de la inspección visual, se han estado investigando métodos complementarios basados en las leyes clásicas que rigen el electromagnetismo y apoyados de las nuevas tendencias tecnológicas. En las publicaciones investigadas se encontraron diferentes métodos para realizar la mantención. Entre ellos se encuentran las pruebas no destructivas, en las que se ha experimentado lo que es análisis por ondas de ultrasonido, prueba por corrientes parásitas e inspección electromagnética. Estos métodos han mostrado buenos resultados, pero en la práctica son difíciles de implementar pues necesitan contacto con la Línea. La evolución en cuanto a la tecnología en infrarrojo permite un enfoque simple en términos de implementación, pero deben tenerse las limitaciones y consideraciones correspondientes para realizar una medición confiable. Es por ello que en la presente memoria se abordará el tema de la aplicación de esta tecnología en Líneas AT.

Capítulo 3. Estudio de Técnicas No Destructivas Para Inspección de Líneas AT

3.1. Introducción

En este capítulo se explicarán en forma general las técnicas no destructivas existentes y se describirán sus ventajas y desventajas. También permitirá justificar el porqué de aplicar un método para el caso de la inspección de líneas de alta tensión.

Las técnicas de inspección deben ser acordes con las normas y los procedimientos de prueba deben indicar cuando el criterio de reemplazo descrito en las normas se aplica o no al cable considerado. Las pruebas no destructivas (NDT de su sigla en inglés Non-Destructive Testing) son un enfoque adecuado para satisfacer dichas condiciones.

Estas pruebas pertenecen a una rama de la ciencia de los materiales relacionada a aspectos de uniformidad, calidad y utilidad de los materiales y estructuras. Esencialmente se refieren a todos los métodos que permiten probar e inspeccionar los materiales sin dañarlos [7].

3.2. Pruebas No Destructivas

3.2.1 Inspección Visual

La inspección visual es uno de los métodos más comunes dentro de las pruebas no destructivas. La inspección visual requiere iluminación adecuada de la superficie inspeccionada y una buena visión del usuario que realiza la prueba. Para que una inspección visual sea más efectiva se requiere entrenamiento (por ejemplo conocimiento del producto y proceso, condiciones de servicio anticipadas, buen criterio, guardar registros de las inspecciones). Es también un hecho que todos los defectos encontrados mediante otras pruebas no destructivas deben ser complementados con la inspección visual. Normalmente el equipo necesario para realizar esta prueba es simple. En la figura 3.1 [6] se muestra un ejemplo de equipamiento para realizar esta inspección.





Fig. 3.1 Diferentes apoyos para la realización de la inspección visual.

(A) Espejo (B) Lupa de mano (Amplificación normalmente 2-3X) (C) Amplificador iluminado; campo de visión más restringido que D (amplificación 5-10X). (D) Lente de Inspección (amplificación 5-10X) (E) Instrumento con amplificación e iluminación (2-3X).

Entre las aplicaciones de la inspección visual se encuentran:

- Chequeo de la condición de la superficie del componente.
- Chequeo de la forma del componente.
- Chequeo para evidencia de fuga.
- Chequeo para encontrar deformaciones laterales internas.
- Chequeo de la alineación de las superficies.

Algunas de las ventajas de la inspección visual son las siguientes:

- La prueba es simple.
- La velocidad de la prueba es alta.
- El costo es bajo.
- El entrenamiento necesario es menor.
- Se puede hacer On-Line.
- Disponibilidad de registros permanentes.

Algunas Limitaciones:

- Puede detectar solamente defectos en la superficie.
- Existe dificultad en dimensionar la profundidad de los defectos.

3.2.2 Penetración Líquida

Este método puede ser empleado para la detección de quiebres en la superficie de cualquier producto industrial hecho de un material no poroso. Es ampliamente utilizado para pruebas en materiales no magnéticos. En esta prueba, un líquido penetrante es aplicado a la superficie del producto por un cierto tiempo predeterminado después del cual el exceso del penetrante es removido de la superficie. La superficie luego es secada y se le aplica un revelador. El penetrante que se queda en el defecto es absorbido por el revelador para indicar tanto la presencia como la ubicación, tamaño y naturaleza del defecto. El proceso se muestra en la figura 3.2 [6].

Los penetrantes utilizados son tinturas visibles o fluorescentes. La inspección para la presencia de indicadores visibles es hecha bajo luz blanca mientras que la inspección para la presencia de indicadores fluorescentes es hecha bajo luz ultravioleta (o negra) bajo condiciones de oscuridad.

Los procesos de líquido penetrante están además sub-divididos de acuerdo al método de limpieza del componente. Los penetrantes pueden ser: (i) lavables en agua, (ii) post-emulsionables, es decir un emulsionador es añadido al exceso del penetrante en la superficie del componente para hacerlo lavable en agua, y (iii) removible mediante solvente, es decir, el exceso del penetrante necesita ser disuelto en un solvente para removerse de la superficie del componente.

En orden decreciente de la sensibilidad y costo, los procesos con líquido penetrante pueden ser listados como sigue:

- Penetrante fluorescente post-emulsionable.
- Penetrante fluorescente removible con solvente.
- Penetrante fluorescente lavable en agua.
- Penetrante visible post-emulsionable
- Penetrante visible removible en solvente.
- Penetrante visible lavable en agua.

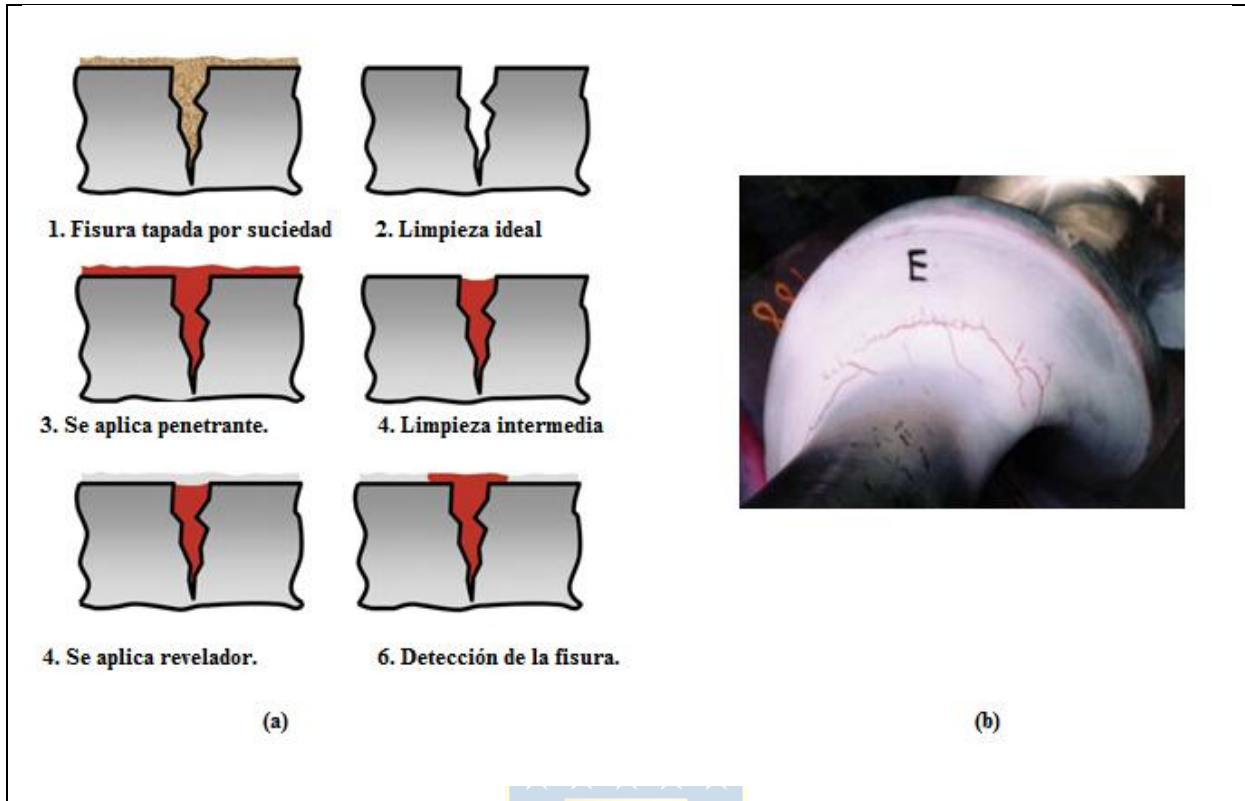


Fig. 3.2 Prueba con líquido penetrante.

(a) Etapas de la inspección (b) Ejemplo de detección de anomalías

Las ventajas de ésta prueba son:

- Costo relativamente bajo.
- Portabilidad alta.
- Alta sensibilidad a fisuras pequeñas y delgadas.
- Método simple de aplicar.
- Puede ser utilizado en una gran variedad de materiales.
- Todos los defectos son detectados en una operación, independiente de la orientación.

Las limitaciones de las pruebas con líquido penetrante son:

- La superficie a probar debe estar libre de todos los contaminantes (suciedad, aceite, pintura, oxidación, etc.).
- Detecta únicamente defectos en la superficie.
- No puede ser utilizada en superficies porosas y es difícil de utilizar en superficies muy duras.
- No hay registros permanentes.

En conclusión, no es una prueba que sea útil para inspeccionar líneas AT, pues presentaría bastantes dificultades prácticas.

3.2.3 Partículas Magnéticas

La prueba de partículas magnéticas es utilizada para inspeccionar materiales que pueden ser fácilmente magnetizados. Este método es capaz de detectar defectos en la superficie y un poco más debajo de ésta. En esta prueba el objeto a inspeccionar es magnetizado utilizando un imán permanente, un imán electromagnético, o pasando corriente a través o alrededor del objeto. Cuando haya un defecto que interrumpa el flujo del campo magnético, se generarán polos magnéticos de polaridad opuesta. En el momento en que las partículas magnéticas son esparcidas en la superficie de dicho objeto, estas partículas son atraídas por estos polos magnéticos, lo que crea una indicación visual del tamaño y forma aproximados del defecto. En la figura 3.3 [6] se muestra el principio básico de operación de éste método.

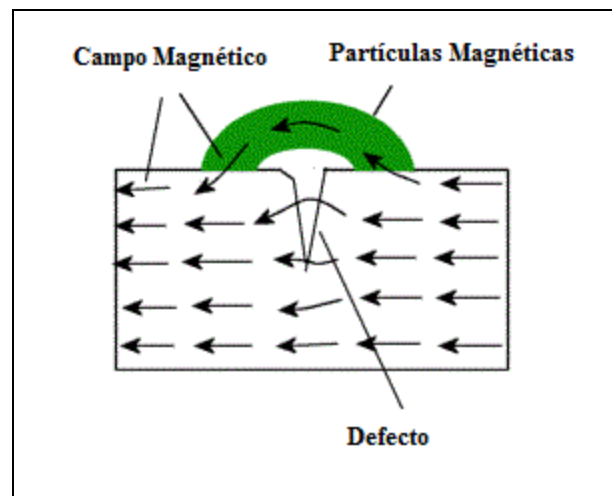


Fig. 3.3 Principio básico de la prueba de partículas magnéticas.

Dependiendo de la aplicación, existen diferentes técnicas de magnetización utilizadas para ésta prueba. Dichas técnicas pueden ser agrupadas en 2 categorías:

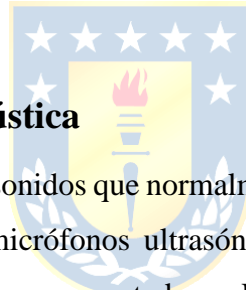
- Corriente Continua: Éstas son técnicas en las cuales la corriente fluye a través del objeto de prueba y el campo magnético producido por este flujo de corriente es utilizado para la detección de defectos.
- Flujo Magnético: En estas técnicas el flujo magnético es inducido en el objeto con el uso de un imán permanente o pasando corriente a través de una bobina o un conductor.

Ventajas de las partículas magnéticas:

- No necesita una pre-limpieza rigurosa.
- Es el mejor método para la detección de fisuras superficiales en un material ferromagnético.
- Funciona hasta en recubrimientos.
- Permite inspección de geometrías complejas.
- Es un método portable.

Limitaciones del método de las partículas magnéticas:

- Aplicable únicamente a materiales ferromagnéticos.
- La orientación y la fuerza del campo magnético es crítica. Hay una necesidad de magnetizar dos veces: longitudinal y circunferencialmente.
- A veces se requiere grandes corrientes y existe la posibilidad de “quemar” ciertas partes del objeto de prueba.
- Después de la prueba el objeto debe ser desmagnetizado, lo que puede ser difícil en algunos casos.



3.2.4 Monitoreo de Emisión Acústica

Este método involucra escuchar sonidos que normalmente son inaudibles al oído humano. Esta técnica involucra acercar uno o más micrófonos ultrasónicos al objeto examinado y analizar los sonidos utilizando instrumentos basados en computadores. Los sonidos pueden aparecer por fricción, crecimiento de alguna grieta, turbulencia, y cambios en el material tales como la corrosión. Este método puede ser aplicado a tuberías de prueba, tanques de almacenamiento, estructuras de fibra de vidrio, máquinas rotatorias, monitoreo de soldaduras, y cambios biológicos y químicos [6].

En lo que es líneas de alta tensión esta tecnología se utiliza principalmente para la detección de descargas parciales. Es aplicable en distintos elementos de una instalación eléctrica, como por ejemplo: aisladores, transformadores, seccionadores, etc. El método se realiza utilizando un micrófono direccional ultrasónico, cuya función es detectar los sonidos de alta frecuencia que producen las descargas parciales. Luego de captar el sonido con el micrófono, se convierte al rango audible humano (20 Hz a 20 kHz), con el propósito de que el operador pueda oírlo e identificar el origen.

La principal ventaja de este método es que no requiere contacto directo con los equipos. Sin embargo, depende en gran medida de la experiencia del operador para realizar un diagnóstico correcto.

3.2.5 Método de las Corrientes Parásitas

Este método es ampliamente utilizado para detectar defectos en superficie, para medir paredes delgadas de una superficie única, para medir recubrimientos delgados y en algunas aplicaciones para medir endurecimientos internos de carcassas. Este método es aplicable únicamente a materiales conductores como por ejemplo: cobre, aluminio, o conductores ACSR. En esta prueba se inducen corrientes parásitas en el objeto a inspeccionar mediante un acercamiento a una bobina que esté conduciendo corriente alterna. El campo magnético variable de la bobina es modificado por el campo magnético generado por las corrientes parásitas. La modificación, que depende de la condición en la que se encuentre el objeto, es mostrada como una lectura de un medidor o un rayo cátodo de un osciloscopio. La figura 3.4 [6] muestra un esquema de cómo se generan y se distorsionan las corrientes parásitas.

Hay 3 tipos de sondas usadas en el método de las corrientes parásitas. Sondas internas son normalmente usadas para probar tubos intercambiadores de calor en funcionamiento. Sondas circundantes que son comúnmente utilizadas para probar varas y tubos durante la fabricación. El uso de sondas superficiales incluye la localización de grietas en materiales y la medición del grosor del recubrimiento de las paredes, y medición del grosor de las carcassas.

El método de las corrientes parásitas puede ser usado para:

- Detección de defectos en tuberías.
- Ordenar Materiales
- Medición del grosor de las paredes desde un acceso a la superficie del material.
- Mediciones del grosor de recubrimientos y profundidad de la carcassa.
- Testeo de defectos calientes sin contacto.

Las ventajas de éste método son:

- No requiere acoplador.
- Entrega una respuesta instantánea.
- Es extremadamente sensible a grietas en la superficie.
- Permite el uso de escaneos a alta velocidad (tan altas como 10 m/s)
- Preciso para escalar defectos y medición de grosores en recubrimientos.

Las limitaciones del método son:

- Extremadamente sensible a variaciones en la superficie y por lo tanto requiere una buena superficie.

- No fiable sobre acero al carbono para la detección de defectos sub-superficiales.
- Su penetración de profundidad máxima está limitada a 8 mm aproximadamente.

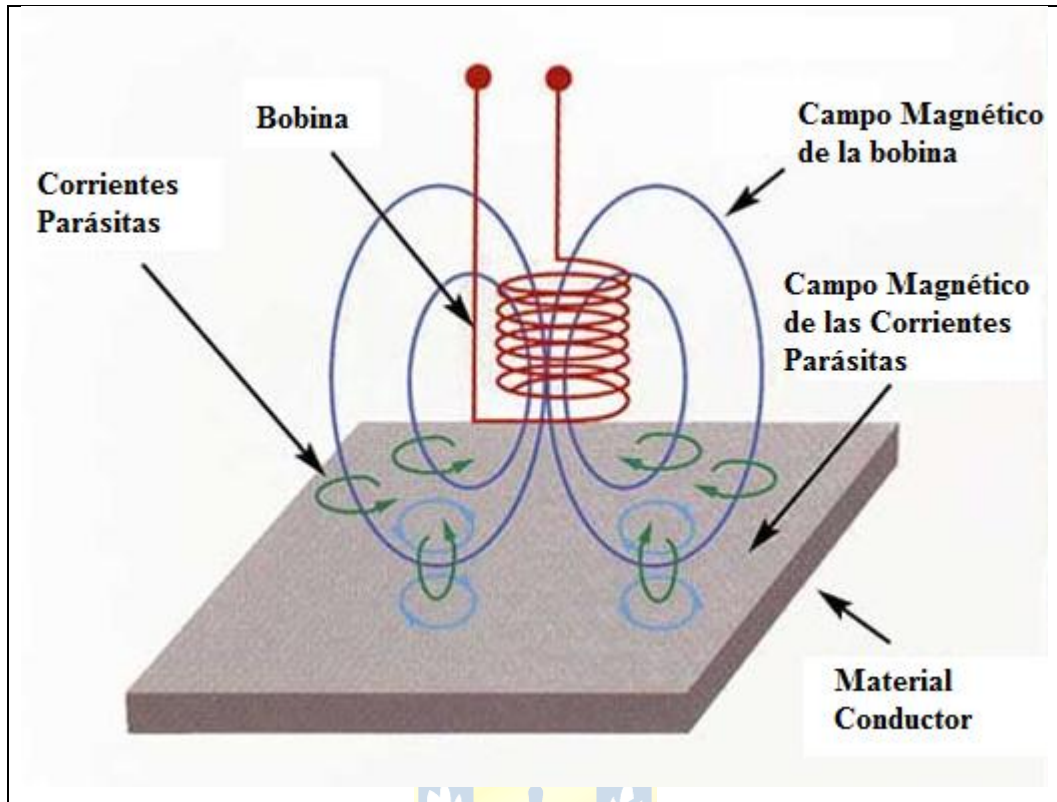


Fig. 3.4. Generación de corrientes parásitas en el objeto a inspeccionar y distorsión de la corriente parásita debido a un defecto en el objeto.

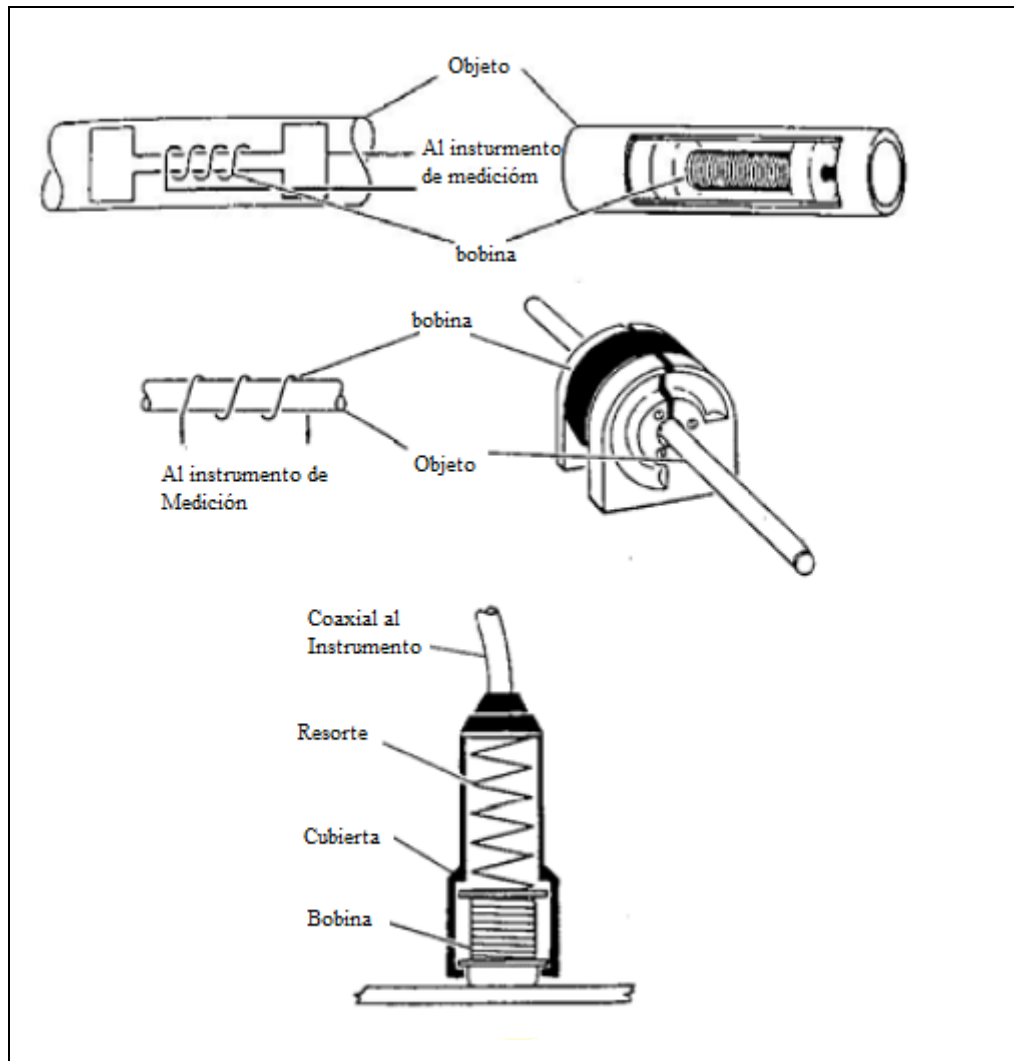


Fig. 3.5 Tipos de sondas para método de las corrientes parásitas.

3.2.6 Inspección por Ultrasonido

La inspección por ultrasonido es un método no destructivo por el cual ondas de sonido de alta frecuencia son introducidas dentro de un objeto para ser inspeccionado. Mayormente la inspección de ultrasonido es hecha a frecuencias entre 0.5 y 20 MHz. Las ondas de sonido viajan a través del material con algunas pérdidas de energía (atenuación) debido a las características del material. La intensidad de las ondas de sonido es medida después de la reflexión (pulso de eco) en las interfaces (o fallas) o es medida en la superficie opuesta del objeto (transmisión del pulso). El haz reflejado es detectado y analizado para definir la presencia y ubicación de algún defecto o falla. El grado de reflexión depende en gran medida del estado físico de la materia en el lado opuesto de la interface. Reflexiones parciales ocurren en interfaces metal-líquido o metal-sólido. La prueba de ultrasonido tiene un poder penetrante mayor que una radiografía y puede detectar fallas profundas en el objeto inspeccionado. Es bastante

sensible a fallas pequeñas y permite una determinación precisa de la ubicación y tamaño de las fallas. El principio de la prueba de ultra sonido es ilustrado en la figura 3.6 [6].

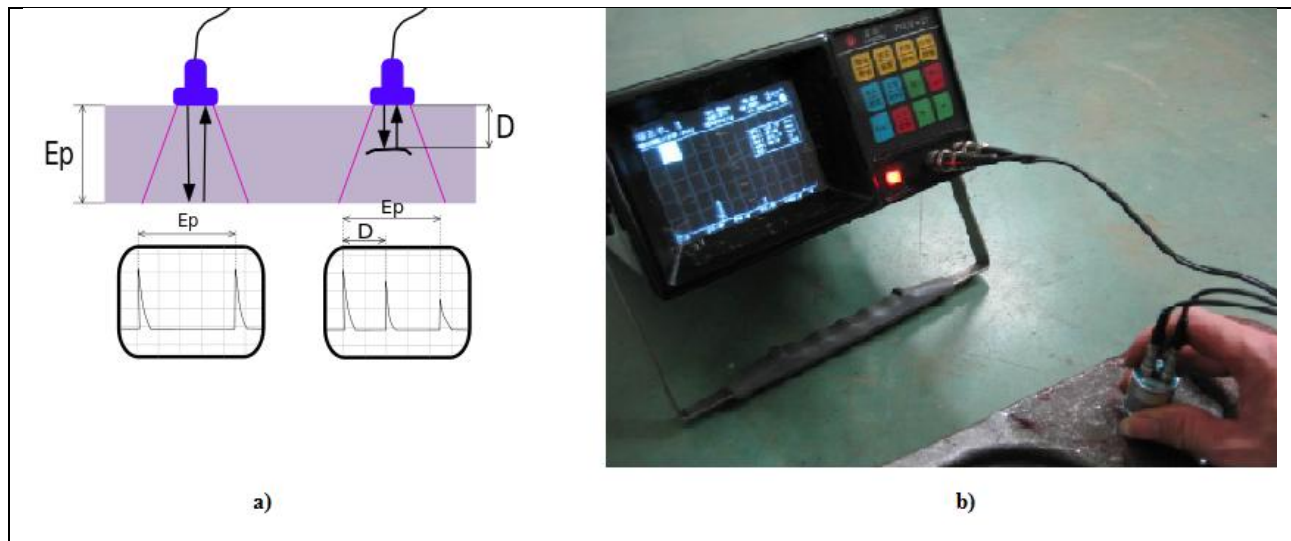


Fig. 3.6 Componentes básicos en la prueba de ultrasonido.

a) Principio de Operación. **b)** Equipo para realizar la prueba.

El método de ultrasonido es:

- Utilizado para detección de fallas en materiales y medición de grosor.
- Utilizado para determinar las propiedades mecánicas y estructurales de los materiales.

Algunas ventajas de la prueba de ultrasonido son:

- Tiene una alta sensibilidad que permite la detección de defectos mínimos.
- Tiene alto poder de penetración que permite la examinación de elementos extremadamente gruesos.
- Tiene una alta precisión en la medida de la localización de la falla y su tamaño.
- Tiene una respuesta rápida que permite una inspección rápida y automática.
- Necesita acceso a sólo una superficie del espécimen.

Algunas limitaciones de este método son:

- Si el objeto tiene una geometría desfavorable se provocan problemas durante la inspección.
- La inspección de materiales que tengan una estructura áspera es dificultosa.
- Requiere el uso de un acoplador.
- Una orientación defectuosa afecta a la detección de las fallas.

- Se requieren estándares de referencia y calibración.
- Superficies duras pueden ser un problema y hará necesaria una preparación de la superficie para realizar la inspección.

3.2.7 Inspección Radiográfica

La inspección radiográfica es utilizada para la detección de fallas internas en una gran variedad de diferentes materiales y configuraciones. Una película radiográfica adecuada es ubicada detrás del objeto a probar y expuesta pasando rayos X o rayos gamma (radioisótopos Co-60 y Ir-192) a través de él. La intensidad de los rayos mientras atraviesan el objeto es modificada de acuerdo a su estructura interna y en consecuencia es expuesto a la película, después de procesar, se revela una fotografía oscura conocida como radiografía. Ésta es entonces interpretada para obtener datos con respecto a los defectos presentes en el objeto. Este método es utilizado en una amplia variedad de objetos tales como forjaduras, fundiciones, soldaduras.

Entre las ventajas de la prueba radiográfica se encuentran:

- Es útil en una amplia variedad de materiales.
- Puede ser utilizada para chequear malformaciones internas, malos ensamblajes o desajustes internos.
- Proporciona registros permanentes.
- Existen disponibles dispositivos para chequear la calidad de la radiografía.

Algunas limitaciones del método son:

- Se requiere acceso a ambos lados del objeto.
- No puede detectar al instante defectos planares.
- El rango del grosor que se puede inspeccionar es limitado.
- La sensibilidad de la inspección disminuye con el grosor del objeto a inspeccionar.
- Se requieren habilidades considerables para interpretar la radiografía.
- La profundidad del defecto no se indica al instante.
- Los rayos x y los rayos gamma son dañinos para la salud de las personas.

En la figura 3.7 [6] se muestra esquemáticamente el método.

