



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE
CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE MECÁNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO**

**“ANÁLISIS DE FALLOS Y EVALUACIÓN ENERGÉTICA
DE ANOMALÍAS EN CONDUCTORES ELÉCTRICOS DE
POTENCIA MEDIANTE TERMOGRAFÍA”**

SAQUI MOYOLEMA CLAUDIO FERNANDO

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO DE MANTENIMIENTO

**RIOBAMBA – ECUADOR
2016**

CERTIFICADO DE APROBACIÓN DE TESIS

2014-10-14

Yo recomiendo que la Tesis preparada por:

SAQUI MOYOLEMA CLAUDIO FERNANDO

Titulada:

**“ANÁLISIS DE FALLOS Y EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE ANOMALÍAS
EN CONDUCTORES ELÉCTRICOS DE POTENCIA MEDIANTE
TERMOGRAFÍA”**

Sea aceptado como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

INGENIERO DE MANTENIMIENTO

Ing. Marco Santillán Gallegos
DECANO FAC. DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

Ing. Pablo Fiallos Velasco
DIRECTOR

Ing. Eduardo Hernández Dávila
ASESOR

CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TESIS

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: SAQUI MOYOLEMA CLAUDIO FERNANDO

TÍTULO DE LA TESIS: “ANÁLISIS DE FALLOS Y EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE ANOMALÍAS EN CONDUCTORES ELÉCTRICOS DE POTENCIA MEDIANTE TERMOGRAFÍA”

Fecha de Examinación: 2016-03-30

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. Oswaldo Pérez Rodríguez PRESIDENTE TRIB. DEFENSA			
Ing. Pablo Fiallos Velasco DIRECTOR			
Ing. Eduardo Hernández Dávila ASESOR			

* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

RECOMENDACIONES: _____

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

Ing. Oswaldo Pérez Rodríguez
PRESIDENTE TRIB. DEFENSA

DERECHOS DE AUTORÍA

El trabajo de grado que presento, es original y basado en el proceso de investigación y/o adaptación tecnológica establecido en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En tal virtud, los fundamentos teóricos científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad del autor. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Saqui Moyolema Claudio Fernando

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Yo, Claudio Fernando Saqui Moyolema, declaro que el presente trabajo de tesis es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

Como autor, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación.

Saqui Moyolema Claudio Fernando
Cédula de Identidad: 180462153-8

DEDICATORIA

Dedico este proyecto de tesis en primer lugar a Dios que me ha dado la sabiduría para seguir en el buen camino, a mis padres que han sido parte fundamental para culminar un gran objetivo, a mis abuelos y hermanos que me han brindado un gran apoyo.

A todas aquellas personas que desinteresadamente me dieron un palpito de apoyo, a las que no creyeron en mí también y demostrarles que si se puede, además a mis amigos que compartí durante mi vida estudiantil.

Saqui Moyolema Claudio Fernando

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por ser inspiración principal en mi vida, a mis padres que nunca me abandonaron en la lucha de esta carrera, a mis hermanos que siempre me apoyaron incondicionalmente.

A toda mi familia por su carisma y apoyo, a todos mis amigos que forman parte de mi vida, a todas las personas que me prestaron su apoyo durante mi vida estudiantil, a mi director de tesis, Ing. Pablo Fiallos e Ing. Eduardo Hernández asesor de tesis, que con sus conocimientos sólidos y su ayuda desinteresada me guiaron en la elaboración de este proyecto.

Así también a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en especial a la Escuela de Ingeniería de Mantenimiento, por darnos la oportunidad de obtener una profesión, y ser útiles a la sociedad y al país.

Saqui Moyolema Claudio Fernando

CONTENIDO

Pág.

1.	INTRODUCCIÓN	
1.1	Antecedentes	1
1.2	Justificación	1
1.3	Objetivos	3
1.3.1	<i>Objetivo general.</i>	3
1.3.2	<i>Objetivos específicos:</i>	3
2.	MARCO TEÓRICO	
2.1	Conductores eléctricos y aislantes	4
2.2	Resistencia eléctrica	4
2.2.1	<i>Resistencia de un conductor eléctrico.</i>	5
2.2.2	<i>Resistencia de los aislantes</i>	6
2.3	Potencia eléctrica	6
2.2.3.1	<i>Potencia eléctrica en corriente alterna trifásica</i>	6
2.2.3.2	<i>Factor de potencia</i>	7
2.2.3.3	<i>Efectos de la energía reactiva en las instalaciones eléctricas.</i>	7
2.4	Caída de tensión en conductores eléctricos.....	7
2.5	El efecto Joule	8
2.6	Calor específico.....	8
2.7	Factores que determinan la resistencia de un conductor eléctrico	9
2.7.1	<i>La longitud de un conductor eléctrico.</i>	9
2.7.2	<i>El área de la sección transversal de un conductor eléctrico</i>	9
2.7.3	<i>La temperatura</i>	9
2.7.4	<i>El tipo de material del conductor eléctrico.</i>	9
2.8	Selección de calibres	9
2.8.1	<i>Metal.</i>	10
2.8.2.	<i>Calibre, temple y ensamble.</i>	10
2.8.3.	<i>Diámetro del conductor eléctrico.</i>	10
2.9	Protección de los circuitos contra sobrecargas.....	10
2.9.1	<i>Sobrecarga en conductores eléctricos.</i>	12
2.9.2	<i>Cortocircuito en conductores eléctricos</i>	12
2.10	Analizador trifásico de energía eléctrica.....	13
2.10.1	<i>Características del analizador marca Fluke 435-II.</i>	13
2.11	Termografía.....	14
2.11.1	<i>Espectro Electromagnético.</i>	14
2.11.2	<i>Cámara termográfica.</i>	16
2.11.3	<i>Factores que inciden en el análisis termográfico.</i>	17
2.11.4	<i>Criterios de análisis termográfico para sistemas eléctricos.</i>	18
3.	ANÁLISIS DE MODOS DE FALLOS EN CONDUCTORES	
3.1	Selección del grupo de trabajo	20
3.2	Establecer el tipo de AMEF a utilizar, sus límites y objetivos	20
3.3	Aclarar funciones del proceso analizado.....	21
3.4	Determinar la falla funcional	21
3.5	Determinar los modos potenciales de falla	21

3.6	Determinar los efectos potenciales de falla.....	22
3.7	Determinar las consecuencias potenciales de falla	22
3.8	Identificar los sistemas de controles actuales.....	22
3.9	Proponer acciones de mejora	23
3.10	Revisar el AMEF.....	23
3.11	AMEF de conductores eléctricos	24

4. IMPLEMENTACIÓN Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

4.1	Descripción y características de los equipos que conforman el módulo.....	25
4.1.1	<i>Descripción de la bomba CP 660</i>	25
4.1.2	<i>Manómetro de presión de agua.....</i>	26
4.1.3	<i>Válvula de compuerta</i>	27
4.1.4	<i>Tubería de agua..</i>	27
4.1.5	<i>Recipiente plástico</i>	28
4.1.6	<i>Tablero de control eléctrico.....</i>	28
4.1.7	<i>Descripción de los conductores eléctricos.....</i>	29
4.1.8	<i>Descripción del disyuntor</i>	30
4.1.9	<i>Descripción del contactor</i>	31
4.1.10	<i>Descripción del relé térmico</i>	31
4.1.11	<i>Descripción del cable electrocable.....</i>	32
4.1.12	<i>Cable flexible.</i>	32
4.1.13	<i>Descripción del analizador trifásico de energía y calidad de energía.....</i>	33
4.1.14	<i>Descripción de cámara termografica</i>	34

5. ANÁLISIS DE PÉRDIDA ENERGÉTICA

5.1	Análisis de pérdida energética	46
5.1.1	<i>Análisis teórico de la pérdida energética</i>	46
5.1.2	<i>Análisis teórico de la pérdida energética</i>	48
5.2	Estudio practico de resultados obtenidos.....	48
5.2.1	<i>Análisis de la curva de potencia aparente versus la sección del conductor</i>	49
5.2.2	<i>Análisis de la curva de temperatura vs sección del conductor.....</i>	50
5.2.3	<i>Análisis de la curva de potencia vs temperatura</i>	51

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1	Conclusiones	52
6.2	Recomendaciones.....	53

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

LISTA DE TABLAS

	Pág.
1 Resistividad de conductores y aislante a 20°C	5
2 Calor específico de diferentes sustancias	8
3 Conductores eléctricos.....	11
4 Características de entrada de tensión del FLUKE 435-II.....	13
5 Características de entrada de corriente del FLUKE 435-II	14
6 Criterios de severidad de un problema eléctrico según NETA	18
7 Características de la bomba centrífuga CP 660	26
8 Características del manómetro de presión del agua.....	27
9 Características de la válvula de compuerta.....	27
10 Características de la válvula de compuerta.....	28
11 Características del recipiente plástico.....	28
12 Características del tablero de control eléctrico	29
13 Características de los conductores eléctricos.....	30
14 Características del disyuntor.....	30
15 Características del contactor	31
16 Características del relé térmico.....	32
17 Características del cable electrocable	32
18 Características del cable flexible	33
19 Características del analizador trifásico de energía	34
20 Características de la cámara termográfica	34
21 Consumo en amperios	37
22 Energía pérdida en varios conductores eléctricos.....	47
23 Energía pérdida en el conductores calibre14 con varias longitudes	48

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
1	Constitución de un cable eléctrico 4
2	Manifestación de la resistencia eléctrica 5
3	Ejemplo de cortocircuito 12
4	Analizador trifásico de energía eléctrica 13
5	Espectro electromagnético..... 15
6	Espectro visible por el ojo humano 16
7	Diagrama de decisión 22
8	Flujograma de proceso del AMEF..... 23
9	Equipos que conforman el módulo de trabajo 25
10	Bomba centrífuga CP 660..... 26
11	Manómetro de presión del agua..... 27
12	Válvula de compuerta 27
13	Tubería de agua 28
14	Recipiente plástico..... 28
15	Tablero de control eléctrico 29
16	Conductores eléctricos..... 29
17	Disyuntor 30
18	Contactador 31
19	Relé térmico..... 31
20	Cable electrocable..... 32
21	Cable flexible..... 33
22	Analizador trifásico de energía..... 33
23	Cámara termografica 34
24	Circuito de mando y potencia del módulo de trabajo 35
25	Componentes y dimensiones de la bomba CP660..... 36
26	Curva y datos de prestaciones de la bomba CP660 37
27	Conductor calibre 14 39
28	Conductor calibre 24 39
29	Bastidor o soporte del módulo de trabajo 40
30	Montaje y conexión eléctrica..... 40
31	Conexión del sistema de succión, descarga y demás accesorios 41
32	Vista posterior y frontal del circuito de potencia 42
33	Conexión del analizador a un sistema de distribución trifásico 44
34	Descarga de datos 45
35	Costo de energía pérdidas en varios conductores eléctricos..... 47
36	Costo de energía pérdidas en el conductor calibre14 con varias longitudes 48
37	Δ Potencia vs sección del conductor..... 49
38	Δ Temperatura vs sección del conductor 50
39	Δ Potencia vs Δ Temperatura..... 51

SIMBOLOGÍA

A	Área	m^2
T	Temperatura	$^{\circ}C$
Cv	Potencia Absorbida	Hp
V	Velocidad	m^2/s
P	Presión	Pa
F	Fuerza	N
V	Volumen	m^3
L	Longitud	m
ρ	Densidad	kg/m^3

LISTA DE ABREVIACIONES

CAD	Diseño Asistido por Computador
AMEF	Análisis de Modos y Efectos de Fallos
NTE	Norma Técnica Ecuatoriana
INEN	Instituto Ecuatoriano de Normalización
NETA	Asociación Internacional de Pruebas Eléctricas

LISTA DE ANEXOS

- A** Dimensiones de corriente de conductores eléctricos
- B** Calculo de la caída de tensión
- C** Calculo del Cos (φ)
- D** AMEF (Análisis Modo Efecto y Fallo)
- E** Análisis de resultados termográfico en conductores eléctricos
- F** Guía del laboratorio

RESUMEN

La investigación realizada tiene como objetivos: detectar la falla por sobrecalentamiento, realizar el estudio y análisis del comportamiento de los calibres de los conductores eléctricos de potencia mediante el uso de la técnica de termografía. El medio para conseguir esta anomalía es mediante una motobomba eléctrica con capacidad de 2HP, el cálculo de calibre de conductor adecuado es número 14, en el estudio se pretende realizar un subdimensionamiento del calibre hasta llegar a un número 24, el proceso de análisis de la falla se lo realiza mediante el AMEF (Análisis de Modo y Efecto de Fallo); y se determinan diferentes variables y posibles modos de fallos, también la detección de anomalías mediante termografía que es una técnica del mantenimiento preventivo. Se realizan las pruebas respectivas en el módulo para la detección de fallas en conductores eléctricos presente en el laboratorio de Mantenimiento Preventivo se obtienen datos confiables, además se recurre a un equipo de medida que analiza la calidad energética, de esta manera se observa el comportamiento de la caída de voltaje y la potencia en su calibre al momento de subdimensionarlos. Se realiza un modelo comparativo mediante gráficos considerando la pérdida de potencia en el conductor en relación al calentamiento del mismo, de esta manera se detectan pérdidas del coste energético que no se aprovecha en el consumidor. Este trabajo tiene como fin demostrar que realmente existe pérdida de energía en forma de calor en los conductores eléctricos, pese a que el conductor esté con el calibre adecuado.

PALABRAS CLAVE: <TERMOGRAFÍA>, <MODOS DE FALLOS>. <MANTENIMIENTO PREVENTIVO>, <EQUIPOS Y HERRAMIENTAS>, <CONDUCTORES ELÉCTRICOS>, <CALIDAD ENERGÉTICA>, <INSTRUMENTACIÓN DE LABORATORIO>, <ANÁLISIS DE MODO Y EFECTO DE FALLO>

ABSTRACT

The research carried out has the following objectives: to detect the failure due to overheating, to carry out the study and analysis of the behavior of the gauges of electrical power conductors by the use of thermography technique. The means to achieve this anomaly is by means of an electric motor pump with capacity of 2 HP, the calculation of suitable conductor gauge is number 14, in the study it is tried to carry out a dimensioning of the gauge until reaching a number 24, in the process of analysis of the failure is done by means of the AMEF (Analysis of Mode and effect of Failure); And different variables and possible failure modes are determined, as well as the detection of anomalies by means of thermography, which is a preventive maintenance technique. The respective tests are performed in the module for the detection of faults in electric conductors present in the Laboratory of Preventive Maintenance are obtained reliable data also recur to a measuring equipment that analyzes the energy quality in this way is observed the behavior of the fall voltage and power in their gauge at the time of undersizing. A comparative model is made by graphs considering the loss of power in the conductor in relation to the heating of the same, in this way are detected losses of the energetic cost that does not take advantage of the consumer. This work has the purpose of demonstrating that there is a loss of energy in the form of heat in the electric conductors, despite the fact that the conductors is with the right gauge.

KEYWORDS: <THERMOGRAPHY>, <FAILURE MODES>, <PREVENTIVE MAINTENANCE>, <EQUIPMENT AND TOOLS>, <ELECTRICAL CONDUCTORS>, <ENERGY QUALITY>, <LABORATORY INSTRUMENTATION>, <ANALYSIS OF MODE AND EFFECT OF FAILURE>.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Las grandes industrias, conscientes de las pérdidas que se producen cuando una máquina genera algún tipo de fallo e interrumpe su producción, destinan una buena parte de su presupuesto en actividades de mantenimiento preventivo, dónde su herramienta básica se sustentan mediante el diagnóstico técnico, evitando así las consecuencias de las fallas en la industria, que generan grandes pérdidas económicas de las mismas.

Es por eso que dentro de la formación del Ingeniero de Mantenimiento se han incluido la enseñanza de varias técnicas como: análisis de vibraciones, termografía industrial, ultrasonido pasivo y activo, análisis de lubricantes entre otros, dónde la termografía es una técnica que permite medir temperaturas de gran credibilidad a distancia y sin necesidad de contacto físico con el objeto a estudiar.

Mediante la captación de la radiación infrarroja del espectro electromagnético se detecta las condiciones anormales en casos específicos, para ello se toma en cuenta un valor x de tolerancia en función de daño que podría producir los incrementos de temperatura a los elementos eléctricos como conductores. Sin embargo todo incremento de temperatura genera una pérdida de energía aunque los niveles sean tolerables. (CASTILLO, 2010)

El laboratorio de mantenimiento predictivo perteneciente a la Escuela de Ingeniería de Mantenimiento de la Facultad de Mecánica, cuenta con varios equipos de tecnología avanzada que permiten realizar a los estudiantes diferentes métodos de acciones correctivas más apropiadas en el momento adecuado, realizando seguimientos de cada una de las variables relacionadas con el funcionamiento de los equipos, evitando posibles fallas en los mismos.

1.2 Justificación

Producto de los años de investigaciones y de las nuevas técnicas de ensayos como en el

análisis termográfico, análisis de la calidad energética, entre otros, se han determinado que las fallas en los conductores eléctricos no son fallas imprevistas o espontáneas, sino más bien, se las considera como desatendidas. (PROFIDI, 2009)

En la actualidad la tendencia mundial está basada en la anticipación temprana de un siniestro eléctrico, mediante técnicas de diagnóstico como el análisis termográfico dónde las tolerancias evitan que se produzcan problemas mayores. Por debajo de los niveles permisibles, este riesgo es muy bajo.

Por este motivo se debe seleccionar de manera adecuada el calibre del conductor eléctrico conociendo correctamente el contexto operacional de cualquier máquina o equipo utilizando los debidos métodos y técnicas para el cálculo de circulación de la corriente por el conductor, además se puede ayudar mediante el análisis termográfico en situaciones dónde un problema puede ser visualizado por medio de una diferencia de temperatura, tanto en componentes mecánicos o eléctricos.

La razón de este proyecto es el estudio de un sistema de medición y análisis de fallos a través del desarrollo de métodos correctos, técnicas de prueba y procedimientos adecuados, mediante inspección termográfica realizando variaciones de temperatura sobre los componentes de control eléctrico específicamente en conductores eléctricos correspondientes al circuito de potencia de una bomba centrífuga de 2 Hp con succión positiva modelo CP 660 y la determinación de las perdidas energéticas que se presenten en el mismo, permitiendo establecer un informe de resultados basado en los datos obtenidos y en base a modelos reales y confiables de los informes de las inspecciones termográficas que se realizan en las empresas industriales del Ecuador, para que sean de gran ayuda para la formación académica y científica de los estudiantes de la Facultad de Mecánica.

Convirtiéndose así esta tesis en una herramienta vinculadora entre la educación superior y el sector productivo en el campo industrial, mediante la inclusión de los estudiantes con las metas y objetivos de la ESPOCH, enmarcada en las áreas y líneas de investigación de la ESPOCH 2012-2017, del área V de la investigación científica del Ecuador, mediante la capacitación para el control de procesos industriales mediante la incorporación y adaptación del medio con las nuevas tecnologías.