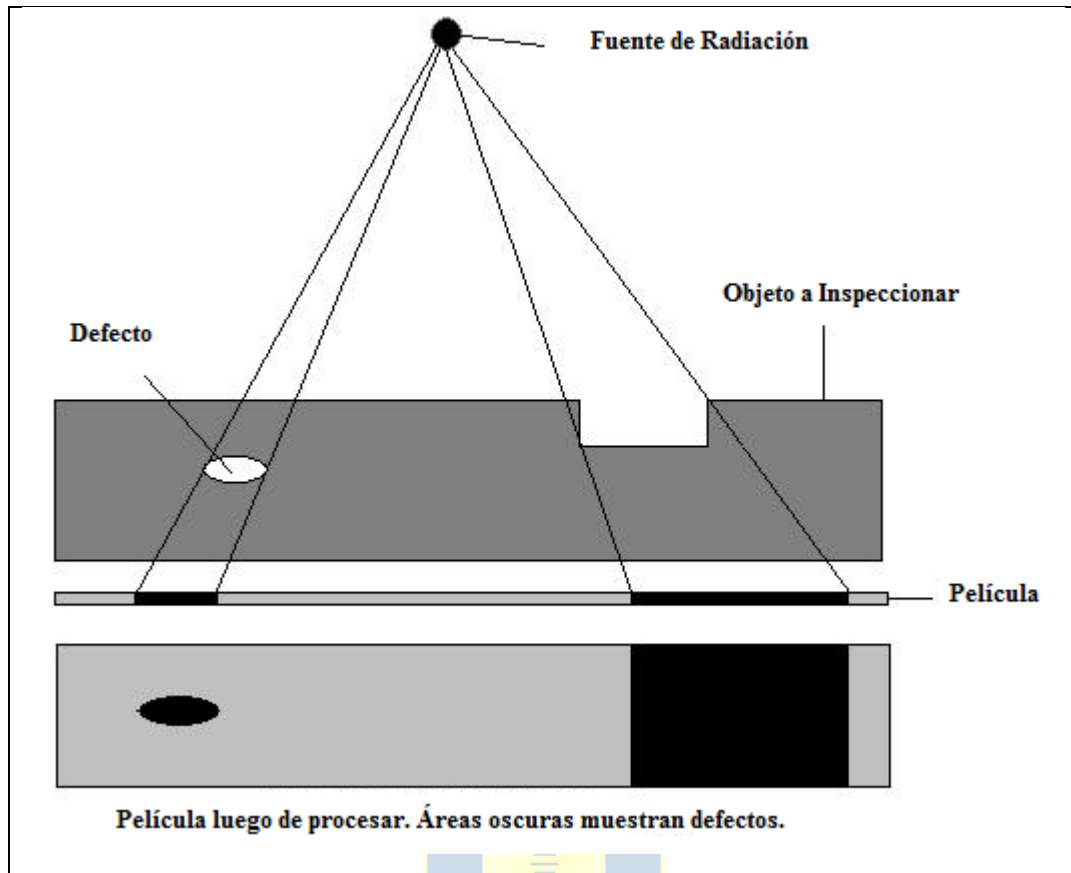


Fig. 3.7 Arreglo para realizar la inspección.

3.3. Aplicación de Técnicas No Destructivas a Líneas AT

3.3.1 Ondas de Ultrasonido

La idea básica de éste método se ilustra en la figura 3.8 [9]. Como se muestra, se utiliza un transductor para generar y detectar ráfagas de ultrasonido en la línea. Un transductor es un equipo capaz de transformar o convertir un determinado tipo de energía de entrada, en otra diferente de salida. Cuando estas ráfagas de ultrasonido interactúan con algún defecto en la línea, tal como un cable roto, una porción de la onda incidente será reflejada. La onda reflejada es entonces registrada mediante un transductor receptor. Si la amplitud de la onda reflejada está por sobre un valor umbral, entonces se puede asumir que se ha identificado alguna falla o defecto en el conductor. Un transmisor inalámbrico ubicado en el transductor podría usarse para enviar los datos a un nodo central de comunicaciones.

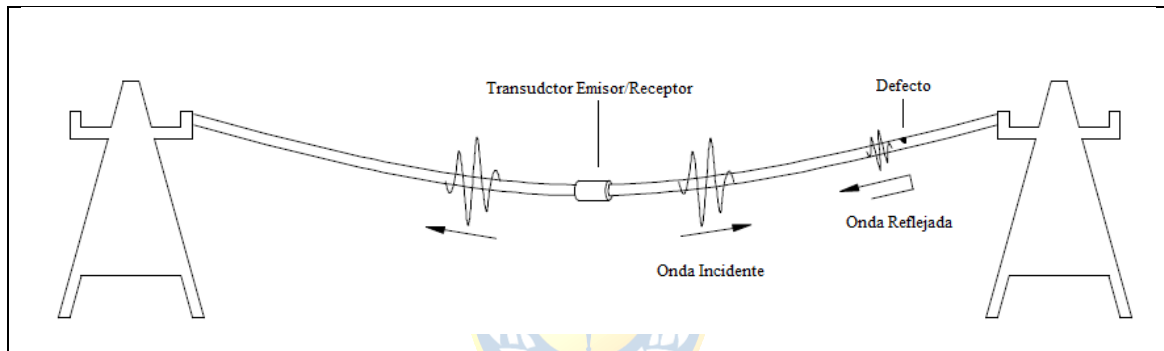


Fig. 3.8 Esquema de detección de fallas mediante ultrasonido.

Las ondas de ultrasonido son usadas para la caracterización del material en varias aplicaciones de monitoreo y evaluación no destructiva para determinar el estado de las estructuras. Las ondas de ultrasonido guiadas son particularmente efectivas para analizar componentes estructurales largos, ya que éstas se propagan a largas distancias. Las ondas guiadas aparecen en un medio que limita las perturbaciones internas para moverse entre las superficies limitantes. En esencia, las ondas estacionarias son establecidas en la dirección lateral mientras que las ondas viajeras se manifiestan en la dirección normal. Para el caso de un cable multi-conductor, no existe una forma analítica que describa la propagación de la onda. El siguiente desarrollo se enfocará entonces en el caso más simple de un solo conductor.

Para el caso de una vara cilíndrica sólida y homogénea de radio a (como se muestra en la figura 3.9), la sustitución de las condiciones de borde $\tau_{rr} = \tau_{r\theta} = \tau_{rz} = 0$ en la superficie de la vara ($r = a$) en las ecuaciones de Lamé-Navier, lleva a la ecuación de frecuencias Pochhammer para los modos longitudinales (que corresponden a las longitudes de onda de la onda que son reforzadas por una

interferencia constructiva después de varias reflexiones desde la cavidad de las superficies reflectantes) [9].

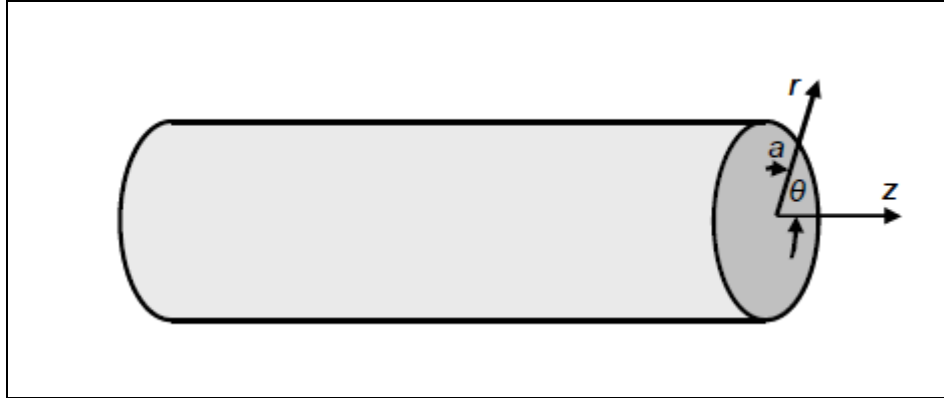


Fig. 3.9 Vara cilíndrica con sus coordenadas.

La ecuación es la siguiente:

$$\frac{2p}{a}(q^2 + k^2)J_1(pa)J_1(qa) - (q^2 - k^2)^2J_0(pa)J_0(qa) - 4k^2pqJ_1(pa)J_0(qa) = 0 \quad (3.1)$$

Donde J_0 y J_1 son funciones de Bessel de orden 0 y 1 respectivamente y donde p y q están dados por:

$$p^2 = \frac{\omega}{c_B^2} - k^2 \quad (3.2)$$

$$q^2 = \frac{\omega}{c_S^2} - k^2 \quad (3.3)$$

Donde ω es la frecuencia angular, k es el número de onda, c_B es la porción de la velocidad de la onda en un medio ilimitado, y c_S es la velocidad de la onda de corte. El desplazamiento axial y radial para los modos longitudinales son respectivamente:

$$u_r(r, z, t) = -[pJ_1(pr) + CjkJ_1(qr)]e^{j(kz-\omega t)} \quad (3.4)$$

$$u_z(r, z, t) = [jkJ_0(pr) + CqJ_0(qr)]e^{j(kz-\omega t)} \quad (3.5)$$

$$C = \frac{-2ikpJ_1(pa)}{q^2 - k^2J_1(qa)} \quad (3.6)$$

La ecuación que describe el movimiento de la onda longitudinal no toma en cuenta la atenuación debida al material o efectos geométricos. Introduciendo el número de onda complejo $k^* = k_1 + ik_2$, el movimiento axial a una distancia radial dada puede expresarse como:

$$u_z(z, t) = Ae^{j(k^*z - \omega t)} = Ae^{-k_2z} e^{j(k_1z - \omega t)} \quad (3.7)$$

Es claro que la contribución dada por k_1 se asocia con la propagación de la onda, y la contribución de k_2 se asocia con la atenuación espacial de la onda. Inmediatamente se obtiene lo siguiente:

$$k_2 = \frac{1}{\Delta z} \ln \left| \frac{u_z(z, t)}{u_z(z + \Delta z, t)} \right| \quad (3.8)$$

Donde Δz es la separación entre dos puntos de medición.

En la siguiente figura se muestra la disposición de los equipos utilizada en las pruebas que se han estudiado implementando éste método.

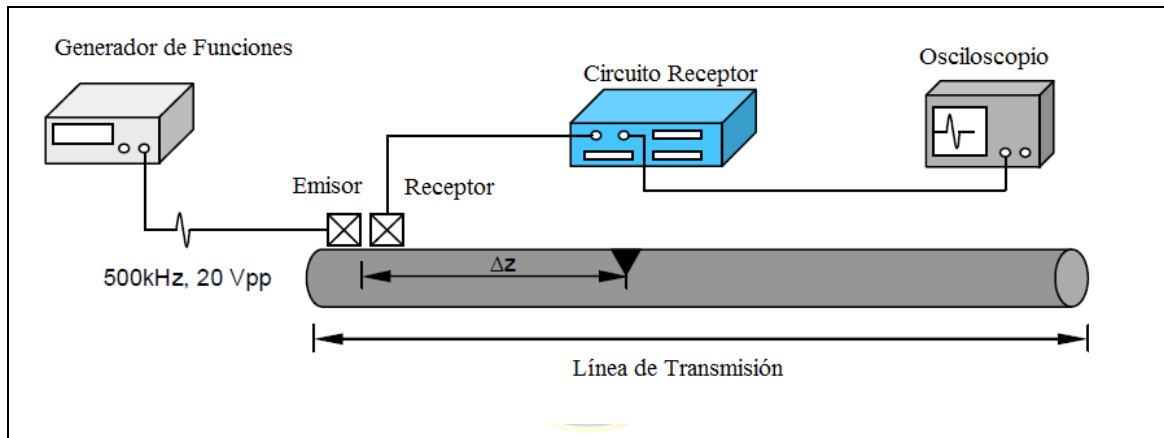


Fig. 3.10 Disposición de Equipos para la detección de fallas en la línea de transmisión

Y en las siguientes figuras se muestran señales obtenidas de un ensayo en el cual se hizo un corte de 7 [mm] en la línea de transmisión de prueba.

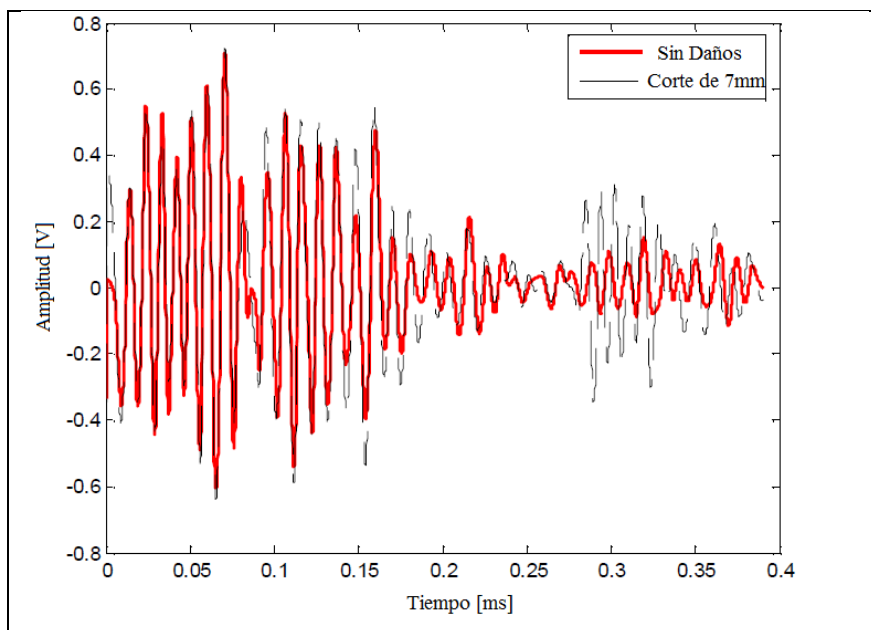


Fig. 3.11 Señal de salida del transductor para una línea de transmisión con y sin daños.

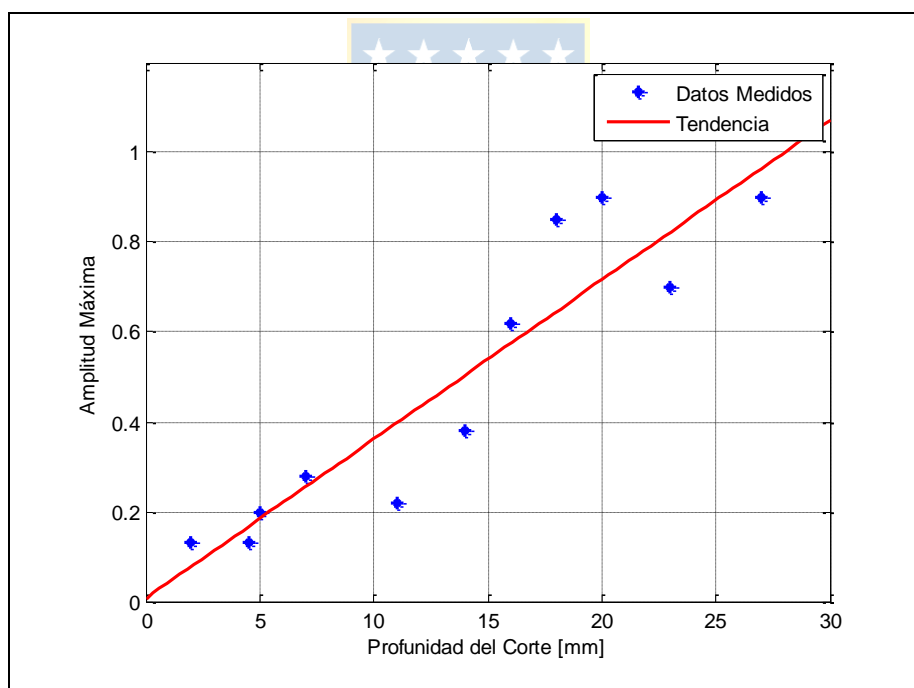


Fig. 3.12 Amplitud máxima de la onda reflejada, para distintos niveles de daño.

Este método de detección de fallas no ha sido probado en una línea de transmisión real, y se duda mucho de la eficiencia y de si se puede poner en marcha debido al hecho a que los equipos electrónicos estarán trabajando en un entorno con bastante interferencia electromagnética, a las condiciones del entorno y a que los conductores no son homogéneos. Sin embargo queda abierta la

opción de seguir estudiando si es factible o no implementar este método, pues puede entregar resultados útiles a la hora de determinar el estado de una línea de transmisión.

3.3.2 Inspección Electromagnética

Otra prueba no destructiva que se puede aplicar en cables es el método magnético. El principio de operación que utiliza este método es la ley de Faraday, por lo que está compuesto por imanes permanentes y una bobina de medición que entrega un voltaje proporcional al flujo magnético inducido en el cable bajo prueba, el cual está dado por:

$$\Phi = \int \vec{B} \cdot \vec{dA} \quad (3.9)$$

Cuando el campo magnético es normal al área y constante, el flujo magnético puede reescribirse como:

$$\Phi = B \cdot A \quad (3.10)$$

La ley de Faraday enuncia que si existe un cambio en el flujo magnético, existirá un voltaje inducido tal que la corriente que fluya se opondrá a tales variaciones, es decir:

$$v = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (3.11)$$

Por lo tanto cualquier cambio en el voltaje inducido en la bobina es una medida de un cambio en el área transversal, lo que puede ser utilizado para detectar fallas en el cable. La ecuación anterior se puede escribir como:

$$v = -NB \frac{dA}{dt} \quad (3.12)$$

En la ecuación (3.12) como N y B son constantes, cualquier cambio en el voltaje corresponde a una variación del área A.

La figura 3.13 [11] ilustra esta técnica. Un imán satura longitudinalmente un segmento, l , del cable y una bobina alrededor de éste segmento es utilizada como sensor. Cualquier variación en el área transversal del cable (ocurrída, por ejemplo, por corrosión, o daños en el cable) causará un cambio en el flujo magnético en el cable. Moviendo el cable a una velocidad u , el flujo dentro del cable, en el segmento l , cambiará el voltaje inducido en la bobina dado por la ecuación (3.12).

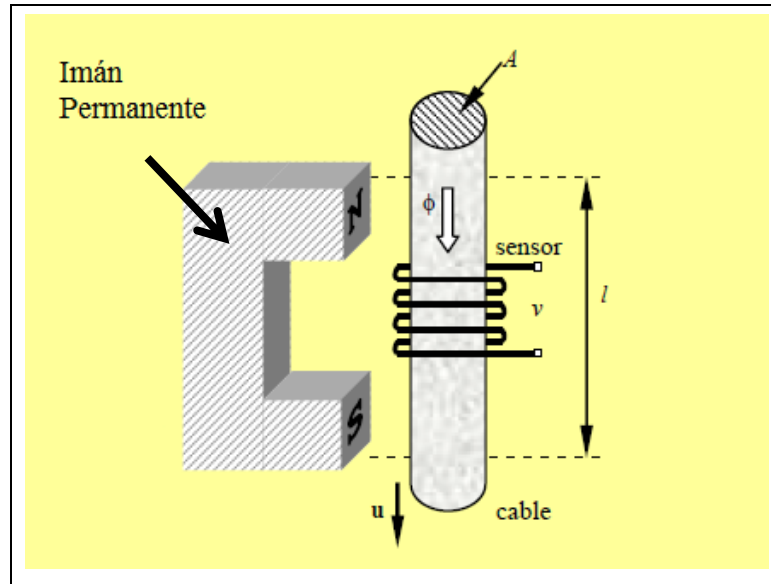


Fig. 3.13 Ilustración del método de inspección electromagnética.

En un cable sin fallas, el valor del voltaje permanecerá relativamente constante. Si el cable tiene un segmento con una falla que cambie su área transversal, en el momento en que esta falla entre en el sensor, modificará el valor del voltaje inducido como se muestra en la figura 3.14 [11].

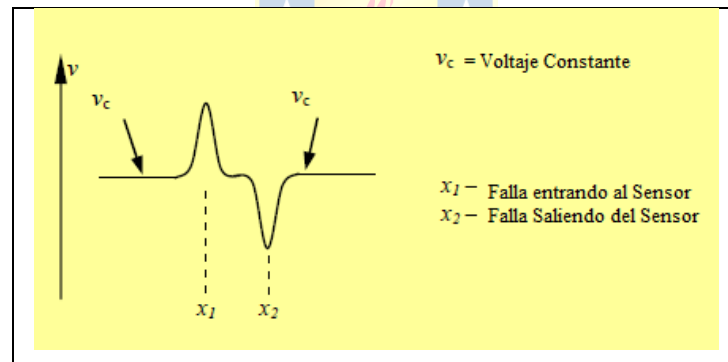


Fig. 3.14 Cambio de voltaje inducido en el sensor debido a fallas en el cable.

Existe una tendencia a ampliar este tipo de inspección de líneas pues los avances tecnológicos lo permiten. Se han realizado publicaciones en las que se muestra el diseño de equipos móviles comandados a larga distancia cuyo fin es recorrer la línea y realizar la inspección. En la siguiente figura se muestra la señal esperada al momento de que el sensor esté en presencia de una falla en el conductor.

3.3.3 Inducción de Corrientes de Eddy

El método consiste en la inducción electromagnética en un conductor mediante pares de bobinas diferenciales que se sitúan cercanas a un conductor con el objetivo de inducir corrientes

parásitas en este último (ver figura 3.15 [8]). Estas bobinas poseen la ventaja de tener una alta sensibilidad para detectar fallas. Una frecuencia de excitación es aplicada a las bobinas diferenciales mientras estas están en movimiento a lo largo del conductor (ver figura 3.16 [8]).

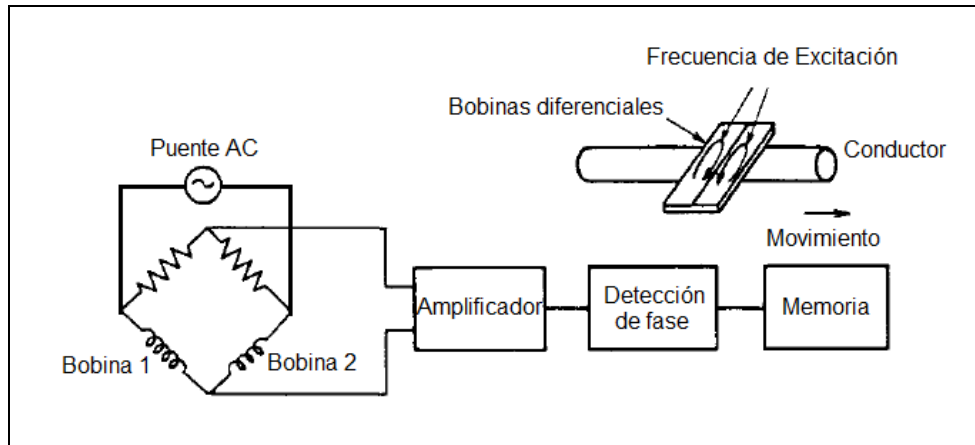


Fig. 3.15 Principio de funcionamiento de método de inducción electromagnética.

Cuando las bobinas se mueven a través de una sección normal de conductor, las Corrientes-Eddy en el conductor inducen una fuerza electromotriz igual en la bobina 1 y bobina 2 con la misma impedancia manteniendo el puente AC en equilibrio. Cuando las bobinas se mueven a través de una sección dañada, o con falla, se inducen distintas fuerzas electromotrices en las bobinas, lo que a su vez produce un cambio en la impedancia en el puente, luego un voltaje desbalanceado es detectado en el puente, como se muestra en la figura 3.16. Una vez detectada la señal, esta debe ser procesada a través de un amplificador, detector de fase, guardado y evaluación. Las corrientes de Eddy inducidas en el conductor dependen de varios parámetros, tales como frecuencia de excitación, tipo de conductor, conductividad, permeabilidad, fallas, dimensión de las bobinas y posición relativa entre la bobina y la falla, en base a estos parámetros varía la impedancia de la bobina. Todos estos parámetros son importantes para la correcta diferenciación entre conductores con fallas y conductores normales.

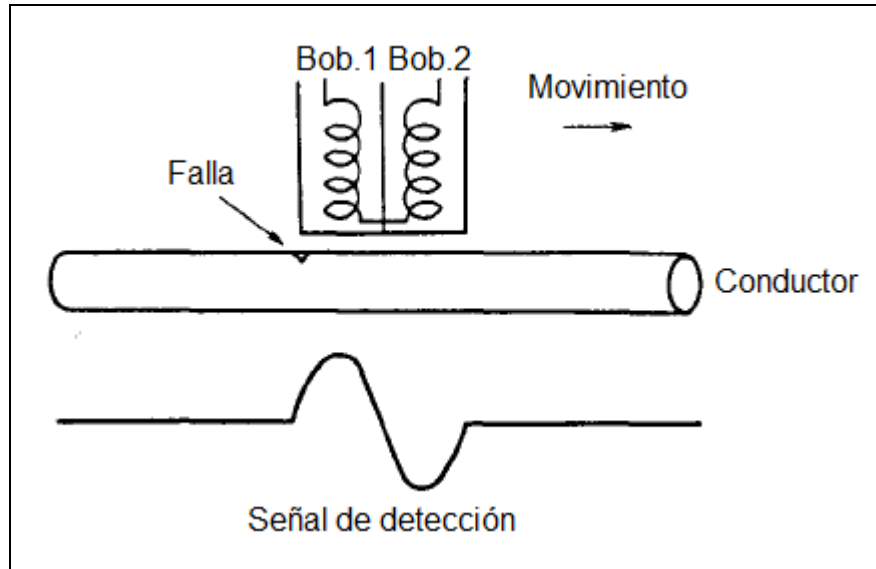


Fig. 3.16 Condición de detección de falla.

La densidad de corriente de Eddy está dada por la ecuación (3.13)

$$J = \sqrt{\omega\sigma\mu}H_0e^{-\sqrt{\frac{\omega\sigma\mu}{2}}x} \cos\left(\omega t - \sqrt{\frac{\omega\sigma\mu}{2}}x + \frac{\pi}{4}\right) \quad (3.13)$$

En la ecuación (3.13) el término $\sqrt{\omega\sigma\mu}H_0e^{-\sqrt{\frac{\omega\sigma\mu}{2}}x}$ representa la variación de la amplitud y el término $\sqrt{\frac{\omega\sigma\mu}{2}}x$ representa el desplazamiento de fase con la profundidad en el conductor. También se puede deducir que a frecuencias más altas, las corrientes de Eddy son más concentradas en la superficie, esto ya que la fase varía con la distancia de penetración x .

3.3.4 Medición de Resistencia en Uniones

Los conductores eléctricos tienen una longitud limitada particularmente para transporte de energía, y es necesario conectar una cantidad numerosa de segmentos para lograr construir una línea. Por lo tanto, la función de una unión es lograr continuidad eléctrica y mecánica del conductor. Las uniones comúnmente utilizadas en líneas aéreas son del tipo estiradas y del tipo compresión.

- La unión estirada está hecha de un tubo redondo de metal retorcido y un manguito de aleación de aluminio. Esta tecnología difícilmente se encuentra hoy en día, pero una gran cantidad de uniones estiradas se encuentran aún en servicio.
- La unión de compresión está hecha por un manguito que es comprimido en el conductor con presión hidráulica en pequeñas pasadas. Esta técnica actualmente es la usada con mayor frecuencia.

Se ha estado trabajando en un modelo que permita evaluar la vida restante de una unión a partir de valores de resistencia medidos de la misma. El modelo propuesto es función de un parámetro adimensional que representa el estado de las uniones. Lo que se determina es la razón entre la resistencia de la unión y el valor ideal que corresponde a cuando el conductor está en condiciones óptimas. Cuando la resistencia en la unión sube, significa que existe un desgaste en el conductor. En la figura 3.17 se grafican diferentes valores para la razón mencionada. Cuando la razón aumenta y sus valores superan aproximadamente 1.0 (es decir, 100% del valor óptimo de la resistencia), significa que el conductor está con daños que se deben tener en consideración para una mantención.

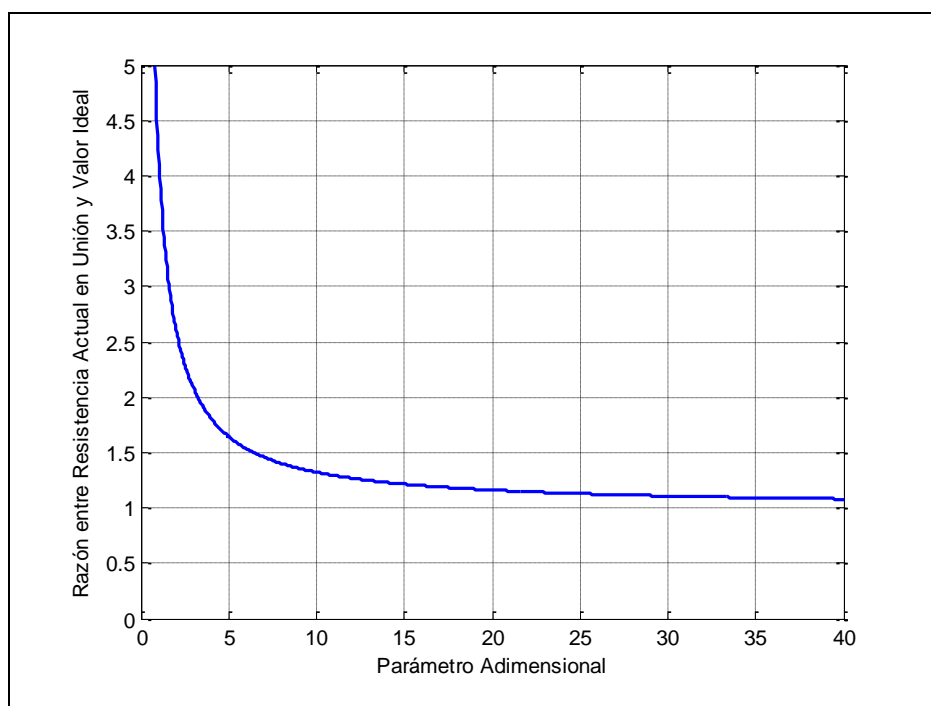


Fig. 3.17 Representación adimensional de la resistencia de la unión como función de la resistencia de contacto

La ventaja principal de este método es que es independiente de corriente que esté fluyendo por la línea. Sin embargo, tiene la desventaja de que se necesita tener contacto con la línea para realizar las mediciones, esto lo transforma en un método poco práctico. El instrumento que se utiliza para realizar las mediciones de resistencia de contacto de la unión se llama Ohmstik y se muestra en la figura 3.18.