1.3 Objetivos

1.3.1 *Objetivo general.* Analizar los fallos mediante termografía y realizar la evaluación energética de anomalías en conductores eléctricos.

1.3.2 *Objetivos específicos:*

Conocer y manejar los equipos de inspección, utilizando métodos correctos y técnicas adecuadas.

Aplicar un procedimiento adecuado para realizar inspecciones termográficas y dar parámetros de las variaciones de temperatura.

Analizar los modos de fallos en conductores eléctricos mediante el AMEF.

Establecer el comportamiento de pérdida energética a causa del calentamiento en los conductores eléctricos y establecer las variables sobre las que se pueden actuar.

Elaborar un análisis de resultados basado en los datos obtenidos.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Conductores eléctricos y aislantes

Para el buen funcionamiento de un circuito eléctrico existen dos elementos básicos los conductores y los aislantes, como se muestra en la figura 1.

Figura 1. Constitución de un cable eléctrico



Fuente: Autor

Según Boylestad los conductores eléctricos son aquellos materiales que permiten un flujo generoso de electrones con muy poca fuerza externa (voltaje) aplicado. (BOYLESTAD, 2008)

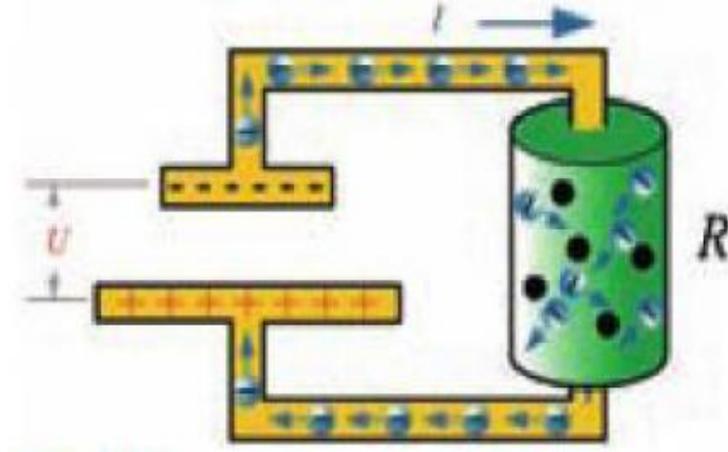
Mientras que los aislantes impiden que la corriente se fugue hacia otros lugares no deseados, al tiempo que evita fallos y descargas eléctricas indeseables. (ALCALDE, 2011)

Por las líneas de conducción que transportan energía eléctrica se producen pérdidas, siendo las más importantes las que se producen por efecto Joule ($I^2 \cdot R$).

2.2 Resistencia eléctrica

La resistencia eléctrica es una unidad de medida ayudando a diferenciar los cuerpos que son mejores o peores conductores, dónde un mal conductor tiene mayor resistencia eléctrica y un mejor conductor tiene menor resistencia eléctrica. En la figura 2, se observa la mayor o menor oposición que ofrecen los cuerpos conductores al paso de la corriente eléctrica. (ALCALDE, 2011)

Figura 2. Manifestación de la resistencia eléctrica



Fuente: Electrotecnia ALCALDE

2.2.1 Resistencia de un conductor eléctrico. La resistencia de los diferentes materiales depende de su naturaleza y de las dimensiones, este último tiene una especial importancia en los cálculos de la sección de los conductores para instalaciones eléctricas, ya que una elevada resistencia provocaría un calentamiento y su deterioro.

La resistencia eléctrica es la dificultad que ofrece un conductor al paso de la corriente eléctrica, esta dificultad irá aumentando en función del camino que tenga que recorrer.

Dónde la fórmula general para calcular la resistencia de cualquier tipo de conductor es la siguiente:

$$R = \rho * \frac{L}{S} \quad (1)$$

En la tabla 1, se detalla una lista con los coeficientes de resistividad, a 20°C de los materiales más comunes.

Tabla 1. Resistividad de conductores y aislantes a 20 °C

Material	[Ω.mm ² /m]
Lata	0,01600
Cobre	0,01786
Bronce	0,01800
Oro	0,02300
Aluminio	0,02857
Magnesio	0,04500

Fuente: (ALCALDE, 2010)

2.2.2 Resistencia de los aislantes. Así como existen materiales que son mejores conductores, también existen materiales con mayor capacidad de aislamiento que otros, de ese modo cuanto mayor es la resistividad del aislante, mayor es su capacidad de aislamiento. Por tanto dar una resistencia en cifras es complicado ya que varían según el grado de humedad y elevación de temperatura.

2.3 Potencia eléctrica

La potencia es la rapidez con que se efectúa un trabajo, donde el trabajo se produce gracias a la energía, cuya fórmula es:

$$P = \frac{E}{t} \quad (2)$$

La potencia eléctrica es el producto de la tensión y la intensidad de corriente, es la rapidez con que se efectúa un trabajo, donde la fórmula es la siguiente:

$$P = U * I \quad (3)$$

2.3.1 Potencia eléctrica en corriente alterna trifásica. Un sistema trifásico equilibrado está desfasado en un ángulo de 120°, donde hay dos formas de conectar las fuentes o cargas trifásicas, tanto en estrella como en triángulo.

En el caso de la corriente trifásica se presentan diversos tipos de potencias:

Potencia Activa: Es la potencia en que el proceso de transformación de energía eléctrica se convierte en trabajo útil, determinado con la siguiente fórmula:

$$P = \sqrt{3} * V_L * I_L * \cos\varphi \quad (4)$$

Potencia Reactiva: La energía reactiva se utiliza para la generación de campos eléctricos y magnéticos de determinados receptores, por lo que no se transforma en ningún tipo de trabajo útil, y se mide en k.V.Ar, el cual se determina mediante la siguiente fórmula:

$$Q = \sqrt{3} * V_L * I_L * \sen\varphi \quad (5)$$

Potencia Aparente: La energía aparente es la suma total de una instalación eléctrica, se utiliza para la generación de campos eléctricos y magnéticos de determinados receptores, por lo que no se transforma en ningún tipo de trabajo útil, y se mide en kVA, el cual se determina mediante la siguiente fórmula:

$$S = \sqrt{3} * V_L * I_L \quad (6)$$

2.3.2 *Factor de potencia.* El factor de potencia describe la cantidad de energía eléctrica que se ha convertido en trabajo. Los distribuidores de energía eléctrica aplican un sistema de tarifa que sanciona el consumo de energía con un factor de potencia medio mensual inferior a 0,9. (ESPINOZA, 2010)

2.3.3 *Efectos de la energía reactiva en las instalaciones eléctricas.* Esta energía al no ser transformada en trabajo útil, este transita a través de la red provocando un aumento en la demanda de corriente eléctrica, provocando los siguientes efectos:

- Pérdida de potencia útil en las instalaciones.
- Aumento de la pérdida de energía activa.
- Sobre calentamiento en los conductores eléctricos.
- Menor rendimiento en los equipos conectados.
- Caídas de tensión y perturbaciones en la red eléctrica.
- Penalizaciones a los usuarios.

2.4 Caída de tensión en conductores eléctricos

Existe una caída de tensión entre los terminales, siempre que circule una corriente sobre una resistencia del conductor o equipo. Dónde la caída de tensión es la disminución gradual de voltaje, igual a $I * R$, según la ley de ohm; que va soportando un sistema eléctrico por el paso de la corriente a través de los conductores. La diferencia de voltaje entre dos puntos se la conoce como caída de voltaje, siendo esta perjudicial para las cargas que se encuentran en una instalación. La máxima caída de tensión aceptada para instalaciones industriales, es del 6%, también para líneas de transmisión esta variación de voltaje puede resistir los aparatos consumidores, ya que la mayoría viene diseñada para soportar una variación del $\pm 10\%$ recomendado por diseño de fabricación. Para su cálculo

de la caída de tensión se lo realiza utilizando la siguiente fórmula:

$$\Delta V = I * R * \sqrt{3} \quad (7)$$

2.5 El efecto Joule

Los cuerpos conductores que poseen naturaleza resistiva se calientan cuando son atravesados por una corriente eléctrica, produciéndose el efecto Joule.

El físico James Joule estudió la relación que existe entre la energía y su transformación plena en calor. A base de experimentar con un calorímetro, llegando a la conclusión que la energía de 1 julio es equivalente a 0,24 calorías, dónde:

$$Q = 0,24 * E. \quad (8)$$

Si quisiéramos determinar el calor que se produce en una resistencia en un tiempo determinado, cuando es recorrida a través de una corriente eléctrica, dónde:

$$E = P * t \text{ y } P = I^2 * R \text{ se determina de la siguiente expresión } Q = 0,24 * R * I^2 * t \quad (9)$$

(ALCALDE, 2011)

2.6 Calor específico

El calor específico de una sustancia es la cantidad de calor que se precisa para aumentar la temperatura de 1 °C una masa de un gramo. En la tabla 2 se observa el calor específico de diferentes sustancias, dónde

$$Q = m * c * \Delta t^\circ \quad (10)$$

Tabla 2. Calor específico de diferentes sustancias

Sustancia	Calor específico [cal/g.°C]
Cobre	0,093
Acero	0,110
PVC	0,210
Aluminio	0,220
Agua	1,000

Fuente: Electrotecnia, ALCALDE: 2010

2.7 Factores que determinan la resistencia de un conductor eléctrico

Todo material conductor de la corriente eléctrica tiene un cierto valor de resistencia, independientemente si fluye o no una corriente eléctrica por él. Un conductor eléctrico se identifica por un número que representa el calibre y por el tipo de aislante que lo protege.

Son cuatro factores principales los que determinan la resistencia de un conductor: longitud, área de la sección transversal, temperatura y, el tipo de material del conductor.

2.7.1 *La longitud de un conductor eléctrico.* Esta es directamente proporcional a la resistencia del conductor, si se aumenta la longitud se aumenta la resistencia, es decir un electrón libre al desplazarse a través de un determinado tramo de conductor, tendrá cierta oposición, la cual será la misma en otro tramo igual al anterior.

2.7.2 *El área de la sección transversal de un conductor eléctrico.* La cual es proporcional al área de su sección transversal, es decir es el espacio por dónde se distribuyen los electrones al circular. A mayor área, se tendrá mayor espacio para que fluyan los electrones, por lo que serán menores los choques que se originan con los átomos de cobre que en uno de menor área; por lo tanto, a mayor área será menor la resistencia del conductor.

2.7.3 *La temperatura de un conductor eléctrico.* A mayor temperatura será mayor la resistencia, debido a que las moléculas de cobre tienden a agitarse, dilatándose, reduciendo el espacio de circulación de los electrones, dando lugar a un mayor choque de electrones con los átomos y a una mayor fricción entre los mismos al circular.

2.7.4 *El tipo de material del conductor eléctrico.* Éste determina la mejor o peor conducción de electrones en movimiento, cuanto menor es la resistencia de un material, mejor conductor es.

2.8 Selección de calibres

Según la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2 345 se especifica los reglamentos técnicos para el uso de los conductores eléctricos incluyendo cables de bombas de profundidad y otros ensambles de multiconductores.

La capacidad de conducción eléctrica de los conductores depende de los siguientes factores:

2.8.1 *Metal.*

2.8.1.1 *Tipo FEP, FEPB, PFA, Z y ZW.* Los alambres de los conductores deben ser de cobre recocido que cumplan con la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2 175. Los alambres calibre 27-36 AWG en un conductor cableado con temperatura de operación de 200°C, debe protegerse contra la oxidación por un recubrimiento de níquel que cumpla con las especificaciones de la norma ANSI/ ASTM B 298, o en un recubrimiento de otro material necesita una evaluación.

2.8.1.2 *Tipo TFE Y PFAH.* El conductor debe ser de una aleación base de níquel que cumplan con la Norma ASTM B 160.

2.8.1.3 *Tipo TW, THW, THWN, THHN Y TBS y conductores para cables armados.* El conductor debe ser de cobre recocido, aluminio con un recubrimiento de cobre o una aleación de aluminio de grado eléctrico AA- 8 000.

El cobre deberá cumplir con la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2 175.

2.8.2 *Calibre, temple y ensamble.* Los conductores deben ser del calibre temple y ensamble indicados para el tipo de alambre determinado según la tabla 3.

2.8.3 *Diámetro del conductor eléctrico.* El diámetro de la sección transversal de un conductor cableado no debe de ser inferior es establecido en la norma UL 1 581. (RTE, 2008)

2.9 **Protección de los circuitos contra sobrecargas y cortocircuitos en conductores eléctricos.**

Según alcalde los excesos de temperatura que se pueden producir en los conductores por el efecto de Joule los puede destruir inmediatamente. Este es el caso del cortocircuito dónde la corriente es muy elevada y no puede durar mucho tiempo ya que destruye todos los elementos del circuito que están a su paso.

Tabla 3. Conductores eléctricos

Tipo de alambre	Calibres y Metal	Temple	Ensamble
THW-2 THWN-2 THHW, TW THW, THWN THHN, TBS y conductores aislados para los tipos ACT-B, ACT, ACTH, ACTHH, UF-B, NM-B Y CABLES NMC-B.	14-4/0 AWG cobre.	Recocido suave.	Sólido.
	2-4/0 AWG cobre.	Recocido suave.	Cableados compactados. ^{a,d}
	14AWG-2000MCM cobre.	Recocido suave.	Cableado comprimido y cada uno de los otros tipos de cableado ^a cubierto en la tabla 210.2 de la norma UL 1581.
	12-8 AWG aluminio.	b	Sólido.
	6-4/0 AWG aluminio.	Semi duro ^c	Sólido.
	12-2000 MCM aluminio.	Semi duro. ^c	Cableado comprimido y cada uno de los otros tipos de cableado ^a cubierto en la tabla 210.2 de la norma UL 1581, diferente al cableado compactado.
	12-1000 MCM aluminio.	Semi duro. ^a	Cable compactado.
	12-4/0 AWG aluminio cobrizado.	C	Sólido.
TFE y PFAH	14- 4/0 AWG cobre.	Recocido suave.	Sólido o cualquier tipo de cableado ^a cubierto en la tabla 210.2 de la norma UL 1581 diferente al cableado compactado.
	14- 4/0 AWG aleación con base de níquel.	Ver 3.2.2 NTE INEN 2 345.	
FEP y ZW	14- 2 AWG cobre.	Recocido.	Sólido o cualquier tipo de cableado ^a cubierto en la tabla 210.2 de la norma UL 1581 diferente al cableado compactado.
FEPB	14- 8 AWG cobre.	Recocido suave.	Sólido o cualquier tipo de cableado ^a cubierto en la tabla 210.2 de la norma UL 1581 diferente al cableado compactado.
PFA y Z	14- 4/0 cobre.	Recocido suave.	Sólido o cualquier tipo de cableado ^a cubierto en la tabla 210.2 de la norma UL 1581 diferente al cableado compactado.
^a Ver 3.9.1 y 3.9.6 NTE INEN 2 345. ^b Alambre de aluminio (material conductor de aleación de aluminio tipo AA-8000). ^c Ver 3.2.3 NTE INEN 2 345 y ^d Ver 4.47 NTE INEN 2 345.			

Fuente: Reglamento técnico ecuatoriano NTE-INEN 021:2008

2.9.1 *Sobrecarga en conductores eléctricos.* Se produce una sobrecarga cuando pasa por un conductor eléctrico más intensidad de corriente que la nominal, dónde la sobrecarga puede venir provocadas por conectar demasiados receptores en una línea eléctrica por el mal funcionamiento de un receptor o componente electrónico que tiende a un mayor consumo eléctrico o un motor eléctrico, que es obligado a trabajar a mayor potencia que la nominal.

La sobrecarga origina un aumento de intensidad por los conductores, que con el tiempo pueden llegar a provocar su destrucción por elevación de temperatura.

2.9.2 *Cortocircuito en conductores eléctricos.* El cortocircuito se produce por la unión accidental de dos partes activas del circuito eléctrico, como se muestra en la figura 5. Estos accidentes suelen ser provocados por un error en el montaje, fallo de un aislamiento que separa las partes activas o por una falsa maniobra.

En un cortocircuito la intensidad de corriente que aparece es muy elevada, debido a que la única resistencia que existe en el circuito es la propia de los conductores de línea. En el caso de que esta resistencia sea muy baja o cuando se trabaje con tensiones elevadas, pueden llegar a establecerse miles de amperios. Si esta fuerte intensidad no se corta inmediatamente, los conductores se destruyen por efecto del calor en un corto periodo de tiempo. (ALCALDE, 2010)

Figura 3. Ejemplo de cortocircuito



Fuente: (ALCALDE, 2010)

2.10 Analizador trifásico de energía eléctrica

El analizador que es una herramienta manual, ofrece un conjunto potente y completo de medidas para comprobar sistemas de distribución eléctrica. Algunos proporcionan una impresión general del rendimiento del sistema de alimentación eléctrica, en cambio otros utilizan para investigar detalles específicos.

2.10.1 *Características del analizador marca Fluke 435-II.* Este analizador Fluke 435-II que se muestra en la figura 4, cuenta con características adicionales tales como parpadeo, transitorios, onda de potencia, transmisión de señales, evento de onda, evento de rms y precisión de la entrada de tensión del 0,1%. (FLUKE, 2012)

Figura 4. Analizador trifásico de energía eléctrica



Fuente: FLUKE 435-II

Este equipo tiene las siguientes características de entrada de tensión descrito en la tabla 4 y las características de entrada de corriente en la tabla 5.

Tabla 4. Características de entrada de tensión del FLUKE 435-II

Entrada de tensión	
Número de entradas	4 (3 fases + neutro)
⚠ Tensión máxima de entrada	1000 Vrms
⚠ Rango de tensión nominal	Se puede seleccionar entre 1 V y 1000 V según IEC61000-4-30
⚠ Tensión máxima de medida de picos	6 kV (modo de transitorios solamente)
Impedancia de entrada	4 MΩ // 5Pf
Ancho de banda	> 10 kHz, hasta 100 kHz para modo de transitorios
Factor de escala	1:1, 10:1, 100:1, 1000:1, 10000:1 y variable

Fuente: (FLUKE, 2012)

Tabla 5. Características de entrada de corriente del FLUKE 435-II

Entrada de corriente	
Número de entrada	4 (3 fases + neutro) acoplados en CC o CA.
Tipo	Pinza en transformador de corriente con salida mV/A
⚠ Rango de entrada nominal	0 - ± 3,0 pico de tensión, onda sinusoidal de 0 – 3,97 Vrms (selección x1, acoplamiento CA + CC) 0 - ± 3,0 pico de tensión, onda sinusoidal de 0 – 3,97 Vrms (selección x10, acoplamiento CA)
Rango	0,5 Arms a 600 Arms con i430flex-TF incluido (con sensibilidad 10x) 5 Arms a 6.000 Arms con i430flex-TF incluido (con sensibilidad 1x) 0,1 mV/A a 1 V/A y personalizado para su uso con pinzas de CA o CC opcionales Nota: la posición de sensibilidad x10 ofrece más resolución, pero menos rango. Sólo se admiten señales de CA; los componentes de CC se bloquean.
Impedancia de entrada	1 MΩ
Ancho de banda	> 10 kHz
Factor de escala	1:1, 10:1, 100:1, 1.000:1, 10.000:1 y variable

Fuente: (FLUKE, 2012)

2.11 Termografía

Según Joseph “Termografía es una técnica que permite medir temperaturas exactas a distancia y sin necesidad de contacto físico con el objeto a estudiar”. Mediante la captación de la radiación infrarroja del espectro electromagnético, utilizando cámaras termográficas o de termovisión, se puede convertir la energía radiada en información sobre temperatura.