Fig. 3.18 Ohmstik

3.3.5 Termografía e Infrarrojo

Estas técnicas no destructivas están basadas en el principio que el flujo de calor en un material se altera con la presencia de algunos tipos de anomalías. Estos cambios en el flujo de calor producen diferencias de temperatura localizadas en el material. El infrarrojo denota la radiación entre las regiones visibles y las de microondas del espectro electromagnético.

Para aplicar este método se utilizan cámaras que trabajan en el espectro infrarrojo (0.7 – 1000 μm). Las cámaras entregan una imagen procesada electrónicamente que muestra los gradientes de temperatura del objeto examinado. Las cámaras termográficas son capaces de entregar incluso la temperatura del objeto en determinados puntos. Se debe tener en consideración que la temperatura depende de distintos factores, principalmente de las propiedades del objeto a examinar pues éste puede emitir distinta cantidad de energía infrarroja dependiendo de la emisividad que tenga a cierta longitud de onda. También otros factores que afectan las emisiones son: la atenuación atmosférica, la reflexión, la absorción, la transmisión, las condiciones meteorológicas, entre otras. En consecuencia, se utilizan cámaras que operan a distintas longitudes de onda dependiendo de la aplicación [14].

En líneas de alta tensión se ha aplicado este método para detectar fallas principalmente en uniones. Sin embargo, en lo que es instalaciones eléctricas se utiliza para examinar switchgears, transformadores, etc. También es ampliamente utilizado en distintos procesos industriales [15].

La ventaja principal de este método respecto a la aplicabilidad en líneas AT, es que no requiere contacto directo con la línea. Sin embargo, la experiencia dice que los resultados dependen en gran medida de la experiencia del operador y de las condiciones en las que se realizó la medición.

La termografía es una técnica que trae la ventaja de la no necesidad de tener contacto con la línea a diferencia de la medición de la resistencia de las uniones. Es usualmente llevada a cabo con

la ayuda de un helicóptero, y permite al operador inspeccionar una amplia cantidad de uniones y un gran porcentaje de la línea por día.

Para realizar mediciones en infrarrojo que entreguen resultados satisfactorios es necesario conocer las características del objeto bajo inspección y su entorno con un cierto grado de precisión. Hay diversos factores que afectan la medición, entre los principales se encuentran: emisividad, temperatura del entorno, resolución espacial, y atenuación atmosférica.

Existe también un modelo teórico que relaciona la temperatura del conductor con la corriente que está circulando por el mismo. Este método es presentado en el standard 738 de la IEEE y se basa en un análisis térmico. Para determinar la temperatura que hay en el conductor se requieren las siguientes variables: Material conductor, diámetro del conductor, condiciones de la superficie del conductor, condiciones del ambiente, velocidad del viento, latitud, Azimut, y la corriente eléctrica. En la figura 3.19 se muestra una simulación del efecto del viento en la temperatura del conductor aplicando el modelo mencionado.

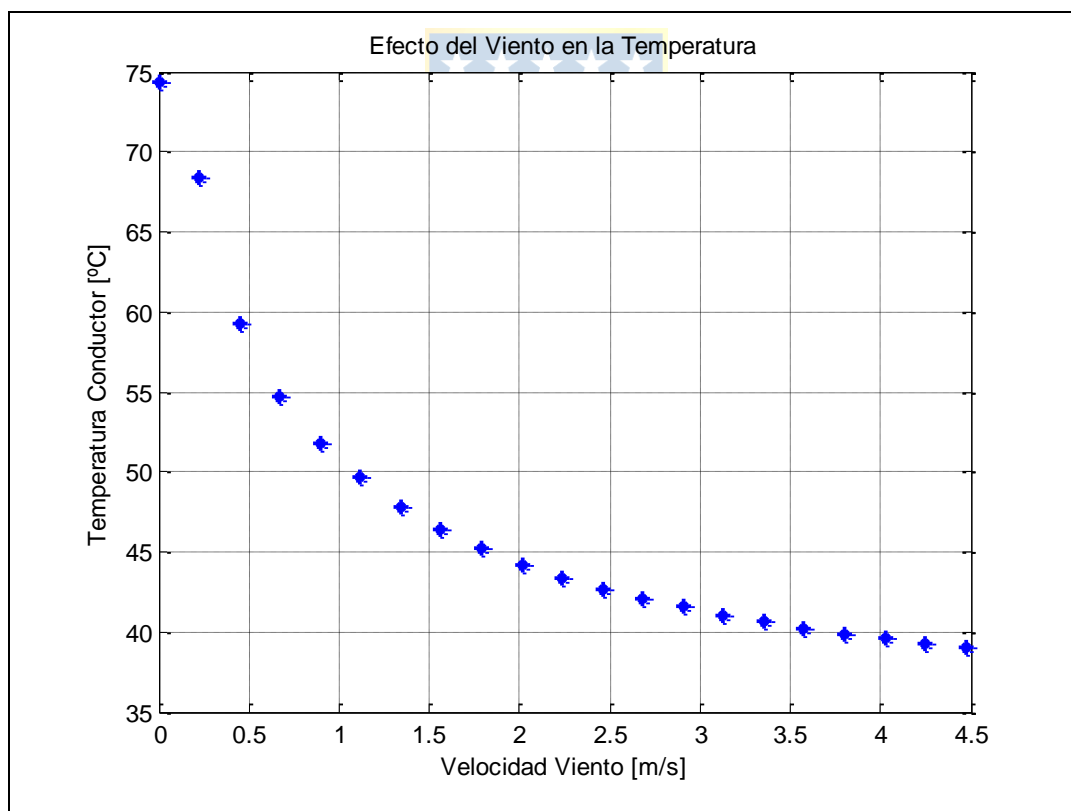


Fig. 3.19 Relación entre viento y temperatura del conductor considerando el resto de las variables constantes.

En la figura 3.29 se observa que a velocidades bajas del viento las variaciones de la temperatura son mayores, lo cual debe tenerse en consideración al realizar las mediciones, pues puede llevar a resultados erróneos. Se puede concluir que una buena condición para realizar las mediciones

es un día soleado y con viento a velocidades de viento relativamente altas, por sobre los 2 [m/s], esto es porque las variaciones de temperatura a lo largo del cable serían menores y se evitaría encontrar puntos calientes que no tienen relación con una anomalía.

Existen métodos con los cuales a partir de los datos que entrega la cámara en IR se puede obtener la temperatura aproximada del conductor. Uno de estos métodos es la calibración de 2 puntos, en el cual se utilizan como referencia 2 cuerpos negros a distintas temperaturas (uno a temperatura baja y otro a temperatura alta) y mediante un algoritmo se puede encontrar la relación entre los datos entregados por la cámara (que usualmente se encuentran en bits) y el valor real de la temperatura. En la figura 3.20 se muestra un ejemplo de medición de temperatura utilizando el método de los 2 puntos [25] con una cámara infrarroja. La imagen fue procesada en MATLAB y registrada en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Concepción.

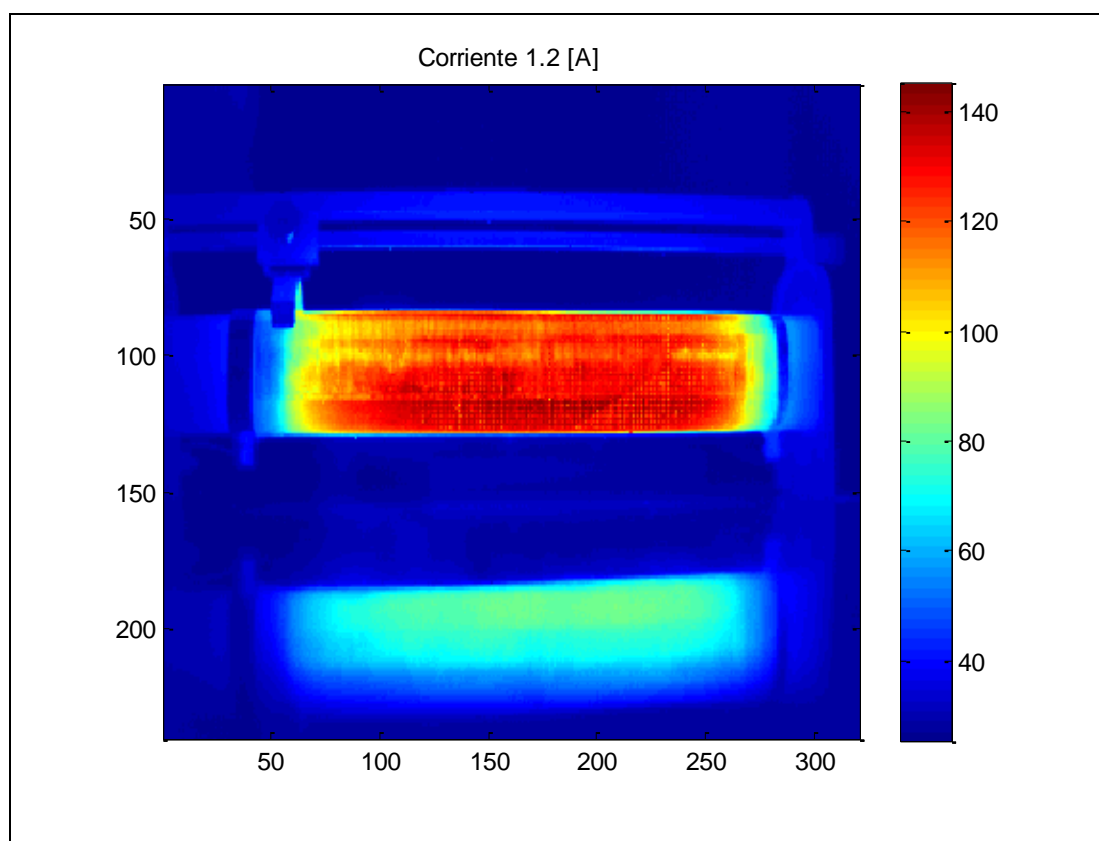


Fig. 3.20 Medición de Temperatura a partir de calibración de 2 puntos.

3.4. **Discusión y Conclusiones**

En general se tiene una amplia gama de técnicas que son aplicables a líneas AT. Cada una de ellas tiene ventajas y desventajas, y hay algunas que en la práctica no son aplicables al caso de estudio.

Se observa que la tecnología apunta a técnicas electrónicas que puedan complementarse con cálculos para así tener datos confiables. La gran ventaja que posee el infrarrojo respecto a las demás técnicas es que no requiere contacto con la línea. Sin embargo para que esta técnica sea efectiva se deben tener las consideraciones pertinentes para el caso, ya que distintos factores afectan a las mediciones como por ejemplo: Temperatura ambiente, velocidad del viento, corriente circulando por la línea, atmósfera, etc.



Capítulo 4. Aplicación de Técnicas y Equipos Existentes para Detectar Fallas en Líneas AT

4.1. Introducción

Este capítulo tiene por objetivo mostrar la aplicación de equipos existentes para la detección de fallas en líneas AT, en particular se muestra el set-up propuesto para realizar las mediciones y las condiciones en las cuales éstas se realizaron.

4.2. Cámaras en Infrarrojo y Termografía

Las cámaras en infrarrojo convierten la radiación infrarroja en una imagen visual que describe las variaciones térmicas a lo largo de un objeto o una escena. El infrarrojo cubre una porción del espectro entre los 0.9-14 μm . Este tipo de radiación es emitido por todos los objetos cuya temperatura esté por sobre el cero absoluto, y la cantidad de radiación aumenta con la temperatura.

La termografía es un tipo de formación imágenes que es logrado con una cámara infrarroja calibrada para mostrar los valores de temperatura a lo largo del objeto. Por lo tanto, la termografía permite realizar mediciones de temperatura sin necesidad de contacto con el objeto.

La construcción de una cámara infrarroja es similar a la de una cámara de video. Los componentes principales son: un lente que enfoca el infrarrojo en un detector, más un software y electrónica para procesar y mostrar las señales e imágenes. El detector de la cámara infrarroja es un arreglo plano focal (o FPA por sus siglas en inglés "*Focal Plane Array*") de pixeles, de tamaño del orden de los micrómetros, hechos de varios materiales sensibles a las longitudes de onda de IR. Las resoluciones del FPA pueden variar de aproximadamente 160x120 pixeles hasta 1024x1024 pixeles. Ciertas cámaras IR tienen incorporados software que permiten al usuario enfocarse en áreas específicas del FPA y calcular la temperatura. Otros sistemas utilizan un computador o sistema de datos con un software especializado que hace el análisis de temperatura. Ambos métodos pueden realizar un análisis con precisiones mejores que $\pm 1^\circ\text{C}$.

Las tecnologías de detectores FPA se dividen en dos categorías: Detectores térmicos y detectores cuánticos. Un tipo común de detectores térmicos es un microbolómetro no refrigerado hecho de metal o de algún material semiconductor. Estos típicamente tienen menores costos y una respuesta mayor en el espectro IR que los detectores cuánticos. Sin embargo, reaccionan con la

energía radiante incidente y son mucho más lentos y menos sensibles que los detectores cuánticos. Los detectores cuánticos están hechos de materiales tales como InSb, InGaAs, PtSi, HgCdTe, y GaAs/AlGaAs en capas para detectores de pozos cuánticos de fotones infrarrojos (también denominados QWIP de su sigla en inglés “*Quantum Well Infrared Photon*”). La operación de un detector cuántico está basada en el cambio de estado de los electrones en una estructura cristalina al reaccionar con fotones incidentes. Estos detectores son en general más rápidos y sensibles que los detectores térmicos. Sin embargo, requieren refrigeración, a veces de hasta temperaturas criogénicas (77.36 [K]) utilizando nitrógeno líquido o una pequeña unidad de refrigeración de ciclo Stirling.

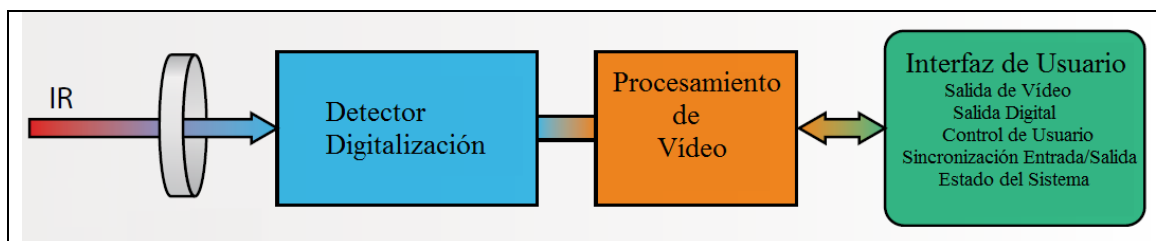


Fig. 4.1. Diagrama de bloques simplificado de una cámara IR.

4.2.1 Consideraciones del Espectro Infrarrojo

Típicamente, las cámaras IR son diseñadas y calibradas para un rango específico del espectro IR. Esto significa que los materiales ópticos y detectores deben ser escogidos para el rango deseado. La figura 4.2 ilustra las regiones de respuesta espectral para varios materiales detectores.

Dado que el infrarrojo tiene las mismas propiedades que la luz visible en cuanto a reflexión, refracción y transmisión, las ópticas para las cámaras térmicas están diseñadas de una manera similar a las de una cámara normal (que trabaja en longitudes de onda de la luz visible). No obstante, los tipos de vidrio usados en las ópticas para cámaras de luz visible no pueden ser usados para ópticas de cámaras infrarrojas, ya que éstos no transmiten lo suficientemente bien las longitudes de onda del IR. En contraparte, los materiales que son transparentes en IR son usualmente opacos en luz visible.

Los lentes de las cámaras infrarrojas típicamente utilizan materiales de Silicio (Si) y Germanio (Ge). Normalmente el Silicio es utilizado en sistemas de cámara para longitudes de onda media en infrarrojo (MWIR de su sigla en inglés “*medium wavelength IR*”), mientras que el Germanio es utilizado en cámaras de longitudes de onda largas (LW de su sigla en inglés “*long wavelength*”). Estos 2 materiales tienen buenas propiedades mecánicas, es decir, no se rompen con facilidad, y no son higroscópicos (absorben la humedad del medio), además de que pueden ser convertidos en lentes con las técnicas modernas de torneado. Al igual que en las cámaras de luz visible, los lentes de las

cámaras IR tienen recubrimientos contra la reflexión. Con un diseño apropiado, los lentes de las cámaras IR pueden transmitir cerca de un 100% de la radiación incidente.

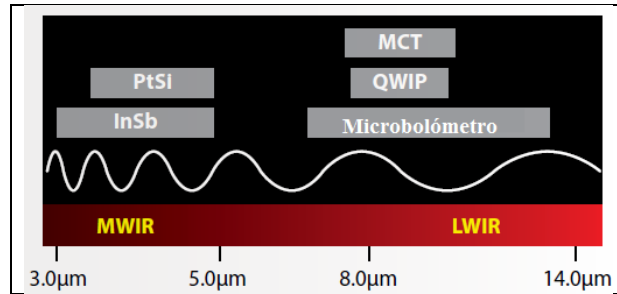


Fig. 4.2 Ejemplos de materiales detectores y sus respuestas espectrales relativas a distintas bandas de IR.

4.2.2 Principios de la Radiación Térmica

La intensidad de la energía emitida desde un objeto varía con la temperatura y las longitudes de onda de la radiación. Si el objeto está más frío que aproximadamente 500°C, la radiación emitida se encuentra completamente dentro de las longitudes de onda del IR. Además para emitir radiación, un objeto reacciona a la radiación incidente desde sus alrededores absorbiendo y reflejando una porción de la misma, o permitiendo que una pequeña cantidad pase a través del objeto (como en una lente). De este principio físico se deriva la ley de la radiación total, que puede ser expresada mediante la siguiente relación:

$$W = \alpha W + \rho W + \tau W \quad (4.1)$$

Y que puede ser simplificada a:

$$1 = \alpha + \rho + \tau \quad (4.2)$$

Los coeficientes α , ρ , y τ describen la absorción de energía incidente del objeto, la reflexión y la transmisión de energía respectivamente. Cada uno de estos términos tiene valores entre 0 y 1, dependiendo en qué tan efectivamente el objeto absorbe, transmite o refleja energía. Por ejemplo, si no hay energía reflejada o transmitida, el objeto absorbe un 100% de la radiación incidente. Un objeto con dichas características se conoce como **cuerpo negro perfecto**. En la realidad no existen objetos que emitan, transmitan o reflejen un 100% de la radiación incidente, sin embargo, algunos tienen características cercanas a las mencionadas. No obstante, el concepto del cuerpo negro perfecto es muy importante en la ciencia de la termografía, porque es la base para relacionar la radiación IR de un objeto con su temperatura.

Fundamentalmente, un cuerpo negro perfecto es aquel que absorbe y emite un 100% de la energía radiante. Este concepto es definido matemáticamente como la ley de Kirchhoff. Las

propiedades radiativas de un cuerpo se denotan con el símbolo ε , y se conoce como emitancia o emisividad de un cuerpo. La ley de Kirchhoff dice que $\alpha = \varepsilon$, y puesto que ambos valores varían con la longitud de onda de la radiación, la fórmula puede tomar la forma $\alpha(\lambda) = \varepsilon(\lambda)$, donde λ denota la longitud de onda. La ley de la radiación total puede tomar la forma matemática $1 = \varepsilon + \rho + \tau$, que para un cuerpo opaco ($\tau = 0$) puede ser simplificada en $1 = \rho + \varepsilon$.

Las propiedades radiativas de un cuerpo negro perfecto pueden ser descritas matemáticamente por la ley de Planck. Como esta ley tiene una fórmula matemática compleja, y es función de la temperatura y de la longitud de onda de la radiación, normalmente se muestra como una serie de curvas (Fig. 4.3).

Estas curvas muestran la radiación por unidad de longitud de onda y unidad de área, llamada emitancia radiante espectral del cuerpo negro. Mientras mayor sea la temperatura, más intensa será la radiación emitida. Sin embargo, cada curva de emitancia tiene un valor máximo distinto a una cierta longitud de onda. Este valor máximo puede ser calculado mediante la **ley de desplazamiento de Wien**.

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{T} \quad (4.3)$$

Donde T es la temperatura absoluta del cuerpo negro, medida en Kelvin, y λ_{max} es la longitud de onda en el punto de intensidad máxima. Usando las curvas de emitancia para cuerpo negro, se puede encontrar que un objeto a 30°C tiene el máximo cerca de 10 μ m, mientras que un objeto a 1000°C tiene una intensidad radiante con el máximo cerca de 2.3 μ m. El último tiene una emitancia radiante espectral aproximadamente 1400 veces mayor que un cuerpo negro a 30°C, con una considerable porción de radiación en el espectro visible.

De la ley de Planck, la energía total radiada desde un cuerpo negro puede ser calculada. Esto es expresado mediante una fórmula conocida como la ley de Stefan-Boltzmann, donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($5.67 \cdot 10^{-8} W/m^2 K^4$).

$$W = \sigma T^4 \quad (4.4)$$

Las ecuaciones descritas en esta sección proveen de importantes relaciones entre la radiación emitida y la temperatura de un cuerpo negro perfecto. Puesto que la mayoría de los objetos de interés para los termógrafos no son cuerpos negros perfectos, se necesita una forma para que una cámara IR pueda graficar la temperatura de un objeto “normal”.

4.2.3 Emisividad

Las propiedades radiativas de los objetos son usualmente descritas en relación al cuerpo negro

perfecto (El emisor perfecto). Si la energía emitida desde un cuerpo negro es denotada como W_{bb} , y la de un objeto normal como W_{obj} , entonces la razón entre estos dos valores describen la emisividad del objeto.

$$\varepsilon = \frac{W_{obj}}{W_{bb}} \quad (4.5)$$

Por lo tanto, la emisividad es un número entre 0 y 1. Mientras mejores sean las propiedades radiativas, más alta será la emisividad. Un objeto que tiene la misma emisividad para todas las longitudes de onda se conoce como cuerpo gris. Consecuentemente, para un cuerpo gris, la ley de Steffan Boltzmann toma la siguiente forma:

$$W = \varepsilon \sigma T^4 \quad (4.6)$$

Esto muestra que la potencia emitida total de un cuerpo gris es igual al de un cuerpo negro reducido en una proporción ε para el objeto.

Aun así, la mayoría de los cuerpos no son ni negros ni grises. La emisividad varía con la longitud de onda. Como la termografía opera solamente dentro de rangos limitados de longitudes de onda, en la práctica es común tratar objetos como cuerpos grises. En cualquier caso, un objeto que tiene una emitancia que varía fuertemente con la longitud de onda se conoce como radiador selectivo. Por ejemplo, el vidrio es un radiador selectivo, comportándose casi como un cuerpo negro para ciertas longitudes de onda, mientras que su comportamiento es opuesto para otras longitudes de onda.

4.2.4 Influencia Atmosférica

Entre el objeto y la cámara térmica está la atmósfera, que tiende a atenuar la radiación debido a la absorción por gases y dispersión por partículas. La cantidad de atenuación depende fuertemente de la longitud de onda de la radiación. Aunque la atmosfera usualmente transmite fácilmente la luz visible, la niebla, nubes, lluvia, y nieve pueden evitar la visión de objetos distantes. El mismo principio se aplica en la radiación IR.

Para mediciones termográficas se debe usar las conocidas ventanas atmosféricas. Como se observa en la figura 4.5, estas ventanas atmosféricas pueden encontrarse entre los 2 y 5 μm (Ventanas de onda media “MW”), y 7.5-13.5 μm (Ventanas de onda larga “LW”). La atenuación atmosférica evita que toda la radiación emitida por el objeto llegue a la cámara. Si no se aplica corrección por atenuación, la medición de la temperatura aparente será cada vez menor a medida que se incrementa la distancia. Los software de las cámaras IR corrigen por atenuación atmosférica.

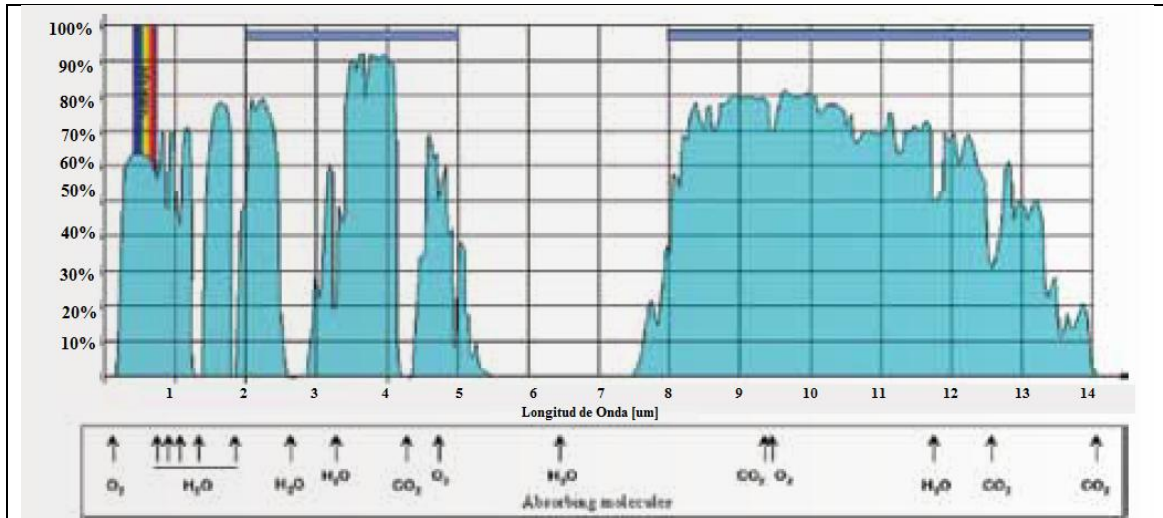


Fig. 4.3 Atenuación atmosférica (áreas blancas) con un cuadro de los gases y el vapor causantes de la mayoría de esta. Las áreas bajo la curva representan la máxima transmisión IR.

Típicamente las cámaras LW trabajan bien dentro del rango de 7.5-13.5 μm en cualquier valor donde se involucre atenuación atmosférica, porque la atmósfera tiende a actuar como un filtro pasa-alto sobre los 7.5 [μm]. La banda MW de 3-5 μm se emplea con detectores de alta sensibilidad para aplicaciones relevantes, como por ejemplo militares. Cuando se adquiere una señal a través de la atmósfera con cámaras MW, la banda de transmisión debe seleccionarse de manera que ocurra la menor atenuación.

4.2.5 Mediciones de Temperatura

La radiación que incide en el lente de la cámara IR viene de 3 fuentes diferentes. La cámara recibe radiación del objeto apuntado, más la radiación de sus alrededores que ha sido reflejada a través de la superficie del objeto. Estas dos componentes de radiación son atenuadas al pasar a través de la atmósfera. Puesto que la atmósfera absorbe parte de la radiación, también irradiará parte de la misma (Ley de Kirchhoff).

Dada esta situación, se puede derivar una fórmula para calcular la temperatura del objeto desde la salida de una cámara calibrada.

1. **Emisión desde el objeto** = $\epsilon\tau W_{obj}$, donde ϵ es la emisividad del objeto y τ es la transmitancia de la atmósfera.
2. **Emisión reflejada desde el ambiente** = $(1 - \epsilon)\tau W_{amb}$, donde $(1 - \epsilon)$ es la reflectancia del objeto. Se asume que la temperatura T_{amb} es la misma para todas las superficies emisoras dentro de la mitad de la esfera vista desde un punto en la superficie del objeto.

3. **Emisión desde la atmósfera** = $(1 - \tau)W_{atm}$, donde $(1 - \tau)$ es la emisividad de la atmósfera.

La radiación total recibida por la cámara puede ser escrita mediante:

$$W_{tot} = (1 - \tau)W_{obj} + (1 - \varepsilon)\tau W_{amb} + (1 - \tau)W_{atm} \quad (4.7)$$

Donde ε es la emisividad del objeto, τ es la transmisión a través de la atmósfera, T_{amb} es la temperatura efectiva de los alrededores del objeto, o la temperatura reflejada del ambiente, y T_{atm} es la temperatura de la atmósfera.

Para llegar a la temperatura correcta del objeto, el software de la cámara IR requiere entradas para la emisividad del objeto, la atenuación atmosférica, la temperatura de la atmósfera, y la temperatura de los alrededores. Dependiendo de las circunstancias, estos factores pueden ser medidos, asumidos, o encontrados en tablas.

4.3. Propuesta de Set-Up

4.3.1 Características de los Conductores

Para realizar las mediciones se utilizaron 3 tipos de conductores: ACSR Raven, conductor de cobre desnudo, y un conductor de aluminio Violet. Las características de los conductores se muestran en las tablas en la tabla 4.1, 4.2 y 4.3 respectivamente.

TABLA 4.1 Características del Conductor Raven.

Parámetro	Valor
<i>Sección</i>	1/0 AWG
<i>Composición Aluminio Acero</i>	6/1
<i>Peso Total</i>	145 lbs/pie
<i>Resistencia DC a 25°C</i>	0.159 Ω /(1000 pies)
<i>Resistencia AC a 75°C</i>	0.217 Ω /(1000 pies)
<i>Ampacidad</i>	242 A

TABLA 4.2 Características del Conductor de Cobre

Parámetro	Valor
<i>Sección</i>	2/0 AWG
<i>Composición</i>	Cobre
<i>Número de Hebras</i>	19
<i>Peso Total</i>	611 kg/km
<i>Resistencia DC a 25°C</i>	0.0266 Ω /km
<i>Ampacidad</i>	307 A

TABLA 4.3 Características del Conductor Violet

Parámetro	Valor
<i>Sección</i>	715.5 MCM
<i>Composición</i>	AAC
<i>Número de Hebras</i>	37
<i>Peso Total</i>	998.5 kg/km
<i>Resistencia DC a 25°C</i>	0.0242 Ω /(1000 pies)
<i>Resistencia AC a 75°C</i>	0.0299 Ω /(1000 pies)
<i>Ampacidad</i>	823 A

4.3.2 Equipos Utilizados

Los conductores fueron alimentados mediante un equipo llamado multi-amp, cuyas características se muestran en la tabla 4.3. El equipo es mostrado en la figura 4.1 y en las figuras 4.2, 4.3 se muestra la propuesta de set-up.



Fig. 4.4 Multi-Amp.

TABLA 4.4 Especificaciones Técnicas Multi-Amp

Item	Especificación
<i>Voltaje de Entrada</i>	120/240 [V]
<i>Frecuencia</i>	50/60 [Hz]
<i>Rangos de Salida</i>	0-500 [A] a 3.5 [V] max.
	0-125 [A] a 14 [V] max.
	0-25 [A] a 70 [V] max

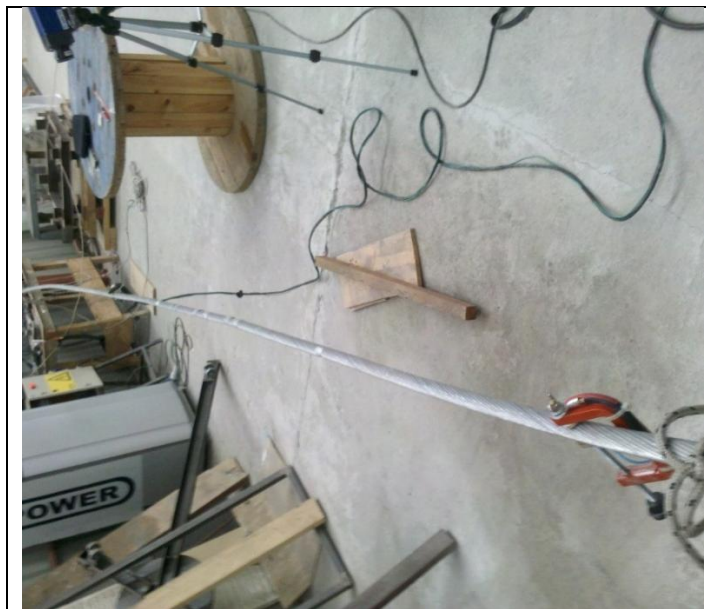


Fig. 4.5. Muestra de conductor tendido.



Fig. 4.6. Propuesta de set-up para realizar las pruebas.

Se utilizaron 2 cámaras para la realizar las mediciones: Cámara CEDIP, y cámara FLUKE Ti25. Las cámaras se muestran en las figuras 4.4 y 4.5 respectivamente y sus especificaciones técnicas se muestran en las tablas 4.5 y 4.6. La diferencia principal de estas cámaras es que trabajan en distintas bandas espectrales. La cámara CEDIP trabaja entre 8-10 [μm], mientras que la cámara FLUKE Ti25 trabaja entre 7.5-14 [μm].



Fig. 4.7. Cámara CEDIP.



Fig. 4.8. Cámara FLUKE Ti25

TABLA 4.5 Especificación cámara CEDIP.

Item	Especificación
<i>Número de Píxeles</i>	320x240
<i>Material Sensor</i>	Microbolómetro no refrigerado
<i>Tipo de Enfriamiento</i>	No refrigerado con estabilización de Temperatura
<i>Respuesta Espectral</i>	8-12[μm]
<i>Sensibilidad Térmica</i>	80[mK] a 30 [°C]
<i>Operabilidad</i>	> 99.5%
<i>Tasa de Frames</i>	50 [Hz] o 60 [Hz]
<i>Salida Análoga</i>	CCIR 50 [Hz] or RS170 60 [Hz], blanco y negro
<i>Salida Digital</i>	14 bits de píxeles digitales
<i>Peso (sin lente)</i>	Aproximadamente 1 [kg]
<i>Entorno</i>	IP 54
<i>Voltaje de Entrada</i>	7-14 VDC (externo)
<i>Rango Operacional de Temperaturas</i>	0°C +45°C
<i>Consumo de Potencia</i>	< 5 [W]
<i>Comando de Software</i>	CIRRUS Win Software
<i>Procesamiento de Imágenes</i>	Ganancia y offset automática y manual, procesamiento de histograma, inversión de paleta de colores

TABLA 4.6 Especificaciones cámara FLUKE Ti 25

Item	Especificación
<i>Rango de medida de la Temperatura</i>	-20 [°C] a +350 [°C]
<i>Precisión</i>	± 2 [°C]
<i>Campo de Visión</i>	23° x 17°
<i>Distancia Focal Mínima</i>	Lente de Infrarrojo: 15[cm]. Lente de Luz Visible: 46 [cm]
<i>Frecuencia de Imagen</i>	Velocidad de actualización de 9 [Hz]
<i>Tipo de Detector</i>	Matriz de plano focal de 160x120, microbolómetro no refrigerado.
<i>Tipo de lente de infrarrojo</i>	20 [mm]
<i>Sensibilidad Térmica</i>	100 [mK]
<i>Banda Espectral</i>	7.5 – 14 [μm]
<i>Peso</i>	Aproximadamente 1.2 [kg]
<i>Comando de Software</i>	SmartView

Para inyectar corrientes por sobre los 500 [A] en el conductor de aluminio se utilizó un equipo llamado omicron, el cual se muestra en la figura 4.9.



Fig. 4.9. Omicron CPC 100.

Y para inyectar dicha corriente durante una mayor cantidad de tiempo se utilizó un amplificador de corriente que es un accesorio del Omicron CPC 100 y se muestra en la figura 4.10.

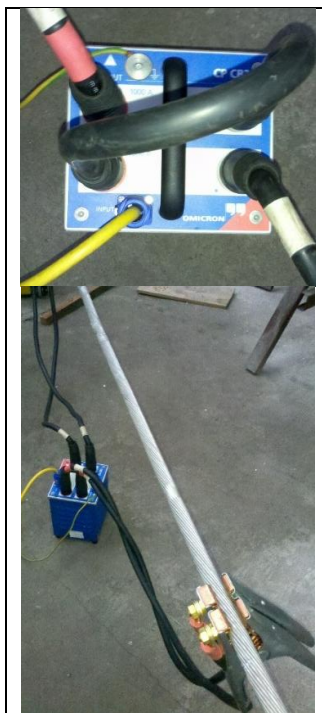


Fig. 4.10. Amplificador de corriente para Omicron CPC 100

Las especificaciones técnicas del equipo en relación a la corriente de salida se muestran en la tabla 4.7.

TABLA 4.7. Salidas de corriente para Omicron CPC 100.

Rango	Amplitud	t_{max}	V_{max}	Potencia $_{max}$	f
800 [A] CA	0 – 800 [A]	25 [s]	6.0 [V]	4.8 [kVA]	15 – 400 [Hz]
	0 – 400 [A]	8 [min]	6.4 [V]	2.5 [kVA]	
	0 – 200 [A]	> 2 [h]	6.5 [V]	1.3 [kVA]	
6 [A] CA	0 – 6 [A]				
3 [A] CA	0 – 3 [A]				
400 [A] CC	0 – 400 [A]				
	0 – 300 [A]				
	0 – 200 [A]				
2000 [A] CA con un amplificador de corriente opcional					

4.4. Anomalías realizadas en los conductores

Se estudiaron distintas anomalías posibles en conductores. En el caso del conductor ACSR se le realizaron 3 tipos de anomalías: Pequeña reducción del área transversal, corte pequeño de 2.5 [mm] de profundidad, y corte de una hebra (distancia de 2 [cm]). Las anomalías se muestran en las figuras 4.6, 4.7 y 4.8 respectivamente.



Fig. 4.11. Reducción del área transversal en conductor ACSR.



Fig. 4.12. Corte de 2.5 [mm] de profundidad en conductor ACSR.



Fig. 4.13. Corte de 2 [cm] de hebra en conductor ACSR

Para el conductor de cobre, las anomalías realizadas fueron las mismas y se muestran en las figuras 4.9, 4.10 y 4.11.



Fig. 4.14 Reducción del área transversal en conductor de Cobre

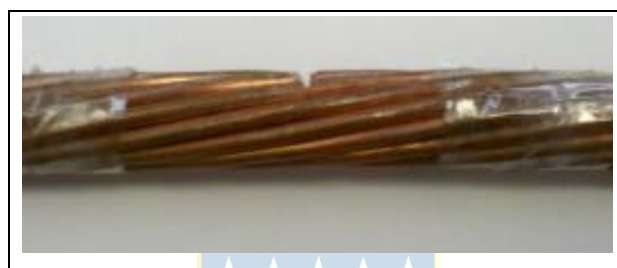


Fig. 4.15 Corte de 2.5 [mm] de profundidad en conductor de Cobre.

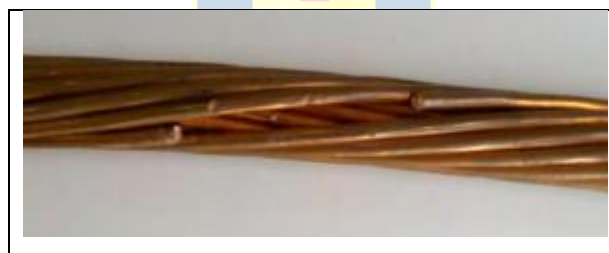


Fig. 4.16 Corte de 2 [cm] de hebra en conductor de Cobre

(a) Vista Lateral (B) Vista Frontal

Por último, en el conductor de aluminio se realizaron 6 tipos de fallas: Una reducción del área transversal, corte de 2.5 [mm], corte de 5 [mm], corte de 7.5 [mm], corte de una hebra, y corte de 3 hebras. Las fallas se muestran en las siguientes figuras respectivamente:



Fig. 4.17. Reducción de área transversal del conductor de aluminio.

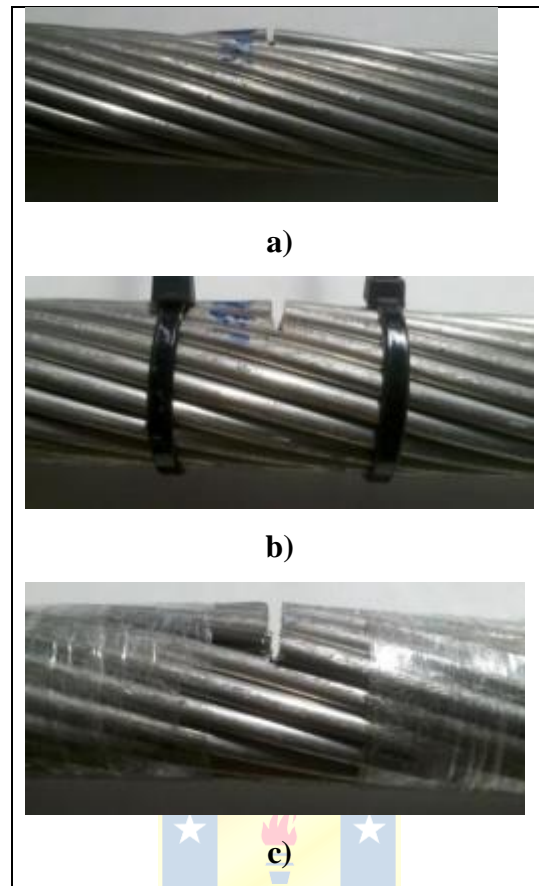


Fig. 4.18. Cortes en el conductor de aluminio.

(a) 2.5 [mm] (b) 5 [mm] (c) 7.5 [mm]

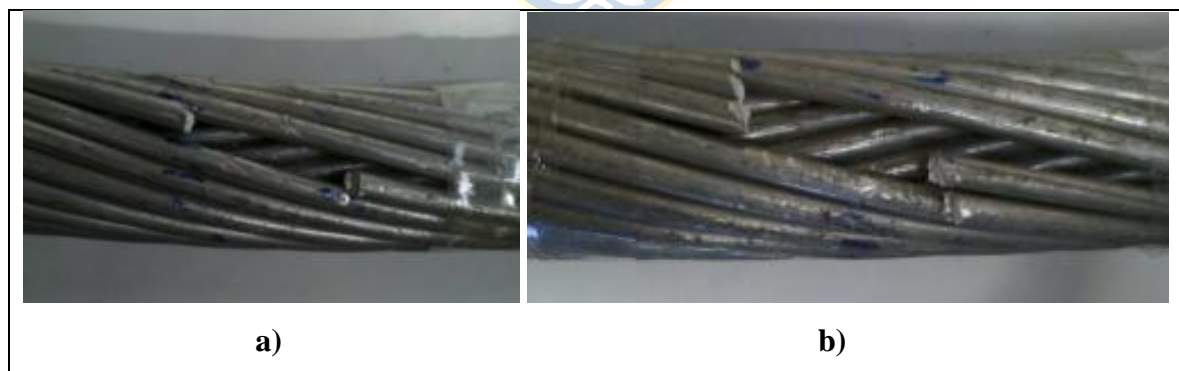


Fig. 4.19. Corte de 2 [cm] de hebra en conductor de aluminio

(a) 1 hebra (b) 2 hebras

4.5. Consideraciones previas

Como se explica en el Anexo A de este documento, la ampacidad de los conductores se obtiene teniendo en consideración las características del conductor, y las condiciones del entorno en el que se encuentra la línea de transmisión. Sin embargo, el cálculo se realiza considerando que la temperatura se encuentra en estado estacionario. El aumento de temperatura es un fenómeno lento, por lo que generalmente para los niveles de corriente normales, las constantes de tiempo suelen ser del orden de los 10 minutos o más (ver Anexo A).

La IEEE, a partir de diversas publicaciones en lo que es encontrar una relación entre la corriente y la temperatura de un conductor aéreo desnudo, ha desarrollado un estándar basado en el método *House and Tuttle* [16] que modela el aumento de temperatura en un conductor a partir de la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{dT_c}{dt} = \frac{1}{mC_p} [R(T_c)I^2 + q_s - q_c - q_r] \quad (4.8)$$

La ecuación anterior es sólo aplicable cuando se tienen cambios en escalón de la corriente. La ecuación tiene coeficientes que son no lineales por lo que no existe una solución analítica. Cabe destacar que el resto de las variables involucradas en el cálculo de las tasas de calor se consideran constantes. Para solventar la no linealidad del término relacionado con la tasa de calor por radiación, *Black and Rehberg* proponen un método para linealizar éste término, con lo que la ecuación (4.8) queda como:

$$\frac{d}{dt}(T_c - T_a) = K_1(T_c - T_a) + K_2I^2 \quad (4.9)$$

Cuya solución general, para un cambio en escalón de la corriente, es:

$$T_c(t) = T_i + (T_f - T_i)(1 - e^{-t/\tau}) \quad (4.10)$$

Donde T_i es la temperatura en el conductor antes del cambio de corriente, es decir I_i y T_f es la temperatura del conductor en estado estacionario para la corriente I_f . La constante de tiempo se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$\tau = \frac{(T_f - T_i)mC_p}{R[I_f^2 - I_i^2]} \quad (4.11)$$

La resistencia R del conductor corresponde a un valor resistivo considerando la temperatura promedio en el conductor, $(T_i + T_f)/2$.

Con este modelo, se puede obtener una estimación de la corriente y el tiempo necesarios a inyectar en el conductor para poder simular una condición realista en las pruebas.



Capítulo 5. Análisis de Resultados Obtenidos

5.1. Introducción

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos luego de realizar las mediciones para el set-up propuesto en el capítulo 4. En general se muestra el procesamiento de datos y la fotografía infrarroja que entrega la cámara para cada situación de falla emulada.

5.2. Resultados de la experimentación

5.2.1 Conductor ACSR

Como se explicó en el capítulo 4, las mediciones se realizaron para dos condiciones: Inyectando una corriente de 100 [A], e inyectando una corriente de 200 [A]. El espectro infrarrojo, correspondiente a la disminución del área transversal del conductor se muestra en la figura 5.1, utilizando la cámara CEDIP.

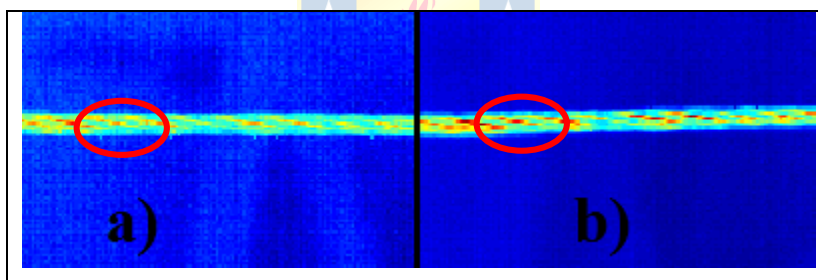


Fig. 5.1. Espectro infrarrojo para reducción del área transversal utilizando cámara CEDIP.

a) 100 [A]. b) 200 [A].

La fotografía infrarroja muestra el calentamiento del cable a lo largo del conductor. Se observa una distribución de temperatura aproximadamente homogénea en el cable. Los puntos que se muestran más calientes están ligados a la reducción de la sección en una longitud de 2 [cm] (que está marcada en la imagen), pero el resultado no es concluyente debido a que el calor está distribuido de manera prácticamente uniforme.

En la figura 5.2 se muestra el espectro entregado por la cámara FLUKE Ti25 para el mismo caso, es decir, para la reducción del área transversal del conductor.

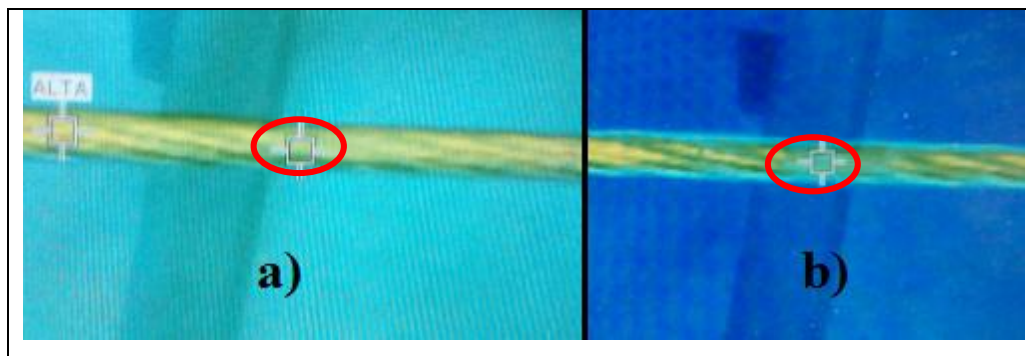


Fig. 5.2. Espectro infrarrojo para reducción del área transversal utilizando cámara FLUKE Ti25.

a) 100 [A]. b) 200 [A].

Se observa un espectro similar al obtenido con la cámara CEDIP. La reducción del área transversal no produce un calentamiento que pueda diferenciarse fácilmente con el resto de las secciones del cable, por lo que se concluye que no genera un punto caliente que fuese concluyente o que de indicios de anomalías en el conductor.

En las figuras 5.3 y 5.4 se muestra el espectro infrarrojo del caso del corte de 2.5 [mm] del conductor para las cámaras CEDIP y FLUKE Ti25 respectivamente.

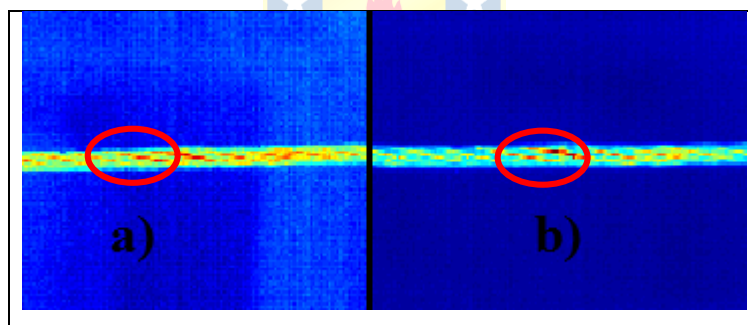


Fig. 5.3. Espectro infrarrojo para corte de 2.5 [mm] de profundidad, utilizando cámara CEDIP.

a) 100 [A]. b) 200 [A].

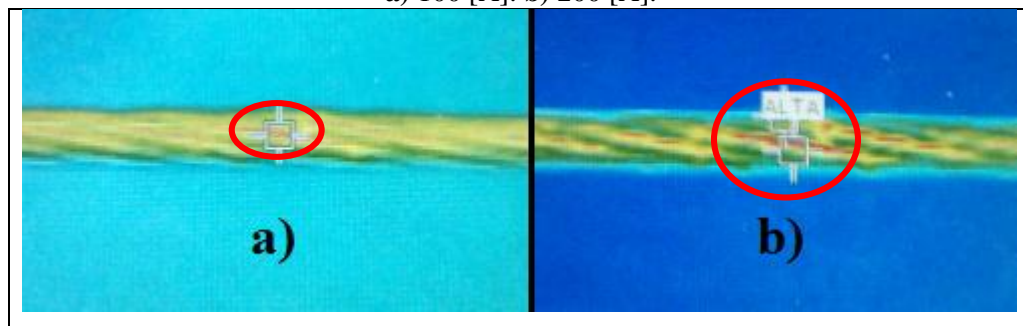


Fig. 5.4 Espectro infrarrojo para corte de 2.5 [mm] de profundidad, utilizando cámara FLUKE Ti25.

a) 100 [A]. b) 200 [A].

En este caso se observa que el corte de 2.5 [mm] de profundidad produce un punto caliente. En el caso de 100 [A], figura 5.4 a) no se puede observar el efecto del calentamiento de forma clara,

debido a que la temperatura en el conductor no es lo suficientemente elevada. Sin embargo, es observable el efecto del corte, pero no da resultados concluyentes, pues, si no se supiera la localización de la falla sería prácticamente imposible diagnosticar que el conductor se encuentra con alguna anomalía en dicho punto.

Para una corriente de 200 [A] (figura 5.4 b)) se observa de forma clara la localización de la falla, por lo que se puede diagnosticar con precisión si el conductor se encuentra en mal estado al mirar el espectro IR. La diferencia de las imágenes está relacionada al filtrado que efectúa la cámara, como la temperatura del conductor es mayor en el caso de los 200 [A], se filtran las emisiones más bajas de calor, por lo que se obtiene una imagen más clara. El calentamiento del conductor se debe a que en dicho punto el área efectiva es menor lo que trae como consecuencia una mayor resistencia en dichos puntos. Esto produce que el calentamiento por efecto Joule sea mayor. Otra forma de observar este fenómeno es considerando la densidad de corriente. Al ser menor el área efectiva, la densidad de corriente aumenta y esta está directamente relacionada con el calentamiento en el conductor.

En las figuras 5.5 y 5.6 se muestran los espectros infrarrojos para cada cámara al igual que en los casos anteriores, correspondiendo esta vez a la falla del corte de 2 [cm] de una hebra.

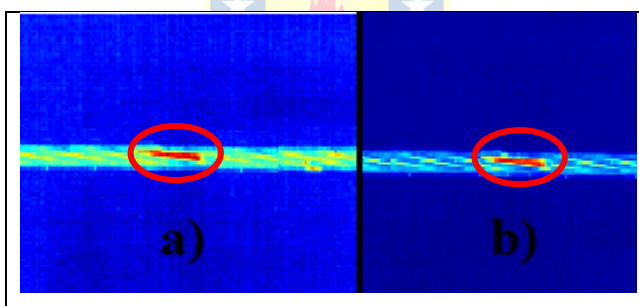


Fig. 5.5. Espectro infrarrojo para corte de 2 [cm] de una hebra, utilizando cámara CEDIP.

a) 100 [A]. b) 200 [A].

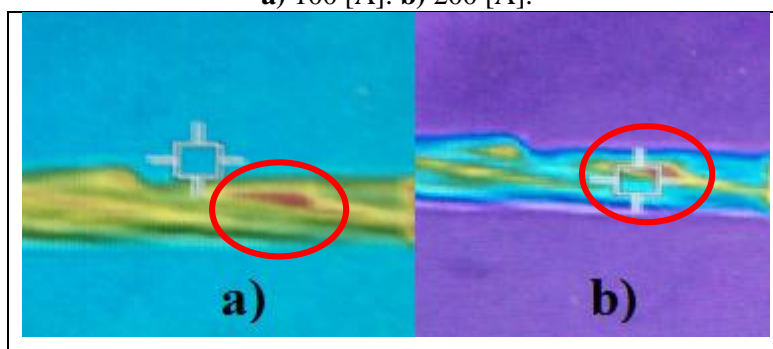


Fig. 5.6 Espectro infrarrojo para corte de 2 [cm] de una hebra, utilizando cámara FLUKE Ti25.

a) 100 [A]. b) 200 [A].

El corte de 2 [cm] de una hebra es la anomalía con mayor severidad que se le realizó al conductor ACSR. En este caso, la anomalía es completamente observable tanto para una corriente de

100 [A] como para una corriente de 200 [A]. Este comportamiento de los gradientes de temperatura era predecible, pues la conductividad térmica del acero es mucho menor que la del aluminio, por lo que al quitar una hebra del mismo, mayor cantidad de corriente circulará por la hebra de acero y esta se tenderá a calentar. Esto da un indicio de que en conductores con alma de acero se tiene facilidad para detectar fallas relacionadas con daños internos, como por ejemplo corrosión interna, o daños que reduzcan la sección efectiva del aluminio. La temperatura que se produce cuando hay anomalías como ésta o similares, es mucho mayor comparada con el resto de las anomalías estudiadas.

5.2.2 Conductor de Cobre

En el caso del conductor de cobre se estudiaron las mismas anomalías que en el conductor ACSR. Las características de este conductor son diferentes, principalmente porque su resistividad es mucho menor, lo que implica que el calentamiento por efecto Joule sea menor que en el caso del conductor ACSR para una misma corriente.

Antes de mostrar los espectros, cabe destacar es que el conductor de cobre seleccionado estuvo durante mucho tiempo en condiciones de humedad, por lo cual ciertas secciones se encontraban oxidadas. La ubicación que se escogió para realizar la anomalía de la disminución de sección transversal, fue en un punto donde el conductor estuviese claramente oxidado. La diferencia con el resto de los conductores, es que el conductor de cobre utilizado no era un conductor nuevo y es por ello que tenía esa anomalía relacionada al desgaste por envejecimiento.

En las figuras 5.7 y 5.8 se muestran los espectros infrarrojos de la reducción del área transversal del conductor de cobre, procesados por las cámaras CEDIP y FLUKE Ti25 respectivamente.

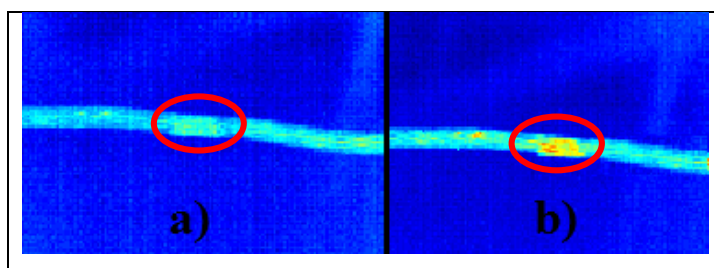


Fig. 5.7. Espectro infrarrojo para reducción del área transversal utilizando cámara CEDIP.

a) 100 [A]. b) 200 [A].

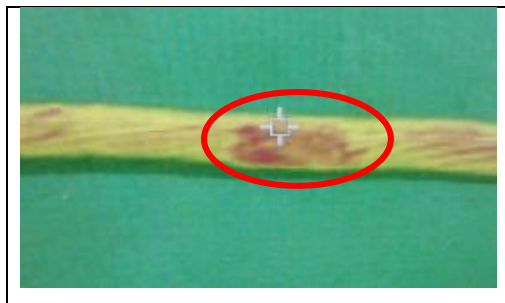


Fig. 5.8. Espectro infrarrojo para reducción del área transversal utilizando cámara FLUKE Ti 25 y una corriente de 200 [A].

Como se puede observar, al tener el cobre una resistividad menor que el aluminio, el calentamiento es mucho menor. Sin embargo, el espectro IR muestra que en la zona corroída y donde el área transversal disminuyó, existe una importante elevación de temperatura. Dicho gradiente, no puede ser observado a 100 [A], esto da un indicio de que si el conductor no está operando a un porcentaje considerable corriente con respecto a su corriente nominal, no será posible observar defectos o puntos calientes a lo largo del conductor. Sin embargo a 200 [A] es claro que ambas cámaras detectaron el efecto de temperatura que produce esta anomalía en el conductor.

En las figuras 5.9 y 5.10 se muestran nuevamente los espectros infrarrojos entregados por las cámaras, esta vez para el caso del corte de 2.5 [mm] de profundidad.