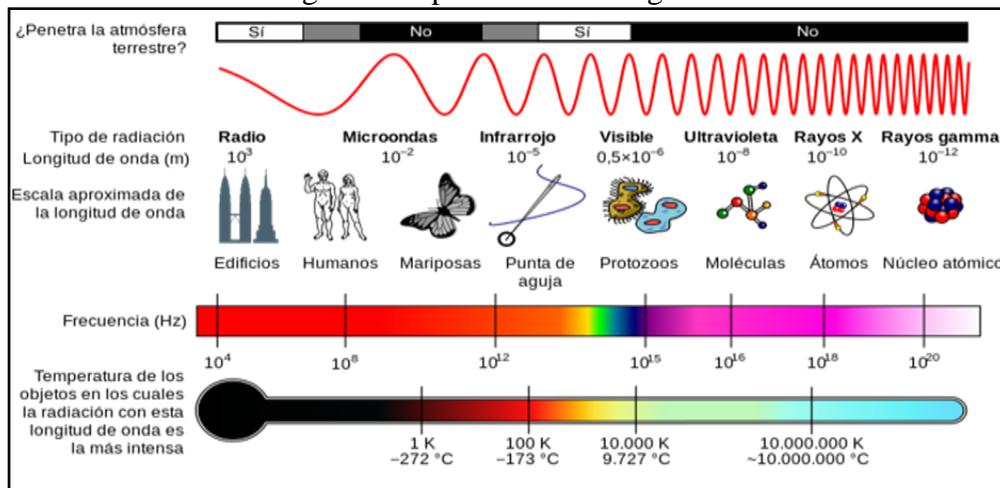
La Termografía es la manera más segura, confiable y rápida de detectar cualquier tipo de fallo a través la temperatura del objeto o sistema.

Todos los objetos eléctricos, electrónicos o mecánicos sufren alteraciones en su temperatura debido principalmente a malos funcionamientos, falsos contactos, altas fricciones, rozamientos etc. Esta pérdida de calor no puede ser apreciada a simple vista por el ojo humano. Pero los equipos termográficos, pueden captarlo perfectamente. Transformando la emisión infrarroja que emiten los cuerpos calientes en una escala

térmica que puede ser analizado de forma matemática. Además se debe tener en consideración es inducido o natural el incremento de calor

2.11.1 *Espectro electromagnético.* Se denomina espectro electromagnético a la distribución energética del conjunto de las ondas electromagnéticas, los mismos que se observa en la figura 5. El espectro electromagnético se extiende desde la radiación de menor longitud de onda, como los rayos gamma y los rayos X, pasando por la luz ultravioleta, la luz visible y los rayos infrarrojos, hasta las ondas electromagnéticas de mayor longitud de onda, como son las ondas de radio.

Figura 5. Espectro electromagnético



Fuente: Mantenimiento industrial de termografía

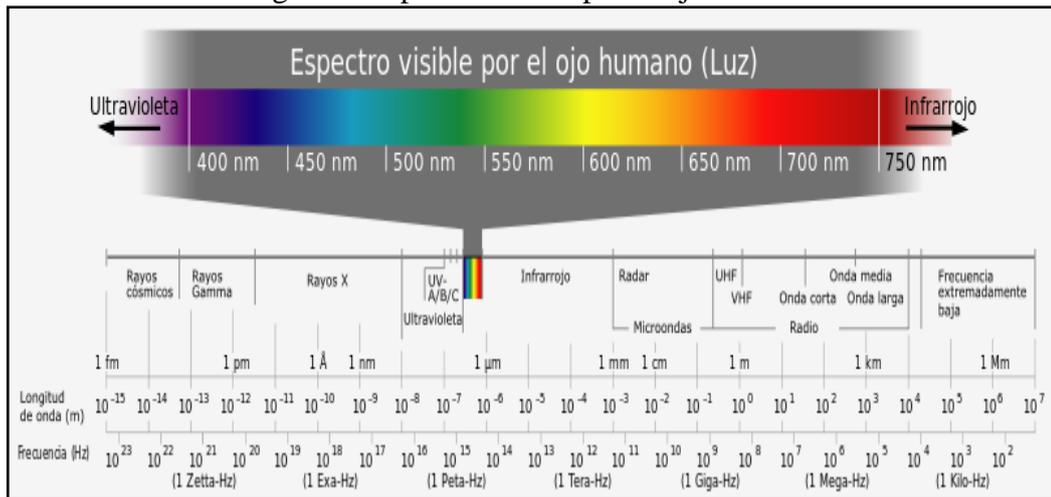
2.11.1.1 *Infrarrojo.* Las ondas infrarrojas están en el rango de 0,7 a 100 micrómetros. La radiación infrarroja se asocia generalmente con el calor. Ellas son producidas por cuerpos que generan calor, aunque a veces pueden ser generadas por algunos diodos emisores de luz y algunos láseres.

2.11.1.2 *Espectro visible.* Por encima de la frecuencia de las radiaciones infrarrojas se encuentra lo que comúnmente es llamado luz, un tipo especial de radiación electromagnética que tiene una longitud de onda en el intervalo de 0,4 a 0,8 micrómetros. Este es el rango en el que el sol y las estrellas similares a las que emiten la mayor parte de su radiación.

La luz que vemos con nuestros ojos es realmente una parte muy pequeña del espectro electromagnético, la radiación electromagnética con una longitud de onda entre 380 nm

y 760 nm (790-400 terahercios) es detectada por el ojo humano y se percibe como luz visible. Otras longitudes de onda, especialmente en el infrarrojo cercano (más de 760 nm) y ultravioleta (menor de 380 nm) también se refiere a veces como la luz, especialmente cuando la visibilidad a los seres humanos no es relevante. Un arco iris muestra la óptica (visible) la parte del espectro electromagnético de la figura 6.

Figura 6. Espectro visible por el ojo humano



Fuente: Mantenimiento industrial de termografía

2.11.2 Cámara termográfica. Las cámaras termográficas poseen una matriz de sensores, que captan las señales infrarrojas que emite el objeto que se desea analizar, a cada una le asignan un color. La composición de todos los colores da como resultado una imagen, donde cada uno representa una zona con una imagen determinada y cada color representa un rango de temperatura expresada en °C o °F.

Las cámaras de imágenes infrarrojas son similares en sus lentes, típicamente hechos de germanio o cuarzo, enfocan la radiación sobre un detector sensible a longitudes de onda infrarroja. El detector responde produciendo pequeñas señales eléctricas que cuando se amplifican, producen una imagen electrónica correspondiente a la localización e intensidad de la radiación infrarroja total que éste ve.

Las cámaras infrarrojas poseen una serie de características, pero entre las más importantes se podrían destacar que deben tener:

- Apertura de termómetro a diferentes escalas.

- Escala de medición de temperatura en °C y °F
- Control de emisividad y tablas de emisividad para diferentes materiales
- Lentes de 35 y 50 mm o dependiente del campo de aplicación en que se use
- Mandos de regulación para temperatura ambiente y humedad relativa
- Puertos de descarga USB al computador
- Baterías recargables con duración de carga por lo menos 8 horas.

2.11.3 Factores que inciden en el análisis termográfico.

Carga: El efecto del calentamiento cuando se presenta una falla, incrementa en términos generales con el valor de la carga elevada al cuadrado. Se ha demostrado que el exceso de temperatura en un componente, aumenta linealmente con el efecto desarrollado. Esto es para inspecciones eléctricas.

Atenuación Atmosférica: La atmósfera no es completamente transparente a la radiación infrarroja, información que puede ser atenuada al pasar a través de ella y la cual también puede emitir radiación. Para ello existen unos factores de corrección que dependerán de una serie de parámetros, tales como la distancia al objeto, humedad relativa (H₂O), temperatura del aire en grados Centígrados, Fahrenheit o Kelvin según el tipo de equipo.

Emisividad: Como no todos los cuerpos cuando aumentan su temperatura pueden radiar energía de la misma forma, esta dependerá del tipo de material. Un cuerpo con diferentes emisividades puede lucir como si estuviese sobre-calentado en varios puntos, a este efecto debe tenerse cuidado porque mientras la emisividad sea menor la reflectividad aumenta, a estos engañosos puntos se les mira desde diferentes ángulos y alturas con el equipo para certificar si son producidos por algún reflejo.

Velocidad del Viento: El efecto refrigerante producido por la velocidad del viento, es uno de los factores a tener en cuenta en un análisis termográfico.

Campos magnéticos: Las corrientes eléctricas pesadas causan fuertes campos magnéticos, los cuales pueden causar una distorsión considerable en la imagen térmica.

Lluvia: La lluvia tiene un efecto enfriante superficialmente en un equipo. Las mediciones termográficas se pueden realizar con resultados satisfactorios durante una

caída de lluvia ligera, las lluvias pesadas disminuyen la calidad de la imagen. (CASTILLO, 2010)

2.11.4 *Criterios de análisis termográfico para sistemas eléctricos.* Para evaluar la severidad de una falla, se usa el Criterio Delta de Temperatura. En este criterio, se determina la diferencia de temperaturas entre el punto que presenta la falla y un punto de referencia. Esta referencia presenta típicamente la temperatura ambiente o es un equipo que está trabajando a las mismas condiciones del equipo comparado.