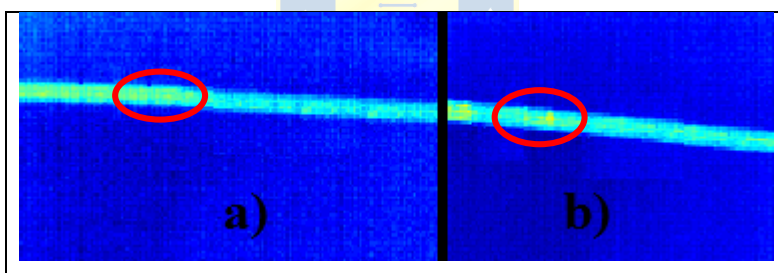


Fig. 5.9. Espectro infrarrojo para corte de 2.5 [mm] de profundidad, utilizando cámara CEDIP

a) 100 [A]. b) 200 [A]

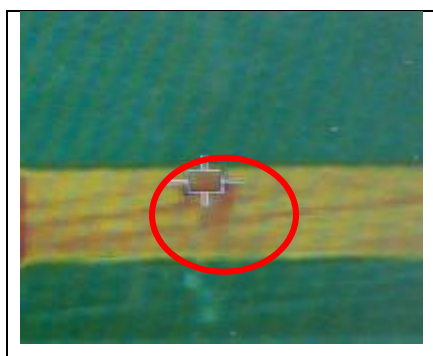


Fig. 5.10. Espectro infrarrojo para corte de 2.5 [mm] de profundidad, utilizando cámara FLUKE Ti25, inyectando 200 [A] al conductor.

En el espectro entregado por la cámara Ti25 se logra visualizar que el corte generó un punto caliente en el conductor, sin embargo la información que se obtiene no es concluyente. Además, esto ocurre con el espectro entregado por la cámara CEDIP. La buena conductividad del cobre, tanto térmica como eléctrica, hacen que no existan puntos calientes que llamen la atención o den un indicio de que existen anomalías en el conductor. Se puede observar que para 100 [A] el conductor prácticamente se encuentra a una temperatura uniforme, y a 200 [A] apenas se ve el punto donde el conductor se encuentra dañado. Si a esto se le suma el efecto de la atenuación atmosférica de la energía infrarroja (ver anexo B) se puede concluir que el método es inútil para la detección de este tipo de fallas, pues la distancia real a una línea de transmisión está por sobre los 7 [m] (ver anexo B).

En las figuras 5.11 y 5.12 se muestran nuevamente los espectros infrarrojos entregados por las cámaras, para la condición del corte de 2 [cm] de una hebra.

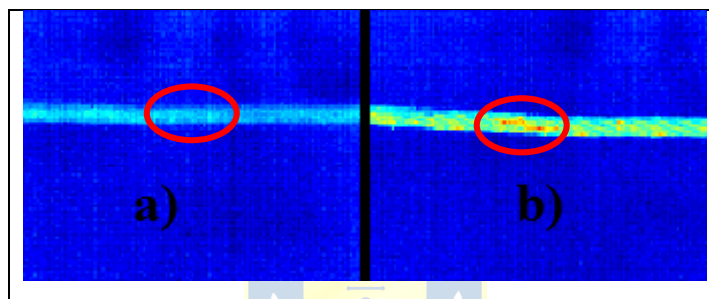


Fig. 5.11. Espectro infrarrojo para corte de 2 [cm] de una hebra, utilizando cámara CEDIP

a) 100 [A]. b) 200 [A]

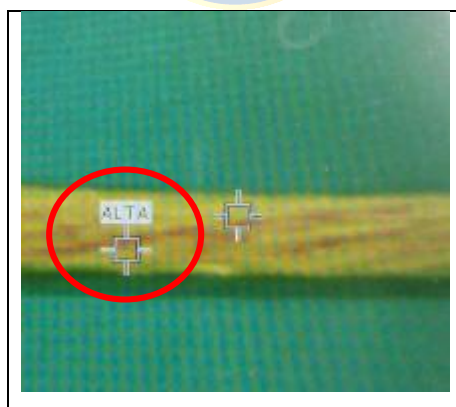


Fig. 5.12. Espectro infrarrojo para corte de 2 [cm] de una hebra, utilizando cámara FLUKE Ti25, con una corriente de 200 [A] circulando en el conductor.

Se observa que a 100 [A] (figura 5.11 a)) no se puede visualizar un calentamiento que de indicios de que el conductor se encuentre dañado, por lo que es imposible realizar un diagnóstico correcto.

En el caso del conductor a 200 [A], se observa la presencia de puntos calientes. Sin embargo, para ambas cámaras los resultados son no concluyentes pues la diferencia de temperatura en el punto con respecto al resto del conductor no es considerable. Cabe destacar que a diferencia del conductor ACSR, el conductor de cobre no posee núcleo de otro material por lo que era predecible el hecho de no encontrar un punto caliente significativo al tener anomalías relacionadas a la profundidad.

5.2.3 Conductor de Aluminio

En la figura 5.13 se muestra el espectro infrarrojo entregado por la cámara CEDIP para cada una de las anomalías estudiadas en el conductor de aluminio.

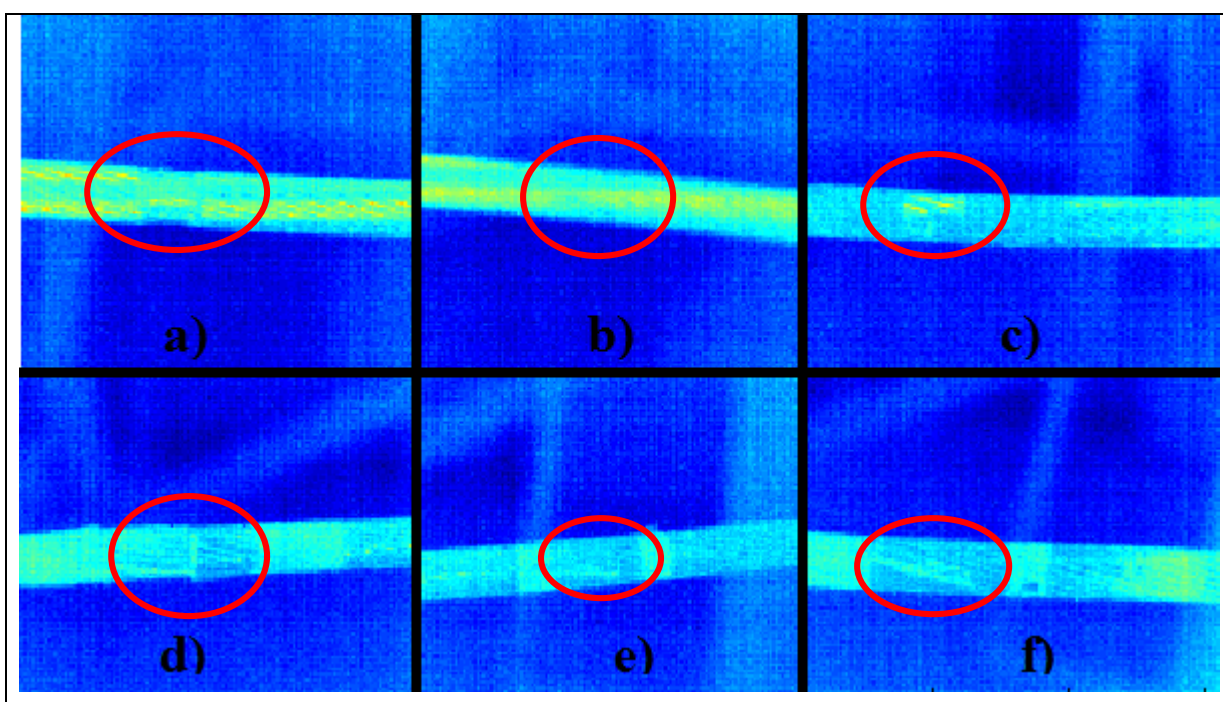


Fig. 5.13. Espectro Infrarrojo de las anomalías en el conductor de Aluminio (200 [A]).

a) Disminución de área transversal. **b)** Corte de 2.5 [mm] de profundidad. **c)** Corte de 5 [mm] de profundidad. **d)** Corte de 7.5 [mm] de profundidad. **e)** Corte de 2 [cm] de una hebra. **f)** Corte de 2 [cm] de 3 hebras.

Con una corriente de 200 [A] no se pudo detectar anomalías. La razón principal es que el conductor tiene una sección mayor que de los otros conductores, además se tiene que la principal fuente de calor que tienen los conductores son las pérdidas por efecto Joule (ver anexo A). Al tener el conductor mayor sección, la resistencia del mismo es menor por lo que a una corriente de 200 [A] no se calienta lo suficiente como para poder detectar una anomalía. Se realizó el cálculo de la temperatura aproximada del conductor a dicha corriente para las condiciones estimadas y el valor encontrado no fue mayor a 8 [°C] por sobre la temperatura ambiente.

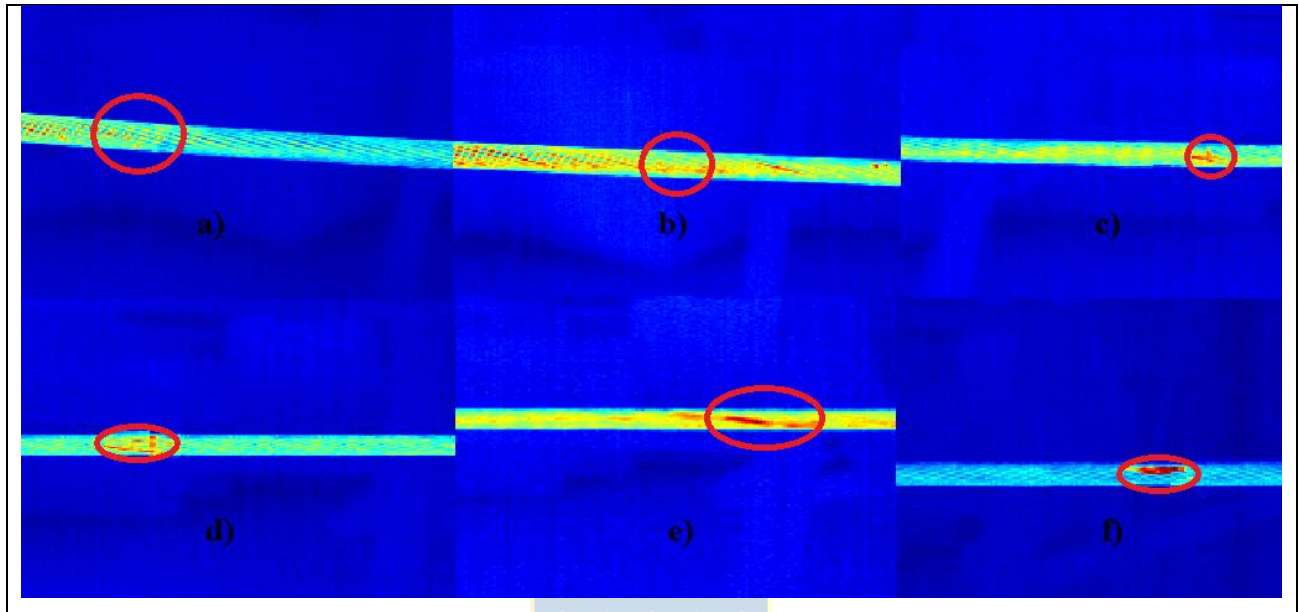


Fig. 5.14. Espectro Infrarrojo de las anomalías en el conductor de Aluminio (500 [A] – 10 [min]).

a) Disminución de área transversal. **b)** Corte de 2.5 [mm] de profundidad. **c)** Corte de 5 [mm] de profundidad. **d)** Corte de 7.5 [mm] de profundidad. **e)** Corte de 2 [cm] de una hebra. **f)** Corte de 2 [cm] de 3 hebras.

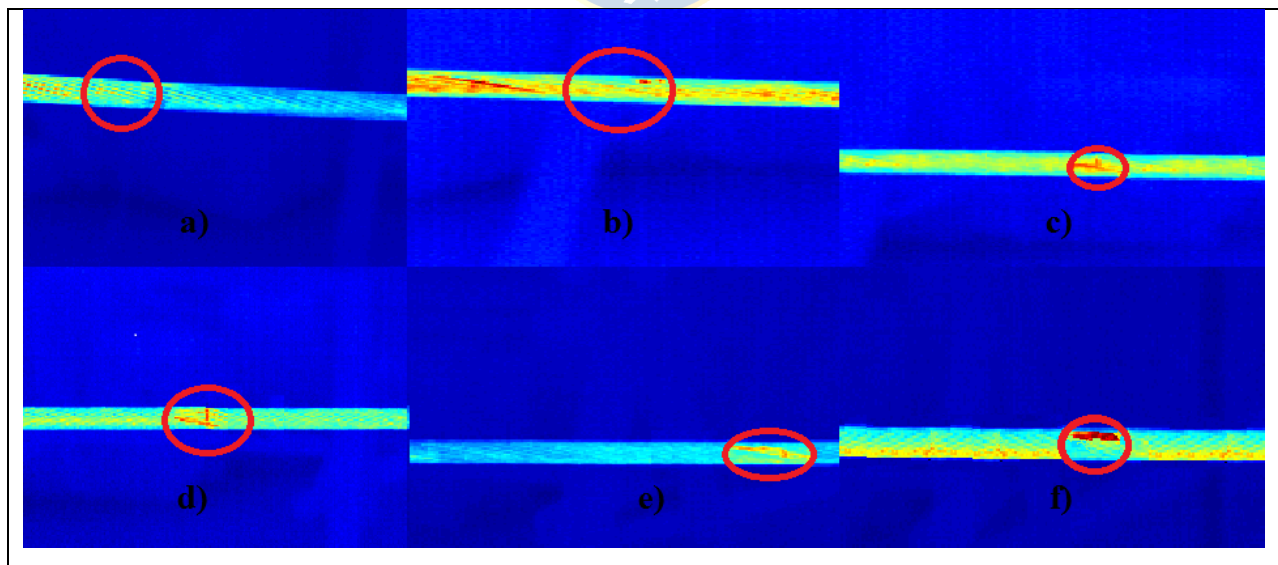


Fig. 5.15. Espectro Infrarrojo de las anomalías en el conductor de Aluminio (800 [A] – 5 [min]).

a) Disminución de área transversal. **b)** Corte de 2.5 [mm] de profundidad. **c)** Corte de 5 [mm] de profundidad. **d)** Corte de 7.5 [mm] de profundidad. **e)** Corte de 2 [cm] de una hebra. **f)** Corte de 2 [cm] de 3 hebras.

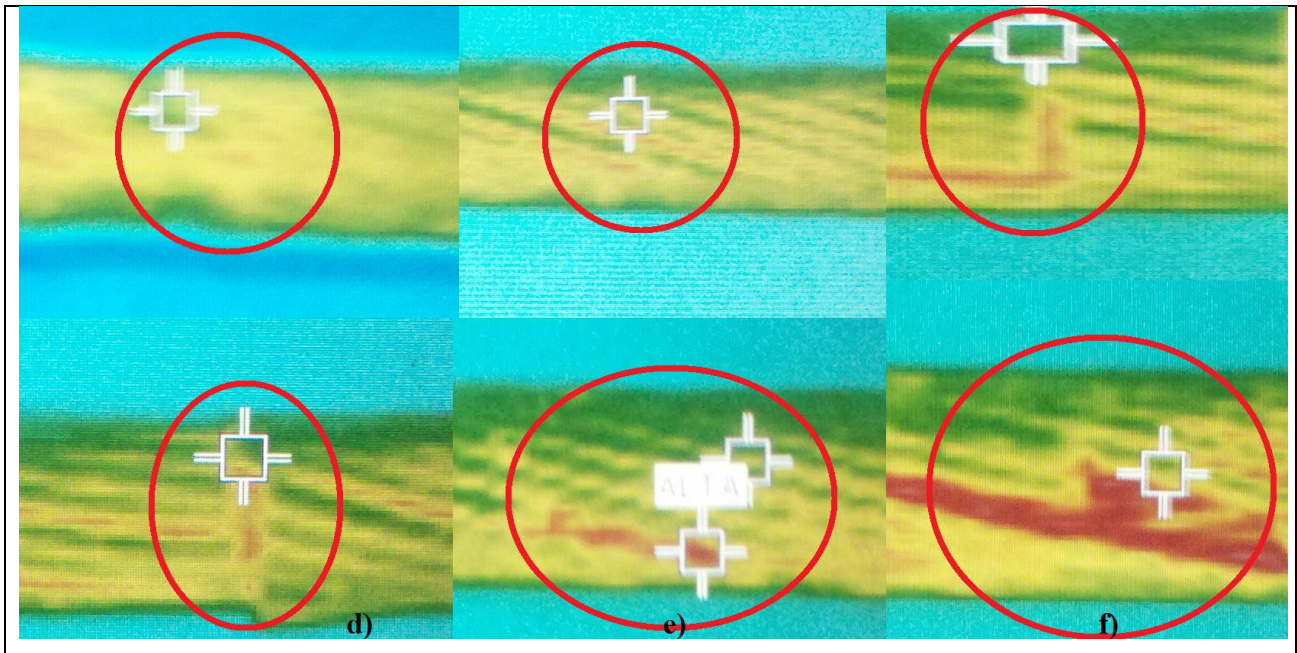


Fig. 5.16. Espectro Infrarrojo de las anomalías en el conductor de Aluminio utilizando cámara Fluke.

- a) Disminución de área transversal. b) Corte de 2.5 [mm] de profundidad. c) Corte de 5 [mm] de profundidad.
 d) Corte de 7.5 [mm] de profundidad. e) Corte de 2 [cm] de una hebra. f) Corte de 2 [cm] de 3 hebras.

Generalmente el estado estacionario de los fenómenos térmicos en conductores de alta tensión se alcanza a los 30 [min] aproximadamente. La experiencia y los modelos muestran que las constantes de tiempo para condiciones normales de operación se encuentran entre los 10 – 14 minutos. Una línea de alta tensión por lo general opera entre el 60 y 70 % de su capacidad nominal para dejar un margen en caso de sobrecarga. Las pruebas que se realizaron y que entregaron los resultados mostrados en las figuras 5.14, 5.15 y 5.16 respectivamente tienen en cuenta estas consideraciones. Para el caso de los 800 [A], el modelo explicado en el capítulo 4 entrega una temperatura equivalente al 70% de la que se tendría en estado estacionario si el conductor opera al 60%-70% de su capacidad nominal. Por otro lado, la constante de tiempo del conductor fue calculada mediante el mismo modelo para una condición de operación de 500 [A], dando como resultado 12 minutos. Esto garantiza que la prueba emula una condición real de operación.

Se observa que ambas cámaras detectaron las fallas más severas, sin embargo no fueron capaces de detectar la disminución del área transversal del conductor, ni el corte de 2.5 [mm] de profundidad. La razón es que son fallas relativamente pequeñas. Además, en la práctica las anomalías como la disminución del área efectiva del conductor, generalmente vienen acompañadas de otros fenómenos como sobrecargas mecánicas y pérdidas de propiedades físicas debidas a contaminación atmosférica. El conductor utilizado para realizar las pruebas es relativamente nuevo, por lo que no se

ha encontrado en entornos que puedan afectar sus características y propiedades físicas. Por lo que la pequeña reducción del área transversal no se diferencia del conductor en estado sano. Distinto sería si la zona estuviese oxidada o corroída, pues en ese caso la distribución de resistencia en ese punto sería mayor lo que generaría un punto caliente tal y como se observó en el caso del cobre.

Para las fallas más severas se observan con claridad los puntos calientes y la razón principal es que básicamente el área efectiva de conducción es menor, por lo que la densidad de corriente tiene que ser mayor en dichos puntos y por consiguiente el calentamiento por efecto Joule. Lo más destacable es que ambas cámaras lograron detectar las mismas fallas y que conforme aumenta la severidad de la falla, ésta es más observable.

5.3. Comparación con otros métodos

5.3.1 Comparación Método de Inspección Electromagnética

En las publicaciones de este método aplicado a líneas AT se estudian anomalías relacionadas a sobrecargas mecánicas, cortes de hebra, corrosión y fallas mixtas. Estas anomalías son similares a las estudiadas en esta memoria y por lo tanto se pueden contrastar resultados. En la figura 5.17 [12] se muestran imágenes de las anomalías estudiadas en las publicaciones relacionadas a la inspección electromagnética.

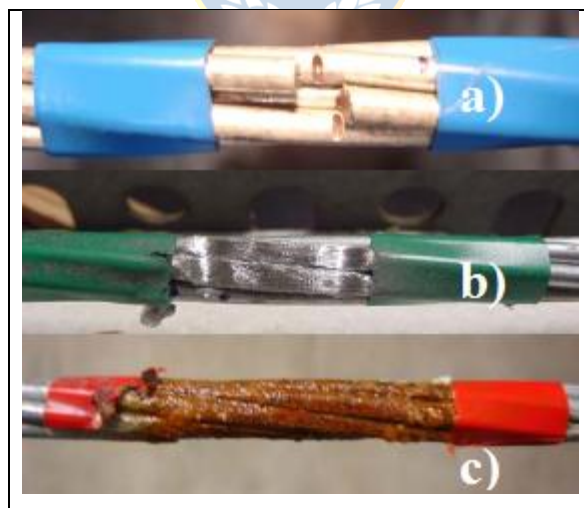


Fig. 5.17. Anomalías estudiadas con el método de Inspección Electromagnética.

a) Corte de 2 hebras. b) Reducción del área transversal. c) Corrosión.

Las anomalías que se estudian en dicha publicación abarcan longitudes desde 5 – 50 [mm] del conductor. Sin embargo la reducción de área por abrasión mecánica es mayor a la estudiada en este documento, pues, la reducción del área o limadura fue de un 5% aproximadamente, mientras que en la publicación se estudian anomalías que reducen el área hasta un 20% del área total del conductor. Cabe destacar que el conductor es de tipo ACSR (código Grosbeak) cuya composición aluminio acero es 26/7.

El principio de operación de esta técnica no destructiva fue descrito en el capítulo 3, por lo que no se entrará en detalle. La implementación del método en las publicaciones, consiste en un robot que recorre la línea y mediante un sistema de adquisición de datos se guarda en una memoria los datos de tensión medidos, recordando que esta tensión corresponde a la tensión medida en la bobina sensora. Los datos obtenidos (sin procesar) a través de las mediciones experimentales para las distintas fallas se muestran en la figura 5.18.

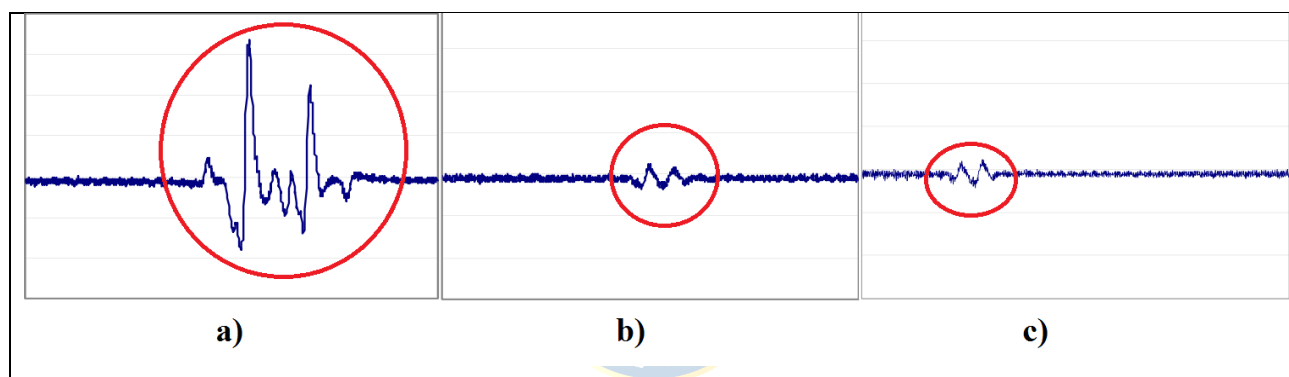


Fig. 5.18. Datos sensados con método de Inducción Electromagnética para distintas fallas.

a) Corte de 2 hebras. b) Reducción del área transversal. c) Corrosión

En las figuras se muestra que las fallas fueron detectadas exitosamente y se observan peaks en el voltaje que están relacionados a variaciones del área en el conductor. Se observa que la falla más evidente es el corte de hebras. Cabe destacar que en este método y tal como se observa en la figura 5.17, las anomalías fueron realizadas al núcleo de acero y no únicamente a las hebras de aluminio. Este método sólo funciona si el conductor tiene componentes de acero. Esto es, porque se basa en las variaciones del flujo magnético y el acero es un material de características ferromagnéticas. Generalmente, el método de inspección electromagnética utiliza un electroimán o imanes de neodimio, y el campo magnético fluye por el conductor, perpendicular al área transversal de este. Si se tuviera un conductor de aluminio, no se podrían detectar grandes variaciones en la tensión inducida si es que hubiese variaciones de área, pues el aluminio es diamagnético y su permeabilidad relativa es prácticamente 1. Aunque, en esencia pueden detectarse los mismos defectos que con la inspección en

infrarrojo (figura 5.5), el método electromagnético no es útil para otro tipo de conductores. Por lo tanto, si se realizaran las pruebas en un conductor de cobre o en un conductor AAC, no podrían obtenerse resultados concluyentes.

Otra desventaja importante en el método electromagnético, es la necesidad de un sistema autónomo que recorra las líneas de alta tensión, además de la necesidad de contacto que requiere el método. La suma de estas desventajas conlleva a una implementación dificultosa del método.

5.3.2 Comparación con Método de Fuga de Flujo Magnético

Este método es una variación del método de inspección electromagnética. La operación de este método consiste en medir el campo magnético de fuga, es decir, las líneas de campo magnético que no cruzan el conductor. En la figura 5.19 [22] se muestra una esquematización del método.

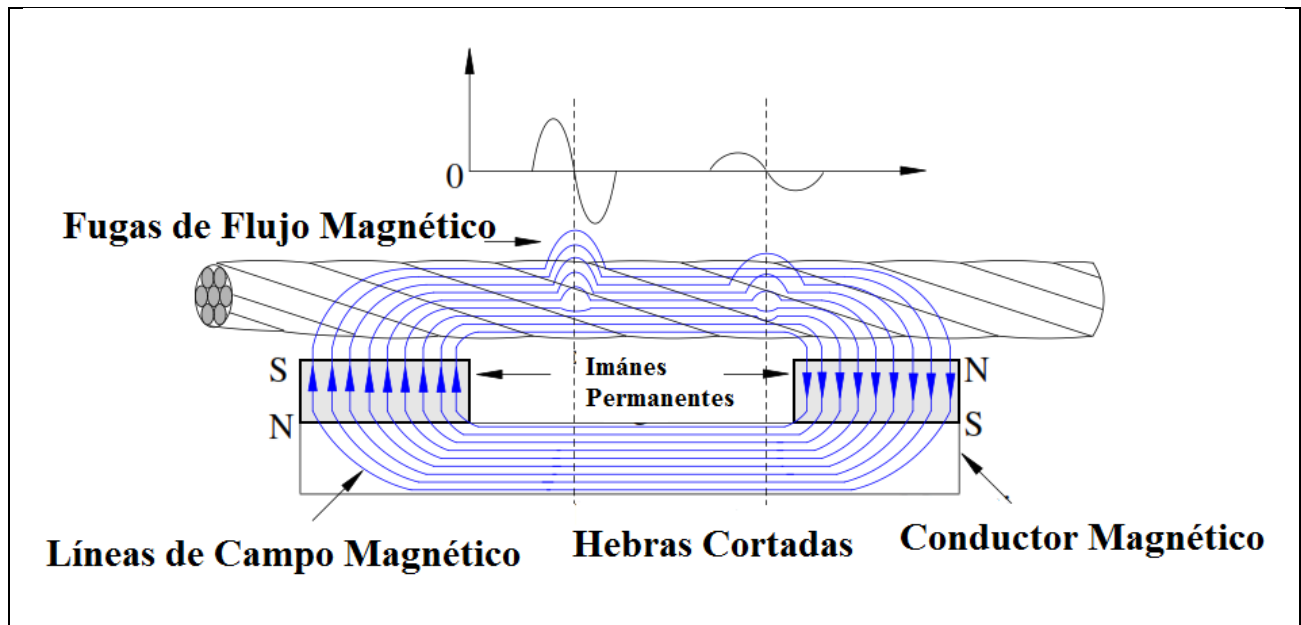


Fig. 5.19. Esquema del método de detección de flujo magnético de fuga.

El principio de operación básico de este método, es que cuando existe una discontinuidad en un conductor magnético, hay flujo de fuga y éste es el que se mide con sensores de efecto Hall. De la figura 5.19 se puede deducir que para que el método funcione, el objeto a inspeccionar debe ser un buen conductor magnético. Este método, al igual que el de la inspección electromagnética, se utiliza principalmente en la inspección de cables de acero. Por lo tanto, para aplicar este método en líneas AT, es necesario que el conductor sea ACSR, es decir, no funcionará en conductores de aluminio, o de cobre debido a que estos últimos son materiales diamagnéticos.

En lo que hay publicado [22], se estudiaron fallas en un conductor ACSR cuya composición aluminio acero es 24/7 y el diámetro del conductor es 21.6 [mm]. Respecto a las anomalías, sólo se menciona que se probó el método con cortes desde 1 hasta 7 hebras. Los resultados que se obtuvieron en la publicación se muestran en la figura 5.20. Sólo se muestra hasta el corte de 3 hebras, con el fin de poder contrastar con los resultados obtenidos mediante inspección en infrarrojo.