En el criterio Delta de temperatura existen normas o estándares usados por Termógrafos para evaluar y/o clasificar la diferencia de temperatura resultante:

Los criterios establecidos por la Internacional Electric Testing Association -NETA MTS-1995-, los cuales proporciona rangos muy estrictos para la clasificación de temperaturas.

Las normas establecidas por las fuerzas militares de los Estados Unidos para equipos eléctricos -MIL-STD-2194(SH)-, basados contrariamente a la anterior, en rangos muy amplios de temperaturas.

En la tabla 6, se muestra los criterios para ayudar a determinar el grado de severidad de un problema eléctrico, según la norma NETA, el cual este proyecto se va a orientar.

Tabla 6. Criterios de severidad de un problema eléctrico según NETA

Nivel	Temperatura medida	Clasificación	Acción
1	1°C a 10°C O/A 1°C a 3°C O/S	Posible deficiencia.	Se requiere mayor información.
2	11°C a 20°C O/A 4°C a 15°C O/S	Probable deficiencia.	Reparar en la próxima parada disponible.
3	21°C a 40°C O/A >15°C O/S	Deficiencia.	Reparar tan pronto como sea posible.
4	>40°C O/A >15°C O/S	Deficiencia mayor.	Reparar inmediatamente.
O/A= Sobre temperatura ambiente.			
O/S= Sobre temperatura de cuerpo similar en condición.			

Fuente: Norma NETA

Las especificaciones de temperatura varían en exactitud dependiendo del tipo de equipo. Como apoyo a estos criterios de diagnóstico es conveniente tomar nota del nivel de carga y balance de corrientes en sistemas trifásicos. Es por ello que la persona que se desempeña en la inspección eléctrica sea entrenada y experimentada en lo concerniente a los aparatos y sistemas que estén siendo evaluados.

CAPÍTULO III

3. ANÁLISIS DE MODOS DE FALLOS EN CONDUCTORES ELÉCTRICOS

Desde la década de los 60's hasta la actualidad el uso del AMEF (Análisis de Modos y Efectos de Fallos) es muy importante ya que el documento de la ISO 9001:2008 y la ISO/IEC 17020: 2004 establece criterios generales para el funcionamiento de los diversos tipos de inspección, los mismos que tienen el objeto de desarrollar un sistema de gestión de calidad para ofrecer la mejora continua, haciendo hincapié en la prevención de defectos y reducción de las fallas, garantizando un sistema estándar de gestión medio ambiental, este documento permite establecer un propio criterio y organización.

Para el análisis de modos de fallos y efectos en conductores eléctricos se empleó el AMEF, herramienta utilizada para analizar, determinar, prevenir y evaluar las consecuencias que pueden ocasionar una falla en los conductores eléctricos permitiendo definir adecuadamente la función en base a su contexto operacional, para el desarrollo de este análisis se guío en el flujograma de proceso descrito en la figura 8, el mismo que tiene la siguiente estructura descrita a continuación:

3.1 Selección del grupo de trabajo

El grupo de trabajo estará conformado básicamente de las siguientes personas:

- Operador. Experto en el manejo y operación del equipo.
- Mantenedor. Experto en reparación y mantenimiento del equipo.
- Programador. Experto con visión sistémica de la actividad.
- Especialistas. Experto en áreas específicas.
- Ingeniero de procesos. Experto con visión global del proceso.

3.2 Establecer el tipo de AMEF a utilizar, sus límites y objetivos

Antes de establecer los límites y objetivos que se desean alcanzar, hay que distinguir el tipo de AMEF empleado tres tipos básicos:

Producto/Diseño, proceso y maquinaria.

En este proyecto el AMEF empleado es de Diseño ya que se enfoca en los modos de falla asociados al funcionamiento de un componente en este caso de los conductores eléctricos.

3.3 Aclarar funciones del proceso analizado

Para aclarar este paso se identifica y entiende las funciones. Las funciones más evidentes de un activo en este caso las funciones que los conductores eléctricos realizan, cuyas funciones pueden ser:

- Funciones primarias.
- Funciones secundarias.
- Funciones de protección.
- Funciones de control.
- Funciones subsidiarias.

3.4 Determinar la falla funcional

En esta etapa del proceso se establece la forma en que un sistema opera fuera de los parámetros normales o deseados, en este proyecto los conductores eléctricos transportan 6,4A de corriente nominal a la bomba CP 660 del módulo de trabajo con un conductor sub dimensionado. Para a partir del cálculo adecuado y la determinación oportuna del conductor apropiado mediante el método correcto proceder a disminuir el área del cable acorde al tiempo de trabajo requerido, de esta forma observar el tipo de pérdida ya sea eléctrica o térmica en los elemento a analizar.

3.5 Determinar los modos potenciales de falla

Para determinar los modos de fallo se establece las posibles causas físicas que originan la aparición de la falla, en los conductores eléctricos en el sistema de potencia se puede apreciar una sobrecarga en las líneas, esta se lo realiza incrementando la carga en el consumidor pertinente y así ampliar el flujo de corriente en el conductor pudiendo originar un cable quemado, presentar picaduras, fracturas, etc.

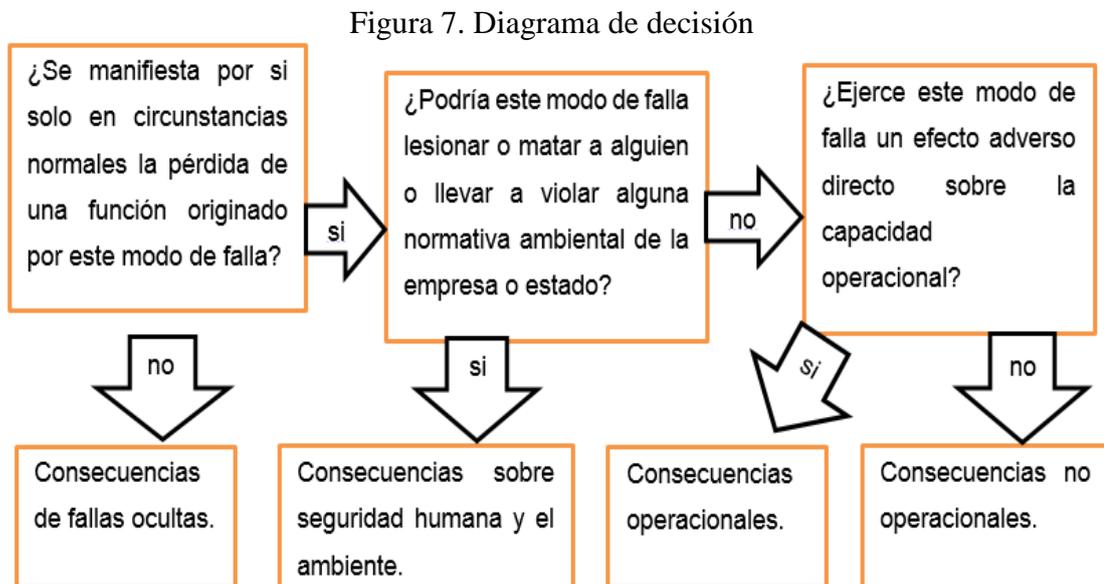
3.6 Determinar los efectos potenciales de falla

En esta etapa se identifican los síntomas de los modos de falla de los conductores eléctricos.

- Calentamiento en conductores
- Pérdida de potencia
- Efecto Joule
- Diámetro inadecuado del conductor eléctrico de potencia

3.7 Determinar las consecuencias potenciales de falla

Para determinar las consecuencias de la falla este proyecto se guiará en la figura 7, en el diagrama de decisión, dónde se responde a las preguntas correspondientes a cada modo de falla con su respectiva consecuencia.



Fuente: GIDME

3.8 Identificar los sistemas de controles actuales

Para identificar y evaluar la habilidad de los controles para detectar fallas o prevenir que continúen a lo largo del proceso, se debe analizar el sistema del mismo, especificando si se realiza inspección, muestreo o programa para la medición periódica.

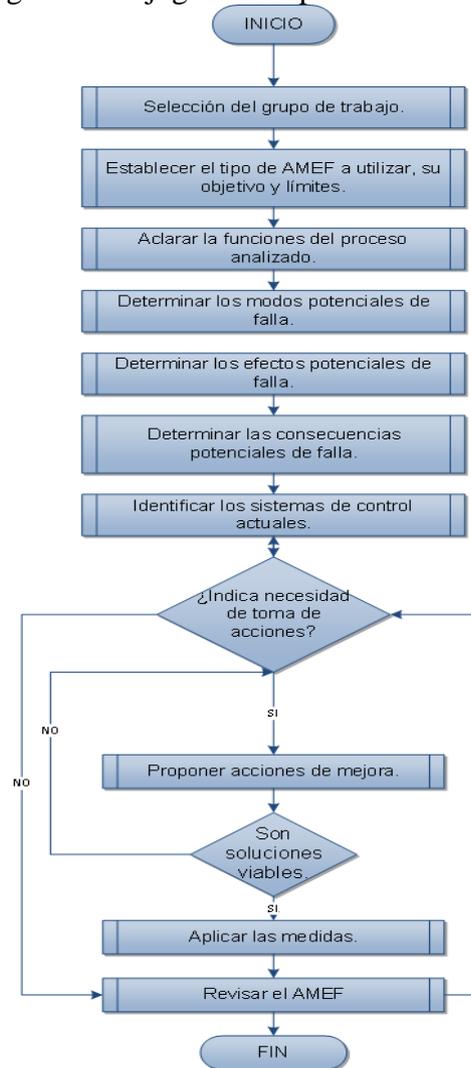
3.9 Proponer acciones de mejora

Se debe establecer acciones de mejora para reducir las fallas, estableciendo responsables y fijando fechas límites para la implementación de dichas acciones, en este módulo de trabajo se establece medidas para reducir fallas en los conductores eléctricos.