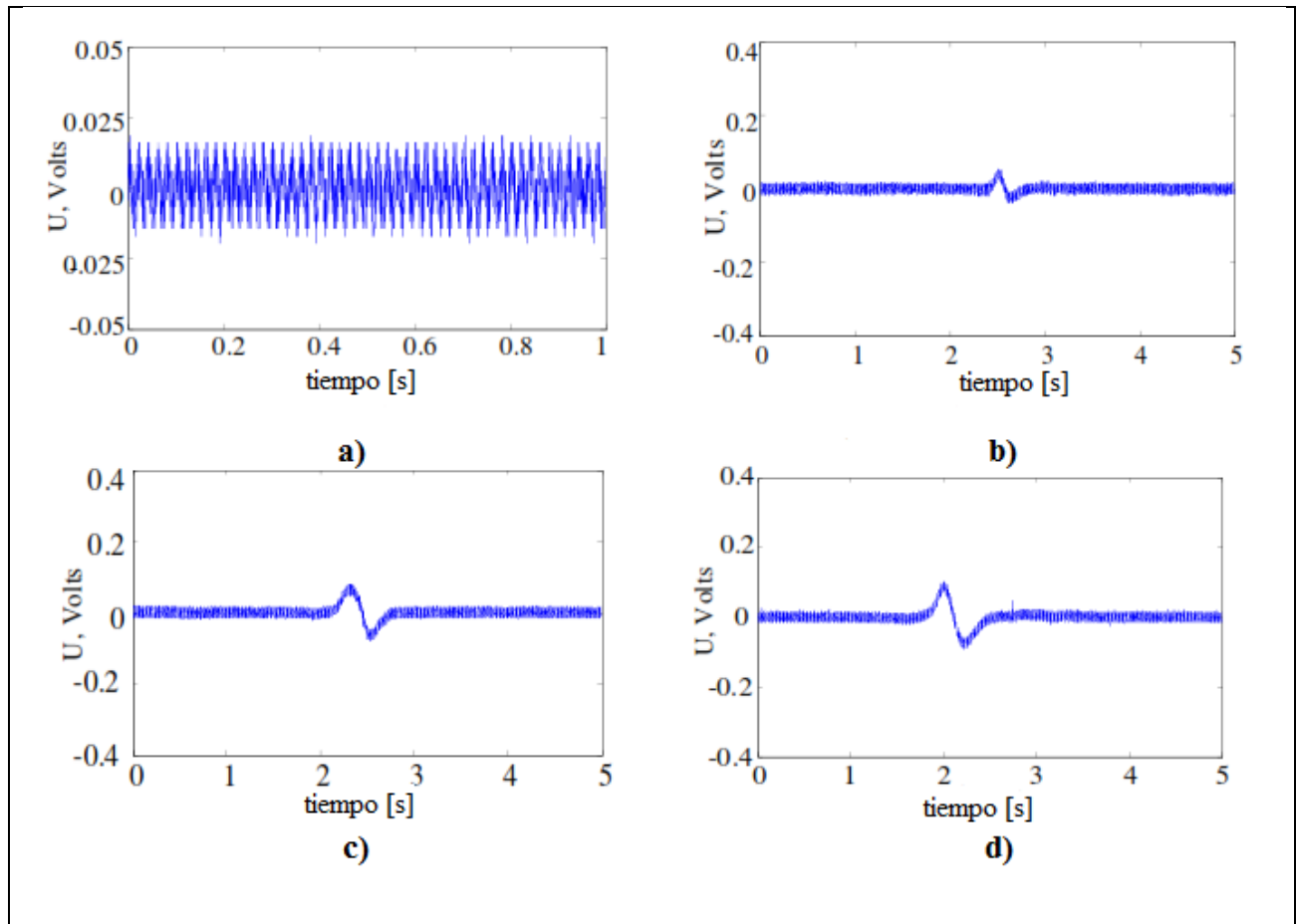


Fig. 5.20. Detección de fallas mediante el método de Fuga de Flujo Magnético.

a) Conductor sano. **b)** Corte de 1 hebra. **c)** Corte de 2 hebras. **d)** Corte de 3 hebras.

Los resultados obtenidos utilizando este método son relativamente satisfactorios pues se logró detectar las fallas y los resultados son concluyentes. Si se compara con los resultados obtenidos mediante el método desarrollado en esta memoria, son prácticamente similares. El corte de una hebra de ACSR es detectable ya sea a 100 [A] o a 200 [A], tal como se mostró en la figura 5.5. Se puede concluir que ambos métodos permiten detectar fallas relacionadas al corte de hebras. Sin embargo, el método de detección de fugas de flujo magnético sólo funciona en materiales conductores del campo magnético, es decir sólo para detectar fallas internas en conductores ACSR. Por lo tanto, si se

realizaran las mismas fallas en un conductor de aluminio y se aplicara el método deseado, no podrían detectarse las anomalías. La ventaja de la inspección en IR es que puede realizarse independiente de si el conductor es ACSR o no, por lo que pueden detectarse otro tipo de fallas, además de internas; cosa que no ocurre en el método de detección de fuga de flujo magnético.

5.3.3 Comparación con Método de Procesamiento de Vídeo

Otro método que se ha estado experimentando es el método de procesamiento de vídeo [23]. Este método consiste en realizar grabaciones en vídeo del conductor, procesar las imágenes y buscar diferencias en el contorno del cable y el brillo con respecto a un cable sano realizando un análisis estadístico, para de esta forma localizar anomalías como marcas por arco eléctrico o cortes de hebras.

Lo que se hace básicamente son 2 análisis, de brillo y de forma. Primero se reduce el área de la imagen del cable tomada para sólo considerar el contorno donde se encuentra el cable, como se muestra en la figura 5.12 [23].

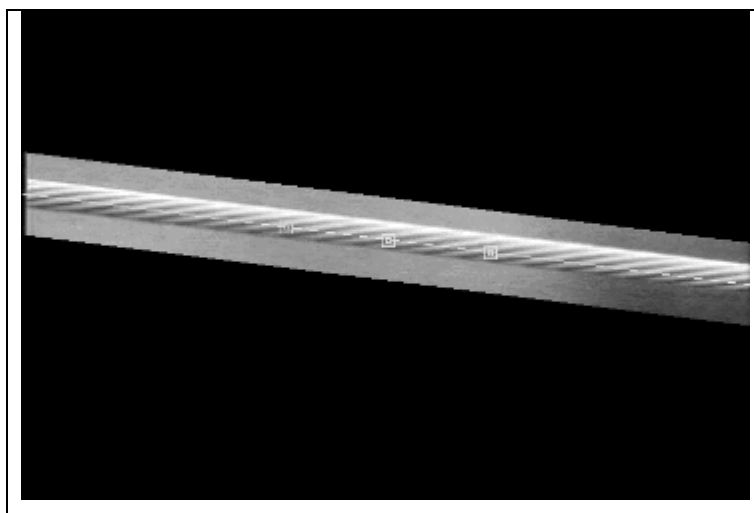


Fig. 5.21. Área disminuida de la imagen capturada del conductor.

Luego se calcula el brillo promedio del cable sin fallas y se toman límites superiores e inferiores con este promedio y la desviación estándar de los datos. Posteriormente se calcula el brillo promedio de una imagen del cable. Si existen puntos fuera de los límites calculados, significa que habrá falla. En el caso de la comparación de contorno, lo que se hace es tomar las coordenadas de píxeles que rodeen al conductor, ignorando los píxeles que están a una distancia superior a un nivel promedio. Luego, utilizando los píxeles mencionados se hace una aproximación lineal utilizando mínimos cuadrados y se obtiene el contorno ideal del conductor. Luego se compara el contorno del conductor con el ideal y si existen diferencias grandes de contorno es porque hay una deformación del

conductor y esto indica que existe una anomalía. En las figuras 22 y 23 se muestra detección de fallas mediante comparación de brillo y comparación de contorno respectivamente.

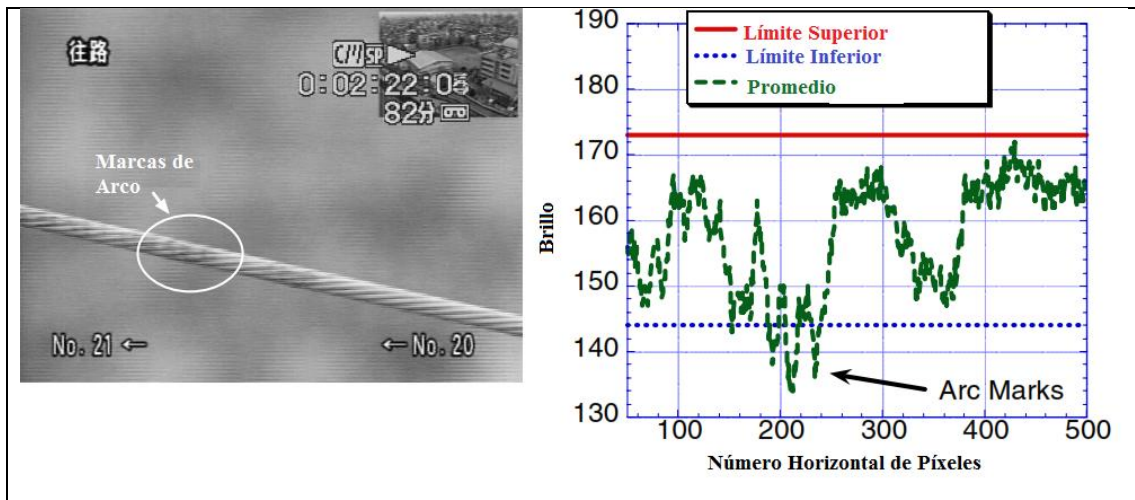


Fig. 5.22. Detección de falla mediante comparación de brillo.

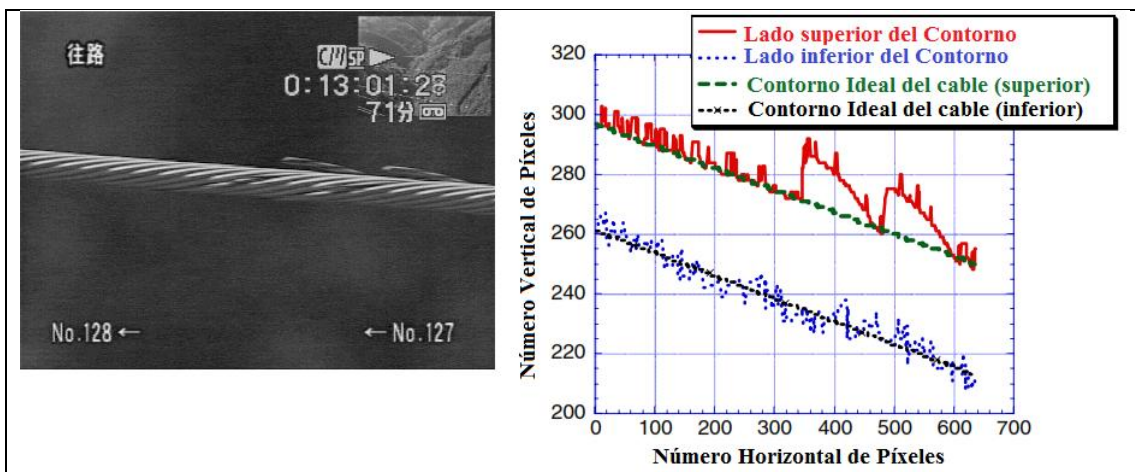


Fig. 5.23. Detección de falla mediante comparación de contorno.

Como se muestra en las figuras, en la publicación se afirma que se pudo detectar anomalías en el conductor. Sin embargo, de la naturaleza del método se puede deducir que existen posibilidades de encontrar defectos cuando realmente no existen en el conductor. Además, sólo se pueden encontrar defectos superficiales, por lo que si existiera corrosión interna u otro defecto, el método no podría encontrarlo; cosa que no ocurre con el método de inspección en infrarrojo. Una ventaja que posee el método de procesamiento de vídeo es que es independiente de la corriente que fluye por el conductor.

5.3.4 Comparación con Método de Medición con Ohmstik

Otro método utilizado en la práctica y que se ha visto en publicaciones es el método de resistencia en uniones. Como se explicó en el capítulo 3, este método consiste en medir la razón entre

la resistencia de la unión y del conductor para ver la efectividad de la conexión y continuidad eléctrica de la unión. En la figura 5.24 [20] se muestra como se realiza esta medición.



Fig. 5.24. Medición de Resistencia utilizando Ohmstik.

Básicamente este método se basa en que el deterioro de la conexión eléctrica entre dos puntos de una línea aumenta la resistencia de dicha conexión (unión entre los puntos). Generalmente, este aumento de resistencia es debido a fallas eléctricas y peaks de carga a lo largo de la vida de la conexión, pues estos producen elongación por calentamiento. También es debido a la contaminación atmosférica a la que se encuentra sometida la unión.

El método de evaluación utilizando Ohmstik se esquematiza en la figura 5.25 [24].

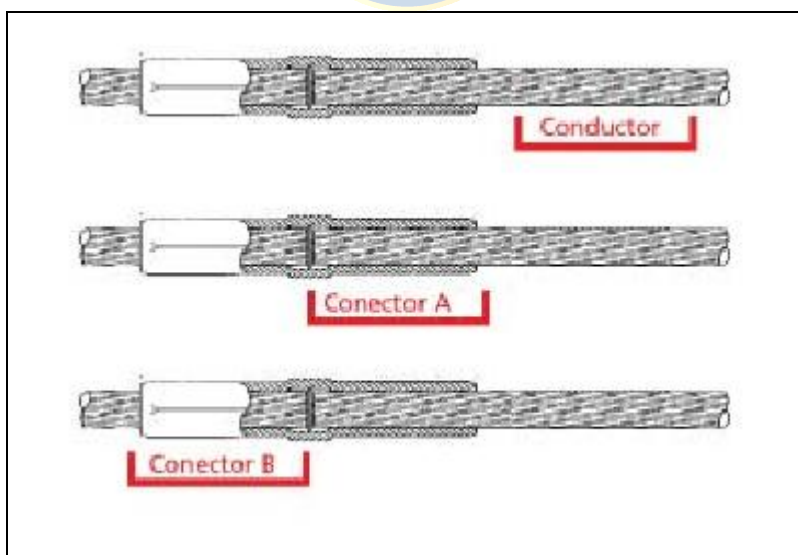


Fig. 5.25. Proceso de evaluación del estado de una unión utilizando Ohmstik.

Como se muestra en la figura 5.25, lo que se hace es medir la resistencia del conductor en un punto y luego la resistencia del conector antes de la interfase y después de ésta. Luego se realiza el

cálculo de la razón entre la resistencia del conector y la resistencia. El valor de esta razón determinará el estado de la unión.

TABLA 5.1. Estado de la unión en referencia al valor de la razón calculada.

Razón de Resistencia	Condición de la Unión	Acción a tomar
0.3 – 1.0	Condición normal de servicio.	Ninguna.
1.01 – 1.2	Operable pero no en buen estado.	Inspeccionar el próximo año o después de alguna falla.
1.21 – 1.5	Operable pero en mal estado.	Inspeccionar.
1.51 – 2.0	Operable, pero conexión muy pobre.	Programar reemplazo en menos de 3 meses.
2.01 – 3.0	Mal estado.	Programar reemplazo pronto.
> 3.0	Fallando.	Reemplazar lo más pronto posible.

Este método se utiliza en la práctica, pues como se ve existe una empresa que se dedica a la venta del equipo y además tiene un manual [24] en el cual se representan los valores medidos. La ventaja del método es que no depende de la corriente que esté circulando en el conductor. La desventaja es la necesidad de personal especializado para utilizar el equipo y que básicamente es sólo útil para medir resistencia en uniones, pues sólo se pueden medir tramos cortos de la línea por lo que inspeccionar una línea completa tomaría un tiempo prolongado. Por último, cabe destacar que la inspección termográfica también se utiliza en la inspección del estado de uniones según se revisó en [14] y [15].

5.3.5 Comparación con Método de Inducción de Corrientes de Eddy

El método de inducción de corrientes de Eddy se basa en que si se inducen estas corrientes en un conductor, el campo magnético generado por ellas se distorsionará en presencia de alguna falla lo que se reflejará en un cambio en la impedancia medida desde la fuente del campo magnético variable. Una ilustración gráfica del método se muestra en la figura 5.27.

En [24] se propone un sensor que, conectado a un generador de funciones, induce corrientes parásitas en el conductor a inspeccionar. Luego a través de un osciloscopio se toma un registro de voltajes que finalmente son procesados en MATLAB para obtener la impedancia y éstos valores de impedancia son comparados con una medición del conductor sano.

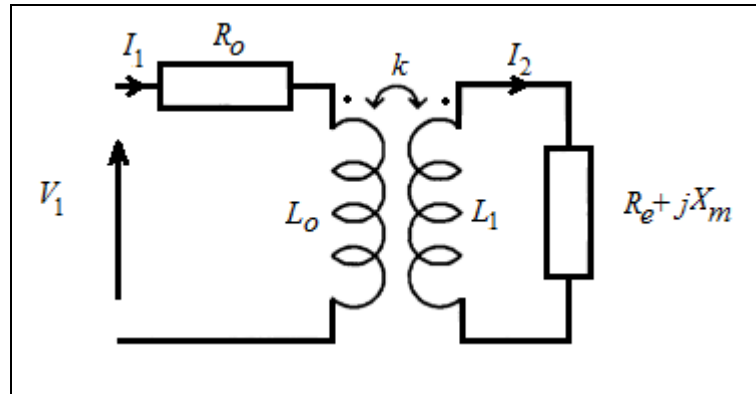


Fig. 5.26. Diagrama eléctrico que representa el método de medición.

En el diagrama de la figura 5.26, la resistencia R_e representa la resistencia del circuito que recorren las corrientes de Eddy inducidas en el conductor (R_e es proporcional a $1/\sigma$), la parte imaginaria corresponde al flujo de fuga del circuito, el coeficiente k se asocia a la distancia entre el sensor y el conductor (factor de acoplamiento), el cual decrece cuando la distancia aumenta. En caso de no haber conductor cercano al sensor, el factor de acoplamiento es igual a cero.

La ecuación que describe la impedancia vista desde el sensor es la siguiente:

$$Z_c = \frac{V_1}{I_1} = \left(R_0 + \frac{L_0 L_1 (k\omega)^2 R_e}{(R_e)^2 + (\omega L_1 + X_m)^2} \right) + j \left(\omega L_0 - \frac{L_0 L_1 (k\omega)^2 (\omega L_1 + X_m)}{(R_e)^2 + (\omega L_1 + X_m)^2} \right) \quad (5.1)$$

Se observa que las mediciones dependerán principalmente de la cercanía entre el sensor y el conductor a inspeccionar y la frecuencia utilizada para generar las corrientes de Eddy.

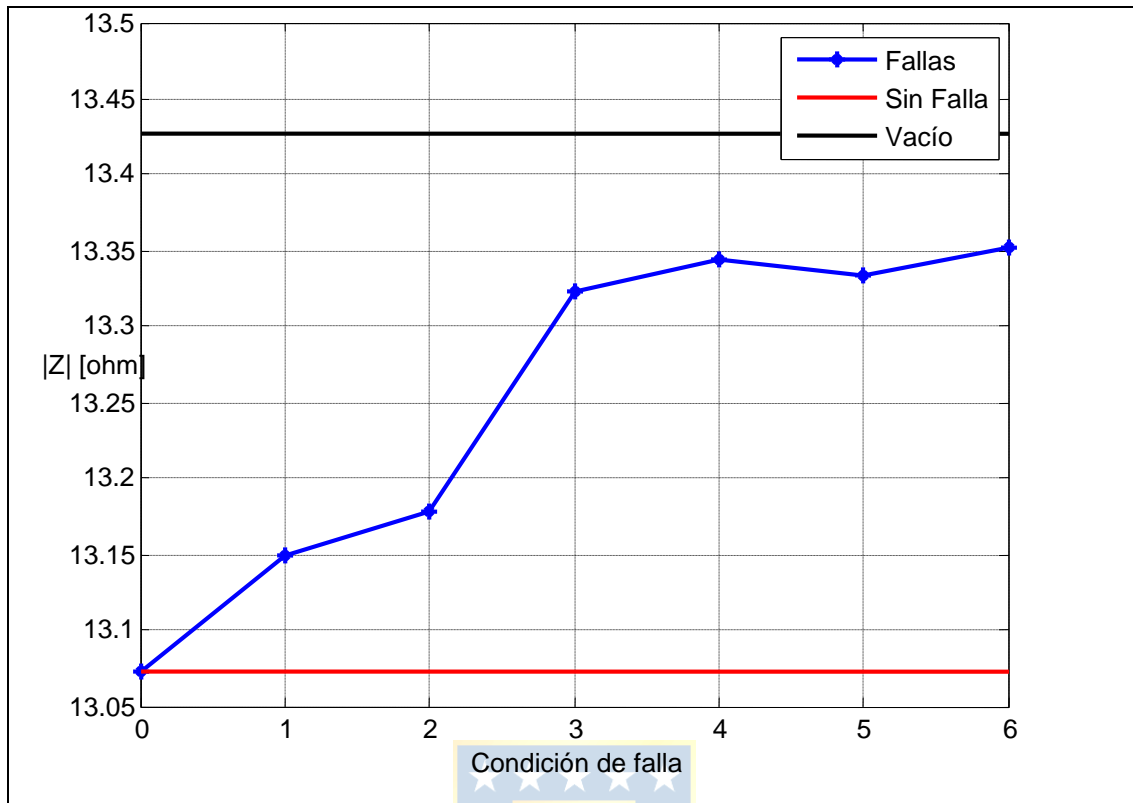


Fig. 5.27. Impedancia medida alimentando derivación de 98 vueltas a 1 [kHz] para inspección de conductor AAC.

En la figura 5.27 se observa cómo las anomalías en el conductor (que corresponden a las anomalías explicadas en el capítulo 4) afectan la medición de la impedancia del sensor. Se observa que las fallas más detectables son las más severas, como es el caso del corte de 7.5 [mm] de profundidad, o los cortes de hebras (que en la gráfica corresponden a las condiciones de falla 4, 5 y 6).

Si se compara con el método de inspección utilizando IR, se puede apreciar que las fallas menores no entregan resultados muy concluyentes pues las variaciones de impedancia son bajas, por lo cual es dependiente de la sensibilidad del instrumento de medición además de otras perturbaciones como posibles vibraciones, etc. Una ventaja que tiene el método infrarrojo es que al no depender del contacto, estos efectos pueden ser despreciados. Sin embargo, la gran ventaja del método de inspección de corrientes parásitas, es que no depende de la corriente que esté circulando por el conductor, lo que compensa lo dificultosa que es la implementación del método. Por lo tanto, estos métodos pueden ser complementarios, ya que, entregan resultados coherentes para las mismas fallas, y se pueden aprovechar las ventajas de ambos métodos.

5.4. Comparación con otras publicaciones en Inspección IR

En las publicaciones encontradas respecto al método de inspección en IR y termografía, generalmente se comentan consejos, y consideraciones a tener en cuenta para mejorar resultados al realizar la evaluación del estado de una línea AT [14] y [15]. Sin embargo, sólo se muestran resultados de cálculos realizados utilizando las ecuaciones del estándar 738 de la IEEE [16] y no se dan detalles de los tipos de fallas que se pueden detectar utilizando esta técnica, sino que sólo se concentran en encontrar puntos calientes. Además las pruebas que se realizan en laboratorio, según los datos de las publicaciones mencionadas son entre 60 [A] y 250 [A] y por lo general se consideran conductores que ya fallaron y uniones que no están en condiciones de encontrarse en servicio. En las figuras 5.28, 5.29, 5.30 y 5.31 se muestran resultados obtenidos en [14] y [15] mediante ésta técnica.

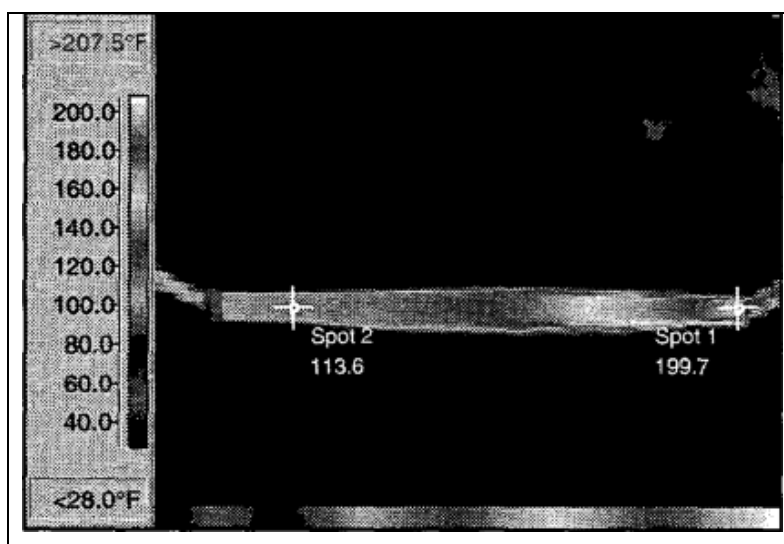


Fig. 5.28. Termografía de una unión desgastada. La corriente que fluye en los conductores es de 250 [A].

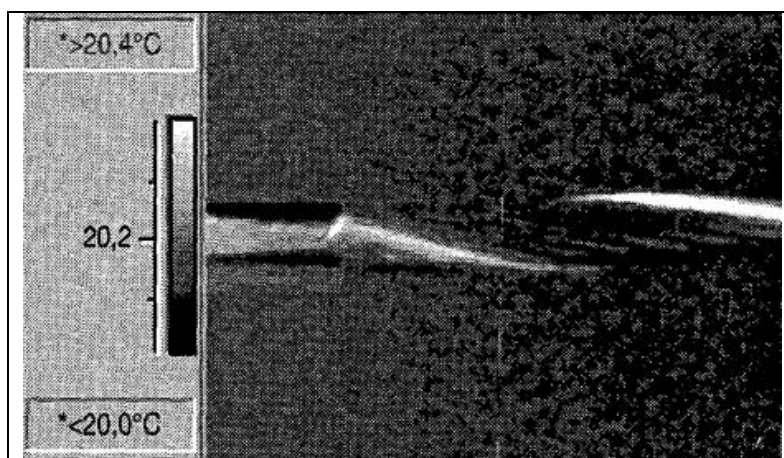


Fig. 5.29. Termografía de una unión desgastada luego de 3 minutos en test de laboratorio. La corriente para la prueba es de 60 [A].

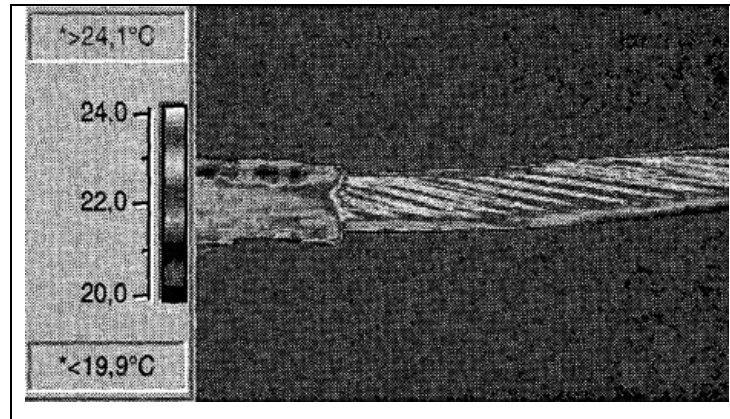


Fig. 5.30. Termografía de una unión desgastada luego de 50 minutos en test de laboratorio. La corriente para la prueba es de 60 [A].

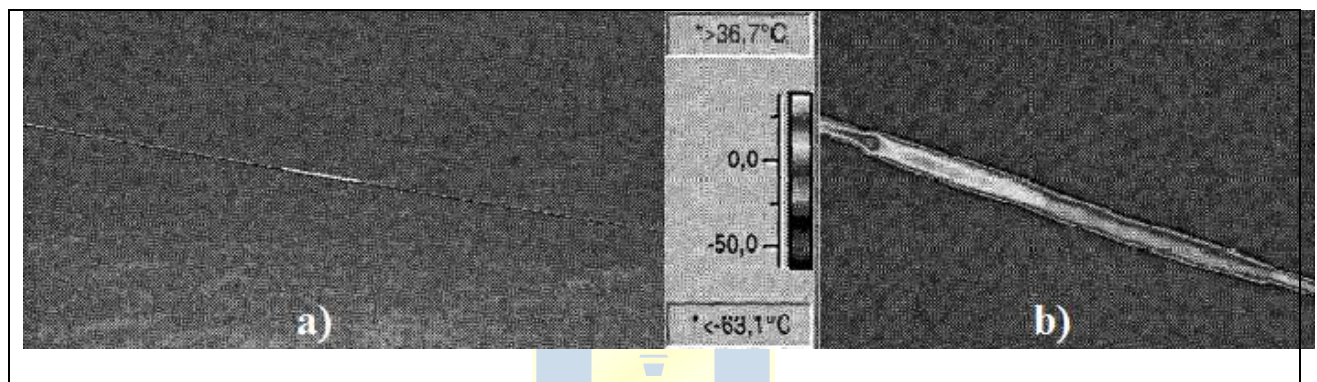


Fig. 5.31. Termografía de una unión desgastada en un día soleado con viento sobre los 2 [m/s].

a) Línea 120 kV. b) Visto desde el mismo ángulo en prueba de laboratorio.