3.10 Revisar el AMEF

Se debe revisar periódicamente el AMEF para determinar la eficiencia de la mejora continua. Este proyecto se guió en el flujograma de proceso de la figura 8, para priorizar los problemas potenciales que se presenten en conductores eléctricos y establecimiento de acciones de mejora que se puedan tomar.

Figura 8. Flujograma de proceso del AMEF



Fuente: Autor

3.11 AMEF de conductores eléctricos

En la tabla del anexo D se detalla el AMEF de conductores eléctricos, dónde se desarrolla todo los puntos del flujograma de proceso establecido. Al momento de analizar los diferentes modos de falla que existe en el circuito de potencia requerido para la bomba eléctrica de agua CP 660 se determina que el principal problema es el sub dimensionamiento del conductor el cual produce el incremento de temperatura en el mismo, producto de la pedida de potencia a consecuencia de una caída de tensión. Por lo que es esencial elegir la sección adecuada del conductor. Pero para fines de investigación se procederá a subdimensionar desde el conductor adecuado hasta un número 24

CAPÍTULO IV

4. IMPLEMENTACIÓN Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

Antes de realizar la construcción del módulo de trabajo, se inició con la descripción de todos los elementos que conforman y permiten el normal funcionamiento de una bomba CP 660, este módulo consta de un disyuntor de 30A, un contactor de 9A, un relé térmico, conductores de distinta medida para pruebas a partir del número 14 AWG, una bomba centrífuga de 2 Hp trifásicos, los equipos de inspección, la cámara termográfica como el analizador trifásico de energía y otros más, los mismos que se observan en la figura 9.

Figura 9. Equipos que conforman el módulo de trabajo



Fuente: Autor

4.1 Descripción y características de los equipos que conforman el módulo de trabajo

4.1.1 Descripción de la bomba CP 660. La bomba que se observa en la figura 10, está ubicada en el Laboratorio de Mantenimiento Predictivo de la Escuela de Ingeniería de Mantenimiento, su funcionamiento y utilización es para prácticas técnicas en el mismo laboratorio. Se encuentra anclada a un bastidor de metal, además de la carga que se le va a efectuar es mediante refrigerante de carro utilizado como fluido de succión y descarga.

Figura 10. Bomba centrífuga CP 660



Fuente: Manual electrobombas centrífugas

En este proyecto la bomba centrífuga se encarga de bombear agua limpia, sin sustancia abrasivas o líquidos químicos no contaminantes, es decir es solo el medio para conseguir la visualización de la falla en los conductores eléctricos de potencia, ya que se trata de darle mayor o menor cantidad de corriente a los mismos, el cual se logra a través de la bomba de agua CP 660 abriendo o cerrando la válvula del mismo, alterando la carga del motor de la bomba, para provocar la falla. Las características de la bomba esta detallada en la tabla 7.

Tabla 7. Características de la bomba centrífuga CP 660

Marca	PEDROLLO
Modelo	CP 660
Caudal	160 l/min
Familia	Centrífugas
Altura máxima	47,5m
Altura mínima	28 m
Potencia	2 HP
Temperatura ambiente	+40 °C
Frecuencia	60 Hz
Consumo energético	1,5 kW
Corriente nominal	6,4 A
Voltaje	220 V

Fuente: MANUAL ELECTROBOMBAS CENTRÍFUGAS

4.1.2 Manómetro de presión de agua. El manómetro o medidor de presión de agua que se observa en la figura 11, sirve para controlar visualmente la presión con la que circula el fluido a través del sistema de descarga, cuyas características están detalladas en la tabla 8.

Figura 11. Manómetro de presión del agua



Fuente: Autor

Tabla 8. Características del manómetro de presión del agua

Marca	Paolo
Presión	200 PSI
De rosca	¼ plg
Cara	2 plg

Fuente: Autor

4.1.3 Válvula de compuerta. La válvula de compuerta que se observa en la figura 12, permite el paso de fluido a través de sistema, abriendo y cerrando mediante el levantamiento de una cuchilla o compuerta para el paso del agua.

Figura 12. Válvula de compuerta



Fuente: Autor

Tabla 9. Características de la válvula de compuerta

Tipo	De compuerta
Material	Bronce
Presión operativa	200 PSI
DN	Min:0,25 plg Máx: 4 plg

Fuente: Autor

4.1.4 Tubería de agua. La tubería de agua que se observa en la figura 13, permite transportar el fluido a través del sistema, el diámetro de esta tubería está determinada según las bocas DN1 y DN2 del manual de la bomba CP 660.

Figura 13. Tubería de agua



Fuente: Autor

Tabla 10. Características de la válvula de compuerta

Material	PVC
Diámetro tubería de succión	1 ¼ plg
Diámetro tubería de descarga	1 plg
Largo	2 m
Presión operacional	200 psi

Fuente: Autor

4.1.5 Recipiente plástico. El recipiente de agua que se muestra en la figura 14, es una caja plástica transparente que permite contener el fluido del sistema.

Figura 14. Recipiente plástico



Fuente: Autor

Tabla 11. Características del recipiente plástico

Material	PVC
Color y forma	Transparente rectangular
Dimensiones	50x75x30(cm)

Fuente: Autor

4.1.6 Tablero de control eléctrico. El tablero de control eléctrico que se observa en la figura 15, es una caja que contiene los dispositivos de conexión, maniobra, y mando.

Figura 15. Tablero de control eléctrico



Fuente: Autor

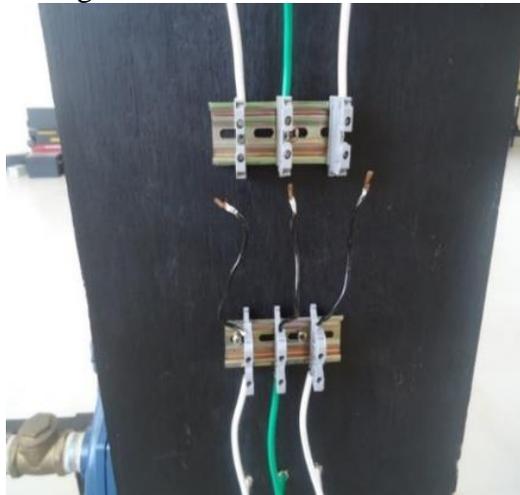
Tabla 12. Características del tablero de control eléctrico

Tamaño	50x 75 x 25 mm
Color	Crema
Material	Metal

Fuente: Autor

4.1.7 Descripción de los conductores eléctricos. Los conductores eléctricos que se observan en la figura 16, conducen la energía eléctrica de un punto hacia otro punto, cuyo calibre de conductor se determinó de la corriente nominal de la placa de la bomba de 6,4 A, a partir de este, se disminuyó el calibre para el análisis respectivo del mal dimensionamiento de los cables que transportan energía eléctrica. Además se procedió a pintarlos de color negro el punto a ser analizado para regular la reflexión de elementos externos que emanen radiación.

Figura 16. Conductores eléctricos



Fuente: Autor

Tabla 13. Características de los conductores eléctricos

Calibre AWG	24
Sección en mm ²	0,20
Diámetro del conductor mm	0,51
Espesor aislación mm	0,18
Diámetro exterior aproximado mm	0,72
Peso aproximado kg/ km	3

Fuente: COVISA

4.1.8 Descripción del disyuntor. El disyuntor o interruptor eléctrico que se observa en la figura 17, es un aparato capaz de interrumpir o abrir el circuito eléctrico cuando por el circula un exceso de corriente eléctrica o cortocircuito, evitando daños en los equipos, cuyas características se encuentran detalladas en la tabla 14.

Figura 17. Disyuntor



Fuente: Autor

Tabla 14. Características del disyuntor

Marca	CNC
Número de modelo	YCL7-63
Dimensiones	54x77
Corriente	30 A
Espesor aislación mm	1-63
Tensión	230/400 V
Lugar de origen	China

Fuente: COVISA

4.1.9 Descripción del contactor. Este se observa en la figura 18, es un dispositivo que interrumpe el paso de corriente eléctrica, tan pronto se de tensión a la bobina.

Figura 18. Contactor



Fuente: Autor

Tabla 15. Características del contactor

Fabricante	LS
Serie/Modelo	Metasol
Control	CA o CC
Contacto principal	3 polos MC-9b
Voltaje de bobina	220 VAC
Corriente	9 A
Contactos auxiliares	1NO+ 1NI

Fuente: COVISA

4.1.10 Descripción del relé térmico. El relé térmico que se observa en la figura 19, es un aparato capaz de proteger la bomba contra las sobrecargas débiles y prolongadas, optimizando la durabilidad y continuidad de trabajo del equipo.

Figura 19. Relé térmico



Fuente: Autor

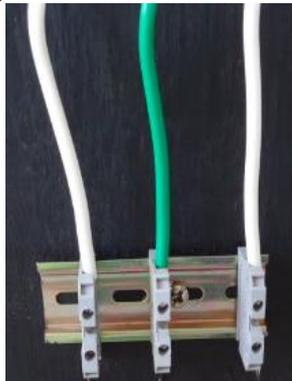
Tabla 16. Características del relé térmico

Marca	STECK
Modelo	S-D225Z1G
Ui	660V
Clase de disparo	10 A
Contacto auxiliar	AC-15
Ue	230V / 400V
Ie	1,57A / 0,9A

Fuente: COVISA

4.1.11 Descripción del cable electrocable. Es un conductor unifilar de cobre recubierto de un material aislante o protector, utilizado para realizar las conexiones eléctricas entre los diferentes componentes del tablero de control y la bomba, los mismos se observan en la figura 20.