En las figuras se muestra que las fallas son detectables en el espectro IR y que además se puede aplicar el método en terreno según la figura 5.31. Sin embargo, las pruebas realizadas son a corrientes en niveles relativamente bajos en comparación a un nivel de corriente real. Las ampacidades de los conductores aéreos por lo general son por sobre los 800 [A] según lo visto en la práctica. Otro detalle importante es que sólo se inspeccionan elementos que fallaron, es decir, que claramente se encuentran en un estado en que ya no pueden ponerse en servicio. Tampoco se analizan distintos tipos de fallas como ocurre en publicaciones relacionadas con otros métodos de inspección. Lo único que se puede contrastar es que el método sirve para detectar anomalías.

5.5. Aporte realizado en esta memoria

Como se vio en la sección anterior, los métodos vistos en las publicaciones generalmente tienen sus restricciones para su funcionamiento, por ejemplo los métodos basados en la inspección electromagnética requieren que el conductor a inspeccionar sea ACSR, ya que únicamente son efectivos si se tiene la presencia de un buen conductor magnético. En otros casos, se tiene que sólo se

pueden detectar fallas superficiales (Método de procesamiento de imágenes de vídeo). En otros casos, el método es relativamente lento, como ocurre en la inspección utilizando Ohmstik.

En relación a las publicaciones relacionadas al IR, se comenta sobre las características del espectro IR, sobre las propiedades como por ejemplo emisividad, absorptividad y las leyes físicas que rigen este dominio, y se hacen cálculos con las ecuaciones del estándar 738 para ver el efecto de factores climáticos. Sin embargo, en ninguno se ve el estudio de diferentes fallas, como por ejemplo: Cortes de hebra, abrasión mecánica, pequeños cortes profundos. Tampoco se realizan pruebas con niveles de corriente vistos en la práctica. La suma de estas limitaciones en los estudios investigados hace difícil cuantificar la efectividad del método de inspección en IR. En esta memoria se realiza este trabajo y se obtuvieron resultados concluyentes como se mostró en este capítulo. En la tabla 5.2 se muestra un cuadro resumen comparando todos los métodos.

TABLA 5.2. Cuadro comparativo de métodos de inspección de Líneas AT.

Método	Detecta Fallas de profundidad	Detecta Fallas Superficiales	Aplicable en conductores	Facilidad en Implementación
Inspección Electromagnética	✓	✗	Sólo ACSR	✗
Fuga de Flujo Magnético	✓	✗	Sólo ACSR	✗
Procesamiento de Vídeo-Imágenes	✗	✓	Todo tipo.	✓
Ohmstik	✓	✓	Todo Tipo	✗
Inducción de Corrientes de Eddy	✓	✓	Todo Tipo	✗
Inspección en IR	✓	✓	Todo Tipo	✓

Capítulo 6. Conclusiones

6.1. Sumario

Primero que todo, se realizó una investigación de los métodos de inspección actuales de líneas AT. Se investigaron las ventajas y desventajas de cada uno de ellos y la tendencia hacia el futuro de la mantención de líneas AT. Se investigaron los modelos relacionados a esta área de la ingeniería y resultados que se han obtenido en la práctica y en experimentación. También se estudió lo que es el diseño de líneas AT con el fin de entender cuáles son las causas del deterioro de las mismas y se revisaron algunos estándares en especial el estándar 738 de la IEEE que da un modelo térmico de un conductor aéreo desnudo.

Se realizó un experimento que consistió en tener diferentes conductores desnudos y emular una variedad de anomalías que son posibles que ocurran cuando se desgasta cierta sección de un conductor aéreo. Se utilizó distintos equipos para realizar mediciones y contrastar, en particular se utilizó una cámara infrarroja CEDIP que trabaja en el rango espectral de 8 - 10 [μm] y una cámara FLUKE Ti25 cuya banda espectral de operación es de 7.5 - 14 [μm]. Se alimentaron los conductores a 100, 200 [A] y en el caso del conductor AAC se alimentó a 500 y 800 [A].

Se debe tener en cuenta que el experimento se realizó en condiciones cercanas a las ideales, lo que ya es una limitante. Además no se contó con otros factores que no pueden ser emulados de forma precisa con el equipamiento disponible, ya sea condiciones climáticas, atmosféricas, etc. Otra limitación importante es que no se realizó la prueba a una distancia mayor a 1 [m] pues las cámaras no cuentan con zoom. Esto es una limitante porque la distancia al piso de las líneas AT es mucho mayor a la distancia utilizada en la experimentación (ver anexo 3).

6.2. Conclusiones

La conclusión más relevante es que es posible detectar anomalías en líneas AT. Sin embargo, la detectabilidad de las mismas está ligada a la severidad, al material del conductor, a sus propiedades físicas y en especial a la corriente que esté circulando en el conductor. También existen otros factores que afectan en menor medida al calentamiento. Entre las fallas detectables se encuentran: Fallas debidas a abrasión mecánica, fallas relacionadas con cortes de hebras y fallas de profundidad.

En conductores ACSR el método funciona mejor que en otro tipo de conductores debido al núcleo de acero que tiene menor conductividad térmica y mayor resistencia eléctrica que los otros

materiales conductores utilizados. Esto se concluyó de los resultados obtenidos con ambas cámaras infrarrojas.

El método es dependiente de la corriente que fluye por el conductor, por lo que requiere que esté conduciendo una corriente de al menos la mitad de su ampacidad nominal para poder visualizar algunas fallas. Fallas pequeñas no son detectables en ningún tipo de conductor si la corriente que fluye por los mismos es muy baja. Con aproximadamente el 60% de la corriente nominal de los conductores es posible detectar fallas. Esto se verificó con todos los conductores. Además, con el conductor de aluminio se comprobó la imposibilidad de detectar fallas si la corriente es muy pequeña en relación a la ampacidad nominal del conductor.

En conductores de baja resistividad, como por ejemplo el conductor de cobre, es difícil diagnosticar si existe anomalía en algún punto debido a las bajas pérdidas y calentamiento por efecto Joule en los mismos.

Las anomalías estudiadas emiten energía infrarroja que puede detectarse en la banda espectral de 7.5 a 14 [μm] pues ambas cámaras lograron detectar las mismas anomalías pese a la diferencia en las bandas de operación. Una ventaja que tiene la cámara FLUKE es que su rango es más amplio y además cuenta con tecnología IR-Fusión, que le permite fusionar imágenes en el espectro visible con el espectro infrarrojo, lo que facilita las mediciones en tiempo real. Debido a esta característica, la nitidez de las imágenes infrarrojas fueron mejores comparadas con la cámara CEDIP.

Puesto que ambas cámaras lograron detectar las anomalías exitosamente se puede concluir que, para efectos de detectar anomalías, no es necesario utilizar una cámara que opere en una banda espectral donde la atenuación atmosférica sea menor, por ejemplo de 3-5 [μm].

Para realizar inspecciones a mayor distancia se necesitan otro tipo de componentes, pues las cámaras disponibles para la experimentación no cuentan con la característica del zoom y las líneas AT se encuentran a una mayor distancia que las estudiadas.

6.3. Trabajo Futuro

Probar las mediciones a mayores distancias utilizando un zoom para la cámara y ver la factibilidad de realizar mediciones desde el nivel del suelo.

Realizar pruebas agregando efectos que pudiesen impedir el correcto diagnóstico del estado de un conductor, como por ejemplo la radiación de otros cuerpos, las condiciones climáticas, efecto de enfriamiento por convección en distintas secciones del conductor, etc.

Bibliografía

- [1] ENDESA, “Manual de Supervisores de Líneas de Transmisión”, 1974.
- [2] L.M Checa. “Líneas de Transporte de Energía”, 3ra Edición, 2004.
- [3] J.P. Romero. “Guía Práctica para el Diseño y Proyecto de Líneas de Transmisión de Alta Tensión en Chile”, 2010.
- [4] B. Avidar. “Electronic Airborne Inspection Method for Overhead Transmission Power-Lines”, IEEE, 1993.
- [5] D. Faucher, J. Lessard, P. Rondot, J. Côté. “Ground Operated Teleoperation System for Live Power Line Maintenance”, IEEE, 1996.
- [6] L. Hill, “Inspection & Assessment of Overhead Line Conductors”, A State-of-the-Science Report, EPRI, November 2000.
- [7] IAEA. “Training Guidelines in Non-destructive Testing Techniques: Leak Testing at Level 2”, Training Course Series, 2012.
- [8] M. Komoda, T. Kawashima, M. Minemura, A. Mineyama, M. Aihara, Y. Ebinuma, T. Kanno, M. Kiuchi, “Electromagnetic Induction Method for Detecting and Locating Flaws on Overhead Transmission Lines”, IEEE, 1990.
- [9] S. L. Branham, M. S. Wilson, S. Hurlebaus, B. M. Beadle, L. Gaul “Nondestructive Testing of Overhead Transmission Lines”, NDT, 2006.
- [10] P. Debenest, M. Guarnieri, K. Takita, E.F. Fukushima, S. Hirose, K. Tamura, A. Kimura, H. Kubokawa, N. Iwama, F. Shiga “Expliner – Robot for Inspection of Transmission Lines”, IEEE, 2008.
- [11] P. L. Moreira, E. M. Lourenco, C. R. Lourenco, M. Z. Sebrao, I. Sant’Anna, J.F. Wavrik. “Internal Corrosion in Conductor Cables of Power Transmission Lines: Characterization of the Atmosphere and Techniques for Faults Detection”, IIS, 2009.
- [12] A. Pinto, M. Z. Sebrao, C. R. Lourenco, I. Sant’Anna, “Remote Detection of Internal Corrosion in Conductor Cables of Power Transmission Lines”, IEEE, 2010-

- [13] Williamson Corporation, Infrared Basics, [http://www.deltat.com /pdf/Infrared%20Energy,%20Emissivity,%20Reflection%20%26%20Transmission.pdf](http://www.deltat.com/pdf/Infrared%20Energy,%20Emissivity,%20Reflection%20%26%20Transmission.pdf).
- [14] J. Frate, D. Gagnon, “Evaluation of Overhead Line and Joint Performance with High-Definition Thermography”, IEEE, 2000.
- [15] J. Snell, J. Renowden, “Improving Results of Thermographic inspections of Electrical Transmission and Distribution Lines”, IEEE, 2000.
- [16] IEEE Std 738-2006, “IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature of Bare Overhead Conductors.”
- [17] ECN CABLE GROUP, “Catálogo de Conductores ACSR”.
- [18] FLIR, “The Ultimate Infrared Handbook for R&D Professionals”.
- [19] CEDIP Infrared Systems, JADE-UC IR Uncooled Camera, www.cedip-infrared.com.
- [20] SensorLink, Ohmstik PLUS Live-Line micro Ohmmeter, www.sensorlink.com.
- [21] Black, W. Z. and Rehberg, R. L., “Simplified model for steady-state and real-time ampacity of overhead conductors“, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 104, Oct. 1985, pp 29-42.
- [22] Jiang X.L Xia Y.F, Hu J.L, Yin F.H, Sun C.X, and Xiang Z., “Optimal design of MFL sensor for detecting broken steel strands in overhead power line”, *Progress in Electromagnetic Research*, Vol. 121, 2011, pp 301-315.
- [23] Ishino R., Tutsumi F., “Detection System of Damages Cables Using Video Obtained from an Aerial Inspection of Transmission Lines”, IEEE.
- [24] J. Salazar, “Inspección de Líneas de Alta Tensión Mediante Inducción de Corrientes de Eddy”, Memoria de Título Universidad de Concepción, 2014.
- [25] R. Reeves, “Compensación de Ruido Espacial en Sistemas de Imágenes con Sensores Infrarrojos, Memoria de Título Universidad de Concepción, 2002.

Anexo A. Análisis Térmico en Líneas AT

A.1. IEEE Standard 738

El propósito del Standard 738 de la IEEE es presentar un método para calcular la relación entre la corriente y la temperatura de los conductores aéreos desnudos. La temperatura de un conductor es función de los siguientes términos:

- Propiedades del material
- Diámetro del conductor
- Condiciones de la superficie del conductor
- Condiciones climáticas
- Corriente eléctrica del conductor

Las ecuaciones que relacionan la corriente eléctrica con la temperatura del conductor pueden usarse para dos propósitos:

- Calcular la temperatura del conductor cuando la corriente eléctrica es conocida.
- Calcular la corriente eléctrica que produce una temperatura máxima permisible dada.

En el Standard se asume que las condiciones climáticas son constantes y que la corriente demandada es constante.

A.2. Cálculos En Estado Estacionario

Para un conductor trenzado, si la temperatura del conductor y los parámetros en estado estacionario del clima son conocidos, las pérdidas de calor por convección y radiación, la ganancia de calor solar y la resistencia del conductor pueden ser calculadas mediante fórmulas definidas que se mencionarán más adelante. La corriente del conductor correspondiente que produciría dicha temperatura bajo las mencionadas condiciones climáticas puede calcularse mediante la relación (A.1).

$$I = \sqrt{\frac{q_r + q_c - q_s}{R(T_c)}} \quad (\text{A.1})$$

- I es la corriente en el conductor.

- q_c es la tasa de pérdidas de calor por convección por unidad de longitud.
- q_r es la tasa de pérdidas de calor por radiación por unidad de longitud.
- q_s es la tasa de ganancia de calor desde el sol.
- $R(T_c)$ es la resistencia en corriente alterna del conductor a la temperatura T_c .

Este cálculo puede ser realizado para cualquier temperatura en el conductor y cualquier condición climática, aunque usualmente se considera la máxima temperatura permisible en el conductor y condiciones climáticas “conservativas”.

Ya que las tasas pérdidas por radiación y por convección no dependen linealmente de la temperatura del conductor, la ecuación de balance de calor mencionada anteriormente se resuelve mediante un proceso iterativo, esto es, dada una corriente en el conductor:

- a) Una temperatura en el conductor es asumida
- b) Se calcula la transferencia de calor para cada efecto en el conductor.
- c) Se obtiene la corriente del conductor dada la temperatura.
- d) La corriente calculada es comparada con la corriente dada al inicio
- e) La temperatura del conductor es luego aumentada o disminuida hasta que la corriente calculada igual a la corriente dada



A.3. Cálculos Transientes

La temperatura de un conductor aéreo cambia constantemente en respuesta a cambios en la corriente eléctrica y cambios climáticos. El Standard asume que las condiciones climáticas se mantienen constantes y que cualquier cambio de corriente es limitado a un cambio en escalón, desde una corriente inicial I_i a una corriente final I_f , figura A.1.

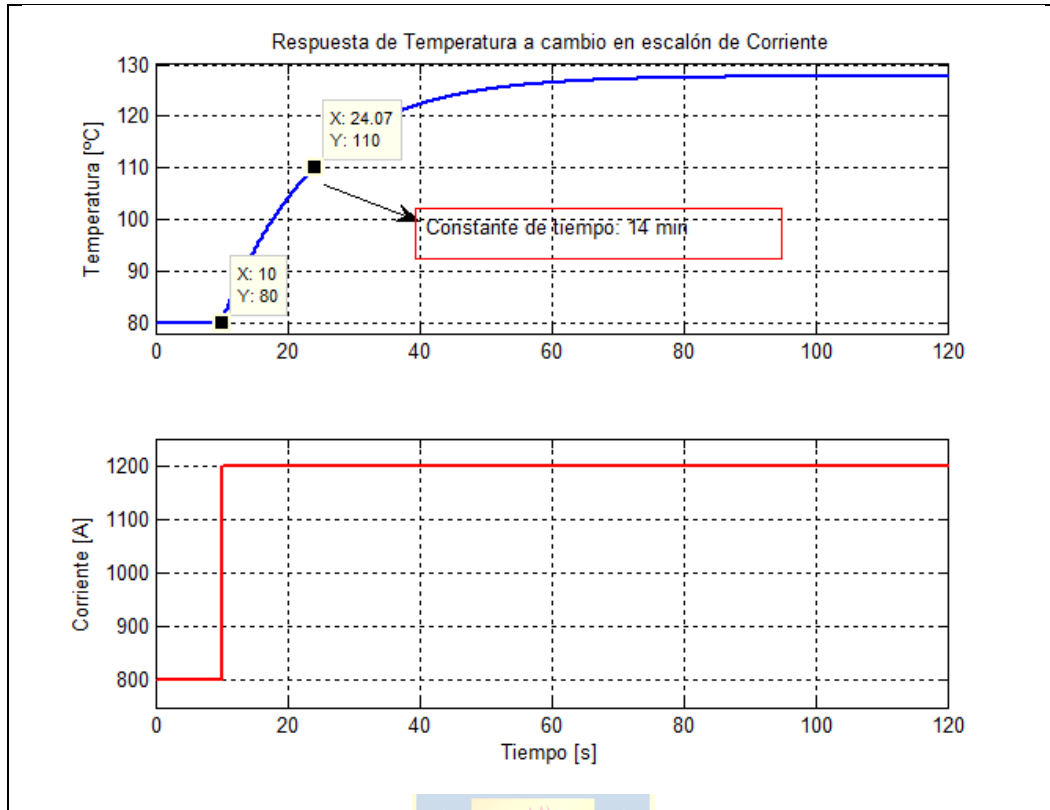


Fig. A.1 Cambio en escalón de la corriente y respuesta en la temperatura.

A.4. Análisis Térmico y Estudio de Ampacidad

Según el estudio de la termodinámica, el calor es la transferencia de energía que resulta de las interacciones entre un sistema y su entorno debido a una diferencia de temperatura. La termodinámica estudia los sistemas en equilibrio tal que puede predecir la cantidad de energía requerida para que un sistema dado cambie de un estado de equilibrio a otro. También ésta ciencia proporciona información en relación a la naturaleza de las interacciones entre un sistema y su entorno, y la velocidad en que se producen dichas interacciones.

A.4.1 Mecanismos de Transferencia de Calor

El calor se puede transmitir de tres formas diferentes. Éstas son por convección, conducción y radiación. El estudio de estas formas de transferencias se puede simplificar si se considera que ocurren aisladamente, sin embargo, en la realidad estos 3 fenómenos ocurren simultáneamente.

A.4.2 Conducción

Este mecanismo de transferencia de energía calorífica está basado en el contacto directo de sus partículas sin flujo neto de materia y tiende a igualar la temperatura dentro de un cuerpo o entre diferentes cuerpos en contacto por medio de transferencia de energía cinética entre las partículas.

El principal parámetro dependiente del material que regula la conducción de calor entre los materiales es la conductividad térmica, una propiedad física que mide la capacidad de conducción de calor o capacidad de una sustancia de transferir el movimiento cinético de sus moléculas a sus propias moléculas adyacentes o a otras sustancias con las que está en contacto.

La conducción térmica está determinada por la ley de Fourier. Ésta ley establece que la tasa de transferencia de calor por conducción en una dirección dada es proporcional al área normal a la dirección del flujo de calor y al gradiente de temperatura en esa dirección. En general para el caso de estudio interesa:

$$q_{cond} = -k\Delta T \quad (A.2)$$

- q_{cond} , representa la cantidad de calor transferida por unidad de longitud expresada en W/m .
- ΔT , es el gradiente de temperatura y su unidad de medida es Kelvin.
- k , es la conductividad térmica expresada en W/mK .

La conductividad térmica es una propiedad propia de los materiales. El signo menos de la ecuación expresa que el calor se transfiere en la dirección en que la temperatura decrece.

Finalmente para el caso de estudio la tasa de pérdidas por conducción se calcula según el estándar 738 de la IEEE mediante la siguiente ecuación:

$$q_{cond} = I^2 R(T_c) \quad (A.3)$$

La resistencia $R(T_c)$ se puede obtener a partir de las propiedades del conductor y conocidos 2 valores de la resistencia a distintas temperaturas, $R(T_{high})$ y $R(T_{low})$, se puede utilizar la relación lineal de la ecuación (A.4).

$$R(T_c) = \left[\frac{R(T_{high}) - R(T_{low})}{T_{high} - T_{low}} \right] (T_c - T_{low}) + R(T_{low}) \quad (A.4)$$

A.4.3 Convección

El calor transmitido por convección es una combinación de radiación y conducción térmicas, y el transporte o desplazamiento de un fluido (sea líquido o gas). El fluido convectivo es calentado

por radiación y conducción a partir de un cuerpo caliente; luego el fluido, o parte de él, se mueve con la energía almacenada hacia un cuerpo o espacio más frío, al que calienta por radiación o conducción. La convección libre o natural se produce cuando el fluido sólo circula debido a diferencias de temperatura, las que dan por resultado una diferencia de densidad, y así las partes más densas de un fluido se desplazan hacia abajo, debido a la gravedad. Cuando se realiza un trabajo para bombear o impulsar el fluido, se dice que éste se somete a una convección forzada.

En el conductor, las pérdidas de calor por convección representan el flujo de calor desde la superficie del conductor hacia el aire y sus alrededores, lo cual produce una disminución de la temperatura en el conductor, es decir, representa una pérdida de calor en la superficie del conductor.

Como se mencionó anteriormente la convección puede ser natural o forzada. El estándar 738 especifica que si la velocidad del viento es cero, ocurre convección natural, y dispone la siguiente ecuación para determinar las pérdidas de calor:

$$q_{cn} = 0.0205 \rho_f^{0.5} D^{0.75} (T_c - T_a)^{1.25} \quad (A.5)$$

- q_{cn} , es la tasa de pérdidas de calor por convección natural medida en W/m .
- ρ_f , es la densidad del aire medida en kg/m^3 .
- D , es el diámetro del conductor en mm .
- T_c , es la temperatura del conductor medida en $^{\circ}C$.
- T_a , es la temperatura ambiente del aire $^{\circ}C$.

Cuando la velocidad del viento no es despreciable entonces ocurre convección forzada, el estándar propone 2 relaciones para determinar estas pérdidas.

$$q_{c1} = \left[1.01 + 0.0372 \left(\frac{D \rho_f V_w}{\mu_f} \right)^{0.52} \right] k_f K_{angle} (T_c - T_a) \quad (A.6)$$

$$q_{c2} = 0.0119 \left(\frac{D \rho_f V_w}{\mu_f} \right)^{0.6} k_f K_{angle} (T_c - T_a) \quad (A.7)$$

$$T_{film} = \frac{T_a + T_c}{2} \quad (A.8)$$

$$K_{angle} = 1.194 - \cos(\phi) + 0.194 \cos(2\phi) + 0.368 \sin(2\phi) \quad (A.9)$$

- V_w , es la velocidad del flujo del aire hacia el conductor (velocidad del viento), medida en m/s .
- μ_f , es la viscosidad dinámica del aire medida en $Pa \cdot s$.

- k_f , es la conductividad térmica del aire a la temperatura T_{film} , medida en $W/(m \cdot ^\circ C)$.
- T_{film} , es la temperatura promedio entre el aire y el conductor, medida en $^\circ C$.
- K_{angle} , es un factor de corrección para la dirección del viento, es una magnitud adimensional.

En la figura A.2 se muestra esquemáticamente en qué consiste la convección forzada.

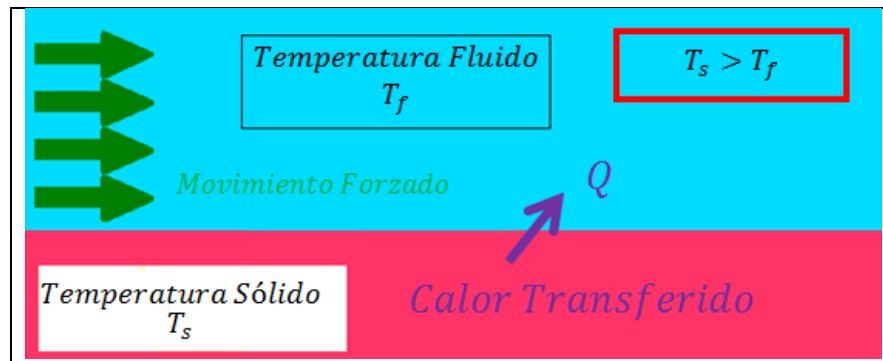


Fig. A.2 Transferencia de calor por convección.

A.4.4 Radiación Térmica

En la radiación térmica el calor se transmite mediante ondas electromagnéticas. La energía de esta radiación depende de la temperatura y las características de la superficie del cuerpo emisor. Al momento en que incide sobre un receptor, parte de la energía se transfiere a dicho cuerpo, dependiendo de las características del mismo y de su poder de absorción. Dicha transferencia de energía se traduce en un aumento de temperatura del cuerpo receptor. Éste mecanismo de transferencia de calor involucra únicamente el transporte de energía, es decir, no necesita soporte de un material pudiéndose incluso efectuar en vacío.

La radiación que emite un cuerpo y que se origina a partir de la energía térmica de la materia limitada por la superficie y la tasa a la cual se libera dicha energía por unidad de área (W/m^2) se denomina la potencia emisiva superficial. La ley de Stefan-Boltzmann establece que la potencia emisiva está dada por:

$$E = \sigma T^4 \quad (A.10)$$

- E , es la potencia emitida expresada en $[W/m^2]$.
- T , es la temperatura del cuerpo emisor expresada en kelvin [K]
- σ , es la constante de Stefan-Boltzmann, $5.670400 [W/(m^2K^4)]$

La energía en forma de calor que abandona una superficie depende de la temperatura absoluta a la que se encuentra y de la naturaleza de la superficie. Dicho calor está dado por la ecuación:

$$q = \sigma AT^4 \quad (\text{A.11})$$

- q , es el flujo de calor por unidad de área [W/m^2].
- T , es la temperatura en Kelvin [K].
- σ , es la constante de Stefan-Boltzmann, $5.670400 \text{ [W}/(\text{m}^2\text{K}^4)]$.
- A , es el área del cuerpo emisor.

Aunque la emisión es independiente de las condiciones del entorno, la transferencia total de energía requiere que haya un gradiente de temperatura superficial de dos o más cuerpos entre los cuales se lleva a cabo el intercambio. Si se tiene que un cuerpo negro (Es decir un cuerpo teórico el cual absorbe toda la luz y toda la energía radiante que incide sobre él) a una temperatura dada irradia calor hacia el entorno que lo rodea completamente y dicho entorno también se considera con características de un cuerpo negro y que se encuentra a una temperatura distinta a la del cuerpo anterior, la transferencia de calor está dada por la siguiente ecuación:

$$q = \sigma A(T_1^4 - T_2^4) \quad (\text{A.12})$$

- q , es el calor transmitido por unidad de área [W/m^2].
- T_1 , es la temperatura del cuerpo emisor, en Kelvin [K].
- T_2 , es la temperatura del entorno que rodea al cuerpo emisor, en Kelvin [K].
- σ , es la constante de Stefan-Boltzmann, $5.670400 \text{ [W}/(\text{m}^2\text{K}^4)]$.
- A , es el área del cuerpo emisor en [m^2].

Los cuerpos reales no poseen las características de un cuerpo negro, es decir emiten radiación a una tasa menor. Estos cuerpos no ideales se conocen con el nombre de cuerpos grises y emiten una cantidad de calor la cual es una fracción de la cantidad de calor que emitiría un cuerpo ideal. La ecuación que representa el calor emitido por estos cuerpos es la siguiente:

$$q = \varepsilon \sigma AT^4 \quad (\text{A.13})$$

- q , es el flujo de calor por unidad de área [W/m^2]
- T , es la temperatura en Kelvin [K].
- σ , es la constante de Stefan-Boltzmann, $5.670400 \text{ [W}/(\text{m}^2\text{K}^4)]$
- A , es el área del cuerpo emisor.
- ε , es la emisividad, la cual es adimensional.

El valor de ε está acotado tal que $0 \leq \varepsilon \leq 1$, y proporciona una medida de la eficiencia con la

que una superficie emite energía. Es una fracción de la energía que se emitiría si el cuerpo fuese ideal (cuerpo negro).

Según Standard 738 de la IEEE, la tasa de pérdidas de calor por radiación se calcula mediante:

$$q_r = 0.0178D\varepsilon \left[\left(\frac{T_c + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a + 273}{100} \right)^4 \right] \quad (\text{A.14})$$

- q_r , es la tasa de pérdidas de calor por radiación en [W/m].
- ε , es la emisividad que está acotada entre 0.23 y 0.91 y es adimensional.
- D , es el diámetro del conductor en [mm].
- T_c , es la temperatura del conductor en °C.
- T_a , es la temperatura ambiente en °C.

A.4.5 Ganancia Solar

El efecto del calor transferido desde el sol, es decir la radiación solar es considerada mediante la ganancia solar. La cantidad de energía que puede absorber el conductor está determinada por las características de su superficie. El efecto de la radiación solar es provocar un aumento de la temperatura en el conductor, por lo tanto tendrá un efecto en el equilibrio térmico del mismo.

El Standard 738 IEEE provee la siguiente ecuación para determinar la ganancia solar:

$$q_s = \alpha Q_{se} \sin(\theta) A' \quad (\text{A.15})$$

- q_s , es la tasa de flujo de calor medida en [W/m].
- A' , es el área proyectada del conductor por unidad de longitud medida en [m²/m].
- Q_{se} , es el flujo total corregido de calor por radiación solar, medido en [W/m²].
- θ , es el ángulo efectivo de incidencia de los rayos solares, medido en grados.
- α , es la absorptividad solar, varía entre 0.23 a 0.91 y es adimensional.

Para determinar el ángulo θ se tiene la siguiente relación:

$$\theta = \arccos(\cos(H_c) \cos(Z_c - Z_l)) \quad (\text{A.16})$$

- H_c , es la altitud del sol, medida en grados.
- Z_c , es la azimutal del sol, medida en grados.
- Z_l , es la azimutal de la línea, medida en grados.

En la figura A.3 se muestra de forma esquemática lo que representan dichos ángulos:

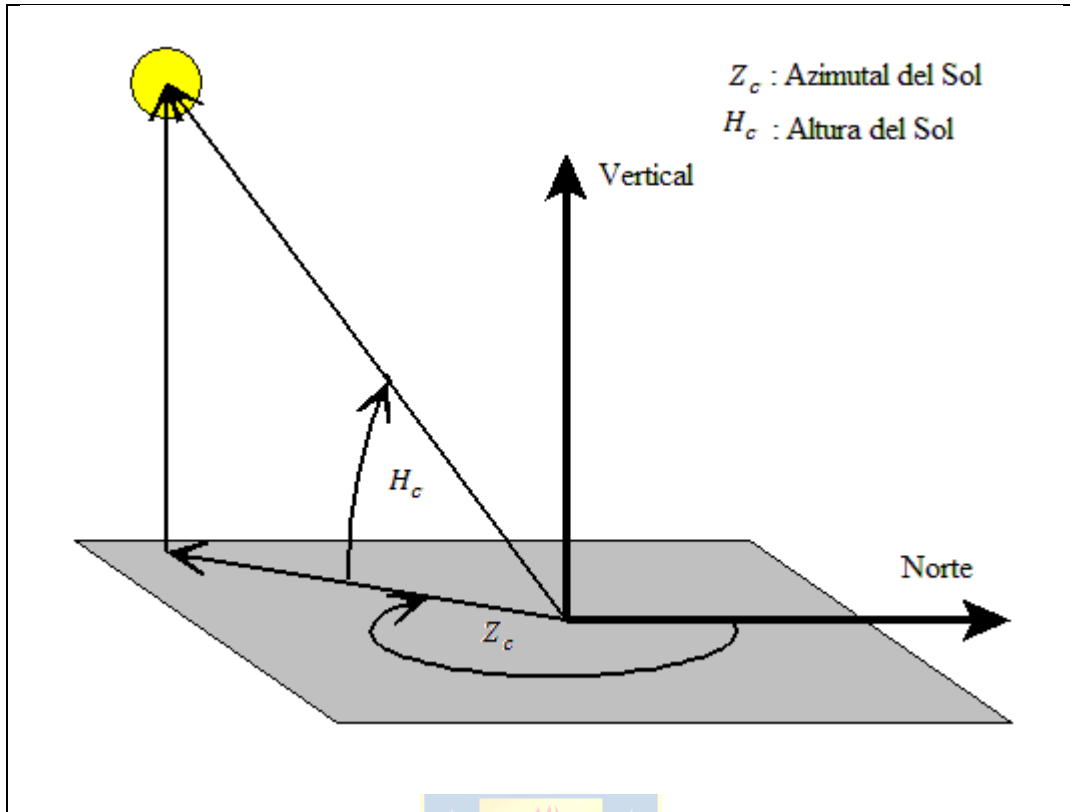


Fig. A.3 Ángulos en la ganancia de calor solar.

La altitud del sol se determina mediante la siguiente ecuación:

$$H_c = \arcsin(\cos(Lat) \cos(\delta) \cos(\omega) + \sin(Lat) \sin(\delta)) \quad (A.17)$$

- δ , es la declinación solar, la cual va entre 0 y 90 grados.
- *Lat.* Grados de latitud.
- ω , es el ángulo horario el cual corresponde la cantidad de horas desde el mediodía multiplicada por 15° , se mide en grados.

La declinación solar se calcula mediante la ecuación, destacando que el argumento del seno debe estar en grados. La ecuación es válida para cualquier latitud independiente de que sea el hemisferio norte o el hemisferio sur:

$$\delta = 23.4583 \sin\left(\frac{284 + N}{365} 360\right) \quad (A.18)$$

Donde N , es el día del año (por ejemplo para el 12 de enero, $N = 12$, para 14 de febrero, $N = 43$, etc.).

En la figura A.4 se muestra esquemáticamente a qué corresponde la declinación solar.

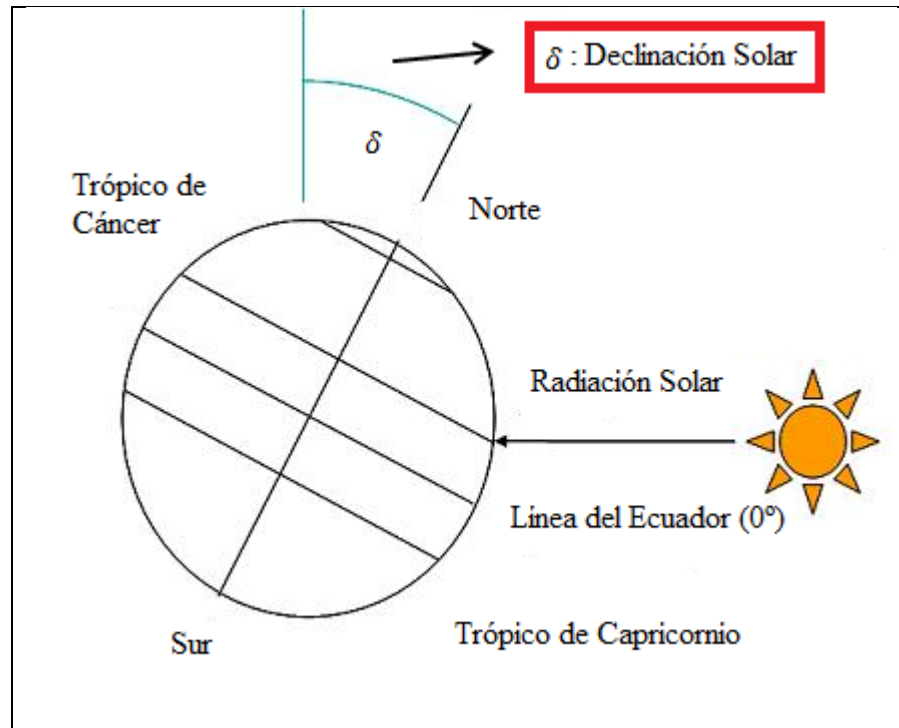


Fig. A.4 Declinación Solar.

La azimutal del sol, Z_c , se determina de la siguiente forma:

$$Z_c = C + \arctan(\chi) \quad (\text{A.19})$$

$$\chi = \frac{\sin(\omega)}{\sin(Lat) \cos(\omega) - \cos(Lat) \tan(\delta)} \quad (\text{A.20})$$

- χ , es la variable de la azimutal del sol y es adimensional.
- C, es la constante de la azimutal del sol, se mide en grados.

La constante C es una función del ángulo ω y de la variable azimutal del sol χ , y sus valores se muestran en la tabla A.1.

TABLA A.1 Constante azimutal del sol en función de χ y del ángulo ω .

ω [°]	C, si $\chi \geq 0$ [°]	C, si $\chi \leq 0$ [°]
$-180 \leq \omega < 0$	0	180
$0 \leq \omega < 180$	180	360

Para determinar el flujo de calor debido a la radiación solar se tiene la siguiente ecuación:

$$Q_s = A + BH_c + CH_c^2 + DH_c^3 + EH_c^4 + FH_c^5 + GH_c^6 \quad (\text{A.21})$$

Donde los coeficientes dependen del tipo de atmósfera en la cual se esté trabajando. El estándar define 2 tipos de atmósfera, la atmósfera limpia y la atmósfera industrial. Los coeficientes se encuentran tabulados y se muestran al final de este anexo.

Finalmente el valor obtenido debe corregirse mediante un factor de corrección según las

siguientes ecuaciones:

$$Q_{se} = K_{solar} Q_s \quad (A.22)$$

$$K_{solar} = A + BH_e + CH_e^2 \quad (A.23)$$

$$A = 1, B = 1.148 \cdot 10^{-4}, C = -1.108 \cdot 10^{-8} \quad (A.24)$$

- K_{solar} , es el factor de corrección del flujo de calor por radiación solar, cuyo valor es adimensional.
- H_e , es la altura sobre el nivel del mar, medida en metros [m].

Los valores de la constante solar están tabulados y se muestran en la tabla A.3.

A.4.6 Equilibrio Térmico

En estado estacionario, es decir en operación normal de la línea, se tiene el equilibrio térmico. En la figura A.5 se muestra un esquema del calor que gana y pierde el conductor debido a los factores ya mencionados.

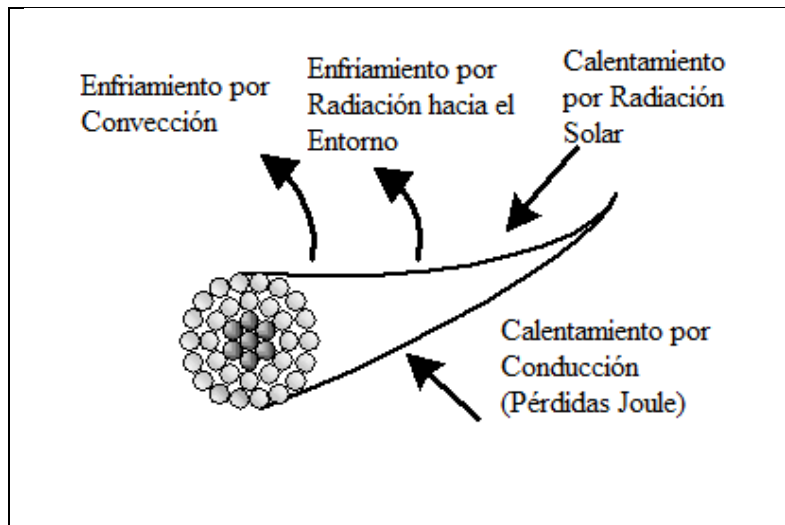


Fig. A.5 Balance Térmico en el conductor Aéreo.

Estableciendo un equilibrio térmico se tiene:

$$q_{cond} + q_s - q_r - q_c = 0 \quad (A.25)$$

$$\Rightarrow q_{cond} + q_s - q_r - q_c = 0 \quad (A.26)$$

$$\Rightarrow q_{cond} = q_r + q_c - q_s \quad (A.27)$$

$$\Rightarrow I = \sqrt{\frac{q_r + q_c - q_s}{R(T_c)}} \quad (A.28)$$

A.5. Ejemplo de Cálculo de Ampacidad

Encontrar la ampacidad para un conductor “Drake” 26/7 ACSR bajo las siguientes condiciones:

- La velocidad del viento (V_w) es 0.61 m/s y perpendicular al conductor.
- La emisividad (ϵ) es 0.5.
- La absorptividad solar (α) es 0.5.
- La temperatura ambiente es 30°C.
- La temperatura máxima permitida por el conductor es 80°C.
- El diámetro del conductor (D) es 28.1 mm.
- La resistencia en AC del conductor es:
 - $R(25^\circ\text{C}) = 7.283 \cdot 10^{-5} (\Omega/\text{m})$
 - $R(75^\circ\text{C}) = 8.688 \cdot 10^{-5} (\Omega/\text{m})$
- La azimutal de la línea es $Z_1 = 90^\circ$.
- La latitud es 30° del norte.
- La atmósfera es limpia.
- La altitud solar (H_c) es para las 11:00 am un 10 de Junio.
- La elevación promedio del conductor es de 10 m.

Las pérdidas por convección natural se calculan mediante:

$$q_{cn} = 0.0205 \rho_f^{0.5} D^{0.75} (T_c - T_a)^{1.25}$$

$$T_{film} = \frac{80 + 35}{2} = 55^\circ\text{C}$$

Se obtiene por datos de tabla que la densidad del aire $\rho_f = 1.076 \text{ kg/m}^3$.

$$q_{cn} = 0.0205 (1.076)^{0.5} (28.1)^{0.75} (80 - 30)^{1.25} = 34.51 \text{ W/m}$$

Puesto que la velocidad del viento es mayor que cero, las pérdidas de calor por convección forzada para el viento que fluye perpendicularmente es calculada mediante las siguientes ecuaciones, corregidas para la dirección del viento y comparadas con las pérdidas por convección natural. La mayor de las pérdidas de calor debido a ambas, es decir, pérdidas naturales y pérdidas forzadas es usada para calcular la ampacidad.

$$q_{c1} = \left[1.01 + 0.0372 \left(\frac{D \rho_f V_w}{\mu_f} \right)^{0.52} \right] k_f K_{angle} (T_c - T_a)$$

$$q_{c2} = 0.0119 \left(\frac{D \rho_f V_w}{\mu_f} \right)^{0.6} k_f K_{angle} (T_c - T_a)$$

$$K_{angle} = 1.194 - \cos(\phi) + 0.194 \cos(2\phi) + 0.368 \sin(2\phi)$$

De la tabla se tiene que la viscosidad dinámica del aire es $\mu_f = 1.98 \cdot 10^{-5} Pa/s$.

$$K_{angle} = 1.194 - \cos(90) + 0.194 \cos(180) + 0.368 \sin(180) = 1$$

La conductividad térmica del aire por dato de tabla es $k_f = 0.0283 W/m^\circ C$. Luego:

$$q_{c1} = \left[1.01 + 0.0372 \left(\frac{28.1 \cdot 1.076 \cdot 0.61}{1.98 \cdot 10^{-5}} \right)^{0.52} \right] \cdot 0.0283(80 - 30) = 68.31 W/m$$

$$q_{c2} = 0.0119 \left(\frac{28.1 \cdot 1.076 \cdot 0.61}{1.98 \cdot 10^{-5}} \right)^{0.6} \cdot 0.0283(80 - 35) = 64.24 W/m$$

Finalmente se toma el valor mayor, por lo que las pérdidas de calor por convección corresponden a:

$$q_c = 68.31 W/m$$

Las pérdidas de calor por radiación se calculan mediante:

$$q_r = 0.0178 D \dot{\epsilon} \left[\left(\frac{T_c + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a + 273}{100} \right)^4 \right]$$

Reemplazando por los valores del problema:

$$q_r = 0.0178 \cdot 28.1 \cdot 0.5 \left[\left(\frac{80 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{30 + 273}{100} \right)^4 \right] = 17.75 W/m$$

La ganancia de calor solar puede ser calculada mediante la siguiente relación:

$$q_s = \alpha Q_{se} \sin(\theta) A'$$

$$\theta = \arccos(\cos(H_c) \cos(Z_c - Z_1))$$

Luego con los datos del problema y realizando una interpolación lineal con los datos de la tabla 13 y la tabla 15:

$$H_c \text{ a las 10:00 am} = 62^\circ$$

$$H_c \text{ a las 12:00 mediodía} = 83^\circ$$

$$H_c \text{ a las 11:00 am} = 72.5^\circ$$

$$Z_c \text{ a las 10:00 am} = 98^\circ$$

$$Z_c \text{ a las 12:00 mediodía} = 180^\circ$$

$$Z_c \text{ a las 11:00 am} = 139^\circ$$

De la tabla 15 se tiene que para el valor de H_c obtenido:

$$Q_s = A + BH_c + CH_c^2 + DH_c^3 + EH_c^4 + FH_c^5 + GH_c^6$$

Para atmósfera limpia:

$$Q_s = 1023 W/m^2$$

$$Q_{se} = K_{solar} Q_s$$

$$K_{solar} = 1$$

$$A' = \frac{D}{1000} = 0.02814 m^2/m$$

$$\theta = \arccos(\cos(72.5) \cos(139 - 90)) = 78.62^\circ$$

Finalmente:

$$q_s = 0.5 \cdot 1023 \cdot \sin(78.62) \cdot 0.02814 = 14.1 \text{ W/m}$$

La resistencia para 80 °C se puede obtener mediante:

$$R(T_c) = \left[\frac{R(T_{high}) - R(T_{low})}{T_h - T_{low}} \right] (T_c - T_{low}) + R(T_{low})$$

Reemplazando datos:

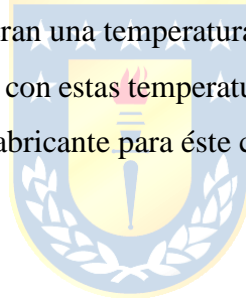
$$R(80^\circ\text{C}) = \left[\frac{8.688 \cdot 10^{-5} - 7.283 \cdot 10^{-5}}{75 - 25} \right] \cdot (80 - 25) + 7.283 \cdot 10^{-5}$$

$$R(80^\circ\text{C}) = 8.828 \cdot 10^{-5} \Omega/\text{m}$$

Finalmente la ampacidad:

$$I = \sqrt{\left(\frac{q_c + q_r - q_s}{R(T_c)} \right)} = \sqrt{\left(\frac{68.31 + 17.75 - 14.1}{8.828 \cdot 10^{-5}} \right)} = 903 \text{ A}$$

A modo de observación, los fabricantes toman las mismas consideraciones en relación a la emisividad, y absorptividad, al igual que para la azimutal y la posición del sol respecto a la línea. Para las temperaturas, los fabricantes consideran una temperatura ambiente de 25°C y una temperatura del conductor de 75°C, si se repite el cálculo con estas temperaturas se obtiene una ampacidad de 907 [A], la cual corresponde a la que entrega el fabricante para éste conductor en sus catálogos.



A.6. Tablas de Datos del Standard 738

TABLA A.1 Variables involucradas en el cálculo de la tasa de pérdidas por convección.

Temperatura T_{film}	Viscosidad Dinámica μ_f	Densidad del Aire ρ_f (kg/m^3)				Conductividad Térmica del Aire k_f
		0 m	1000 m	2000 m	4000 m	
°C	Pa·s					W/(m·°C)
0	0.0000172	1.293	1.147	1.014	0.785	0.0242
5	0.0000174	1.270	1.126	0.995	0.771	0.0246
10	0.0000176	1.247	1.106	0.978	0.757	0.0250
15	0.0000179	1.226	1.087	0.961	0.744	0.0254
20	0.0000181	1.205	1.068	0.944	0.731	0.0257
25	0.0000184	1.184	1.051	0.928	0.719	0.0261
30	0.0000186	1.165	1.033	0.913	0.707	0.0265
35	0.0000188	1.146	1.016	0.898	0.696	0.0269
40	0.0000191	1.127	1.000	0.884	0.685	0.0272
45	0.0000193	1.110	0.984	0.870	0.674	0.0276
50	0.0000195	1.093	0.969	0.856	0.663	0.0280
55	0.0000198	1.076	0.954	0.843	0.653	0.0283
60	0.0000200	1.060	0.940	0.831	0.643	0.0287
65	0.0000202	1.044	0.926	0.818	0.634	0.0291
70	0.0000204	1.029	0.912	0.806	0.625	0.0295
75	0.0000207	1.014	0.899	0.795	0.616	0.0298
80	0.0000209	1.000	0.887	0.783	0.607	0.0302
85	0.0000211	0.986	0.874	0.773	0.598	0.0306
90	0.0000213	0.972	0.862	0.762	0.590	0.0309
95	0.0000215	0.959	0.850	0.752	0.582	0.0313
100	0.0000217	0.946	0.839	0.741	0.574	0.0317

TABLA A.2 Azimutal y altura solar para distintos horarios.

Tiempo Local del Sol							
Latitud	10:00 am		Mediodía		2:00 pm	Latitud	10:00 am
Grados Norte	H_c	Z_c	H_c	Z_c	H_c	Z_c	N
-80	32	33	33	180	32	327	350
-70	40	37	43	180	40	323	350
-60	48	43	53	180	48	317	350
-50	55	52	63	180	55	308	350
-40	60	66	73	180	60	294	350
-30	62	83	83	180	62	277	350
-20	62	96	90	180	62	264	20
-10	61	97	88	180	61	263	50
0	60	91	90	180	60	269	80
10	61	85	89	180	61	275	110
20	62	85	90	180	62	275	140
30	62	97	83	180	62	263	170
40	60	114	73	180	60	245	170
50	55	128	63	180	55	232	170
60	48	137	53	180	48	223	170
70	40	143	43	180	40	217	170
80	32	147	33	180	32	213	170

TABLA A.3 Tipos de Formatos de Títulos.

Coefficiente	Atmósfera Limpia	Atmósfera Industrial
A	-42.2391	53.1821
B	63.8044	14.2110
C	-1.9220	$6.6138 \cdot 10^{-1}$
D	$3.46921 \cdot 10^{-2}$	$-3.1658 \cdot 10^{-2}$
E	$-3.61118 \cdot 10^{-4}$	$5.4654 \cdot 10^{-4}$
F	$1.94318 \cdot 10^{-6}$	$-4.3446 \cdot 10^{-6}$
G	$-4.07608 \cdot 10^{-9}$	$1.3236 \cdot 10^{-8}$

TABLA A.4 Valores para el flujo de calor debido a la radiación solar para distintas alturas solares, dependiendo de la atmósfera.

Grados Altitud Solar	Atmósfera Limpia	Atmósfera Industrial
H_c (°)	Q_s (W/m^2)	Q_s (W/m^2)
5	234	136
10	433	240
15	583	328
20	693	422
25	770	502
30	829	571
35	877	619
40	913	662
45	941	694
50	969	727
60	1000	771
70	1020	809
80	1030	833
90	1040	849

TABLA A.5 Factor de corrección del flujo de calor por radiación solar, para distintas alturas sobre el nivel del mar.

Elevación Sobre el Nivel del Mar	Multiplicador	Elevación Sobre el Nivel del Mar
H_e (m)		H_e (m)
0	1.00	0
1000	1.10	1000
2000	1.19	2000
4000	1.28	4000

Anexo B. Normativa Chilena

B.1. Artículo 94.

Para los efectos de la aplicación de los artículos siguientes se designará a las líneas aéreas por su categoría como sigue:

CATEGORIA A. Las líneas de baja tensión o sea aquellas cuyo voltaje nominal entre conductores no excede de 1.000 volts.

CATEGORIA B.- Las líneas aéreas de media tensión o sea aquellas cuyo voltaje nominal entre conductores no excede de 25.000 volts.

CATEGORIA C.- Las líneas aéreas de alta tensión o sea aquellas cuyo voltaje nominal entre conductores sea superior a 25.000 volts.

B.2. Artículo 107

107.1 Como regla general la altura mínima de los conductores sobre el suelo, a la temperatura de 30°C, y con el conductor sin sobrecarga, será la indicada en la tabla que sigue:

TABLA B.1 Alturas de los conductores sobre el suelo.

LUGAR	Distancia medida verticalmente en metros				
	Categoría A		Categoría B		Categoría C
	fases	Neutron	fases	neutro	Fases
Regiones poco transitables (montañas, praderas, cursos de agua no navegables)	5	4.6	5.5	4.6	5+0.006 por kv
Regiones transitables (localidades, caminos principales, calles y plazas públicas)	5	5	6	5.5	6.5+0.006 por kv
En cruces de caminos y calles	5.5	5.5	6	5.5	6.5+0.006 por kv

Anexo C. Códigos Implementados en MATLAB

```

function dTc = TransienteAAC(~,Tc,I)
%Tc = Temperatura Conductor, conductor del ejemplo std738

%Diametro Conductor [mm]
D = 24.49;
%Temperatura ambiente [°C]
Ta = 15;
Tfilm = (Tc+Ta)/2 ;
%Velocidad Viento [m/s]
Vw = 0.61;
%Altitud sobre el nivel del mar [m]
%He = 100;

%Tablas
load uf
load pf
load kf
u_f = ppval(uf,Tfilm);
p_f = ppval(pf,Tfilm);
k_f = ppval(kf,Tfilm);

Kang = 1.194-cos(pi/2)+0.194*cos(pi)+0.368*sin(pi);

%Tasa de calor por conveccion [W/m]
qcn = 0.0205*sqrt(p_f)*(D)^0.75.*(Tc-Ta).^1.25;
qc1 = (1.01+0.0372*((D*p_f*Vw)./u_f).^0.52).*k_f*Kang.*(Tc-Ta);
qc2 = 0.0119*((D*p_f*Vw)./u_f).^0.6.*k_f*Kang.*(Tc-Ta);
qc = zeros(size(Tfilm));
for iter=1:length(Tfilm)
    qc(iter) = max([qcn(iter) qc1(iter) qc2(iter)]);
end

%Emisividad y tasa de pérdidas por radiación [W/m]
e = 0.5;
qr = 0.0178*D*e*((Tc+273)/100).^4-((Ta+273)/100)^4);
%Angulos relacionados al sol, altura y azimutal
Hc = 72.5*pi/180;
Zc = 139*pi/180;
Zl = 90*pi/180;
theta = acos(cos(Hc)*cos(Zc-Zl));
%Area proyectada por unidad de longitud
A = D/1000;
%Absortividad
a = 0.5;
Qse = 1024;
qs = a*Qse*sin(theta)*A;

%Resistencias a temperaturas conocidas en [ohm/m]
RTl = 2.4995e-5/0.3048;
RTh = 3.0416e-5/0.3048;
Th = 75;
Tl = 20;

```

```
%Resistencia Conductor A la temperatura Tc
```

```
RTc = ((RTh-RTl)/(Th-Tl))*(Tc-Tl)+RTl;
```

```
mCp = 955*0.9985;
```

```
%Ecuación dinámica de la temperatura
```

```
dTc = 1/mCp*(RTc*I^2+qs-qc-qr);
```

```
function I = AmpacidadCalculo(Tc, varargin)
```

```
%Tc = Temperatura Conductor, conductor del ejemplo std738
```

```
%Diametro Conductor [mm]
```

```
D = 24.49;
```

```
%Temperatura ambiente [°C]
```

```
Ta = 30;
```

```
%Velocidad Viento [m/s]
```

```
Vw = 0.61;
```

```
if nargin > 1
```

```
    Vw = varargin{1};
```

```
end
```

```
if nargin > 2
```

```
    Ta = varargin{2};
```

```
end
```

```
if nargin > 3
```

```
    error('Cantidad de entradas incorrecta')
```

```
end
```

```
%Altitud sobre el nivel del mar [m]
```

```
%He = 100;
```

```
Tfilm = (Tc+Ta)/2 ;
```

```
%Tablas
```

```
load uf
```

```
load pf
```

```
load kf
```

```
u_f = ppval(uf,Tfilm);
```

```
p_f = ppval(pf,Tfilm);
```

```
k_f = ppval(kf,Tfilm);
```

```
Kang = 1.194-cos(pi/2)+0.194*cos(pi)+0.368*sin(pi);
```

```
%Tasa de calor por conveccion [W/m]
```

```
qcn = 0.0205*sqrt(p_f)*(D)^0.75.*(Tc-Ta).^1.25;
```

```
qc1 = (1.01+0.0372*((D*p_f*Vw)./u_f).^0.52).*k_f*Kang.*(Tc-Ta);
```

```
qc2 = 0.0119*((D*p_f*Vw)./u_f).^0.6.*k_f*Kang.*(Tc-Ta);
```

```
qc = zeros(size(Tfilm));
```

```
for iter=1:length(Tfilm)
```

```
    qc(iter) = max([qcn(iter) qc1(iter) qc2(iter)]);
```

```
end
```

```
%Emisividad y tasa de pérdidas por radiación [W/m]
```

```
e = 0.5;
```

```
qr = 0.0178*D*e*((Tc+273)/100).^4-((Ta+273)/100).^4);
```

```
%Angulos relacionados al sol, altura y azimutal
```

```
Hc = 72.5*pi/180;
```



```

Zc = 139*pi/180;
Zl = 90*pi/180;
theta = acos(cos(Hc)*cos(Zc-Zl));
%Area proyectada por unidad de longitud
A = D/1000;
%Absortividad
a = 0.5;
Qse = 1024;
qs = a*Qse*sin(theta)*A;

%Resistencias a temperaturas conocidas en [ohm/m]
RTl = 2.4995e-5/0.3048;
RTh = 3.0416e-5/0.3048;
Th = 75;
Tl = 20;

%Resistencia Conductor A la temperatura Tc
RTc = (RTh-RTl)/(Th-Tl)*(Tc-Tl)+RTl;

%Ampacidad
I = sqrt((qc+qr-qs)./RTc);

```



```

clear all
close all
clc
%Rutina para analizar el efecto del viento en la temperatura.
%Se da un Dato de Corriente
I = 600;

%Velocidad del Viento
Vw = (0:.5:10)'*0.44704;

%Guardar Temperaturas
Tc = zeros(size(Vw));

tol = 1;
%Tc(1) = fzero(@(T) I-AmpacidadCalculo(T,Vw(1)), [60 100]);
for i=1:length(Vw)
    %Se empieza a iterar con la temperatura ambiente
    T = 30;
    error = abs(I-AmpacidadCalculo(T,Vw(i)))<tol;
    while ~error
        T = T+0.01;
        error = abs(I-AmpacidadCalculo(T,Vw(i)))<tol;
    end
    Tc(i) = T;
end

plot(Vw, Tc, '*', 'linewidth', 2)
xlabel('Velocidad Viento [m/s]')
ylabel('Temperatura Conductor [°C]')
title('Efecto del Viento en la Temperatura')
grid on

```