Figura 20. Cable Electrocable



Fuente: ELECTROTELECOM

Tabla 17. Características del cable electrocable

Color	Distintos
Calibre #	14
Voltaje	0-220V AC y DC
Estructura	1 cable de cobre y aislante termoplástico

Fuente: AUTOR

4.1.12 Cable flexible. Es un conductor multipolar que sirven para la interconexión de equipos, alimentación o que por su trabajo tenga reubicación frecuente, en su estructura

el conductor es de cobre y aislante termoplástico PVC o ya sea de diferente material, trabaja hasta temperatura máxima de 60°C.

En la figura 21 se observa la estructura interna y externa de cable flexible.

Figura 21. Cable flexible



Fuente: ELECTROTELECOM

Tabla 18. Características del cable flexible

Calibre	3x14
Espesor de aislamiento	1,14 mm
Sección	2,08 mm ²
Diámetro exterior	11,8 mm
Capacidad de corriente para un conductor al aire libre	15 A

Fuente: AUTOR

4.1.13 Descripción del analizador trifásico de energía y calidad de energía eléctrica. El analizador que se observa en la figura 22, es una herramienta de mano capaz de determinar cuanta energía se está derrochando, permitiendo calcular los costes de consumo adicional.

Figura 22. Analizador trifásico de energía



Fuente: FLUKE 435-II

Tabla 19. Características del analizador trifásico de energía

Tamaño.	265 x 190 x 70 mm.
Peso.	2 kg incluido la batería estándar.
Alimentación de red.	Adaptador conmutable de 115 V, 230 V con enchufe adaptado al país.
Tensión de entrada del adaptador de alimentación.	15, 23 VCC utilizar únicamente el adaptador de alimentación BC430.
Tiempo de funcionamiento de batería BP290.	6,5 horas con retroiluminación normal. 8 horas con retroiluminación atenuada. 10,5 con pantalla apagada.
Frecuencia.	50 a 60 Hz.
Temperatura de trabajo	0°C, +40°C, + 50°C excluida batería.

Fuente: MANUAL FLUKE 434-II, 435-II, 436-II

4.1.14 Descripción de cámara termográfica. La cámara termográfica que se observa en la figura 23, está ubicada en el Laboratorio de Mantenimiento Predictivo, esta cámara permite capturar las distintas diferencias de temperatura de los conductores eléctricos, permitiendo detectar la falla del mismo.

Figura 23. Cámara termográfica



Fuente: FLUKE

Tabla 20. Características de la cámara termográfica

Características de ergonomía	Tamaño compacto, ligero, diseño de bolsillo.
Tipo de batería	VT04: Recargable de ion litio VT04A: Cuatro (4) pilas AA.
Opciones de alineación	NEAR: <23 cm (9 plg.) desde el objetivo FAR: >23 cm (9 plg.) desde el objetivo

Tabla 20 (continuación) Características de la cámara termográfica

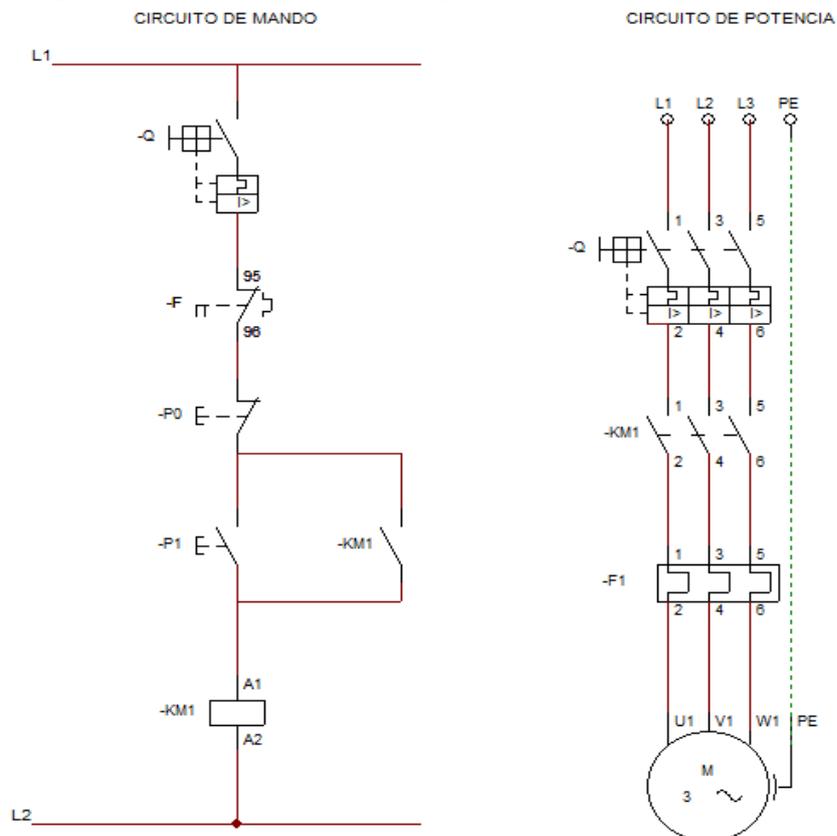
Campo de visión	28° x 28°: el campo visual ajustado permite ver el objetivo con más detalle.
Rango de medida de temperatura	De -10 °C a +250 °C (de 14 °F a 482 °F)
Sistema de enfoque	Sin enfoque
Alarma de temperatura alta/baja	Sí, las alarmas de temperaturas altas y bajas parpadean cuando se excede el límite de temperatura, avisándole de que la temperatura se encuentra fuera del intervalo previsto.
Marcadores de punto más caliente y más frío	Sí, identifique inmediatamente los puntos más caliente y más frío en su imagen.
Software	El software Professional SmartView® le permite optimizar y analizar las imágenes, crear informes rápidos y exportar las imágenes en diversos formatos.

Fuente: MANUAL FLUKE

4.2 Diseño y construcción del módulo de trabajo

4.2.1 *Diseño del módulo de trabajo.* Luego de la selección de los elementos de control, se realiza el diseño del módulo y se procede a armar el tablero de trabajo, en base a los circuitos de control y potencia que se observan en la figura 24.

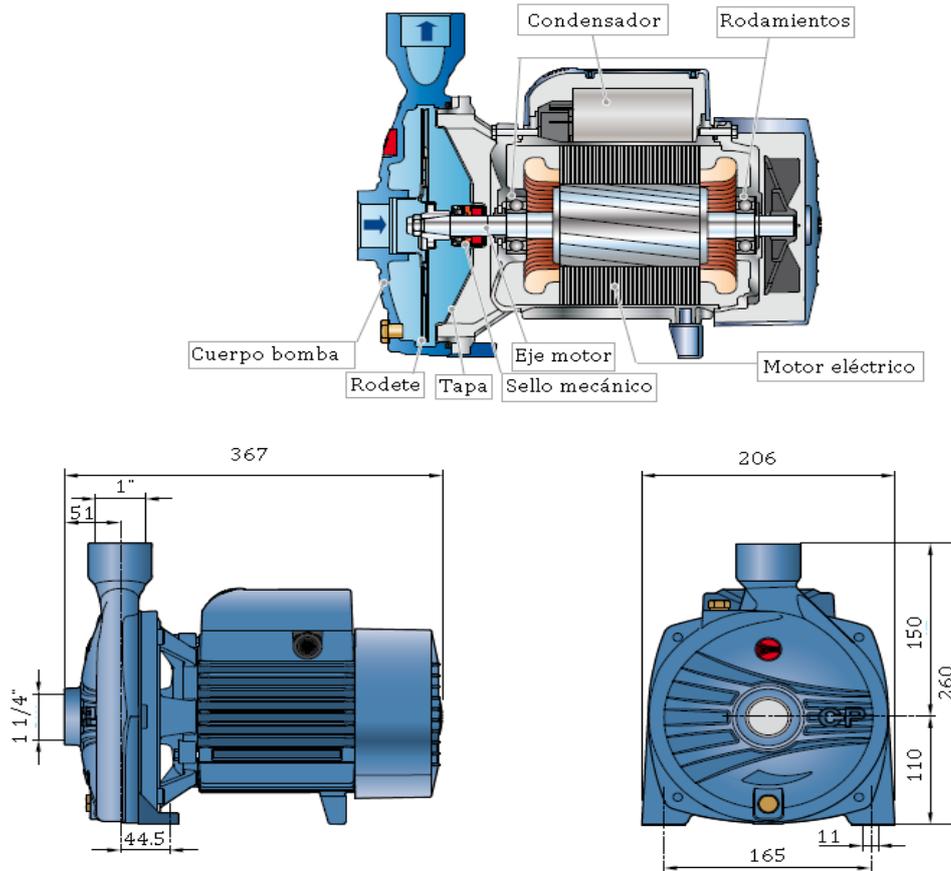
Figura 24. Circuito de mando y potencia del módulo de trabajo



Fuente: Autor

4.2.2 Selección de la bomba para el módulo de trabajo. Para seleccionar la bomba centrífuga para agua limpia o referente de auto, se tomó en consideración la función y el objetivo de este proyecto, en dónde la bomba es el medio para conseguir la visualización de la falla en los conductores eléctricos de potencia, dándole mayor o menor cantidad de corriente a los mismos, para provocar la falla, cuyos componentes y dimensiones se observan en la figura 25.

Figura 25. Componentes y dimensiones de la bomba CP660

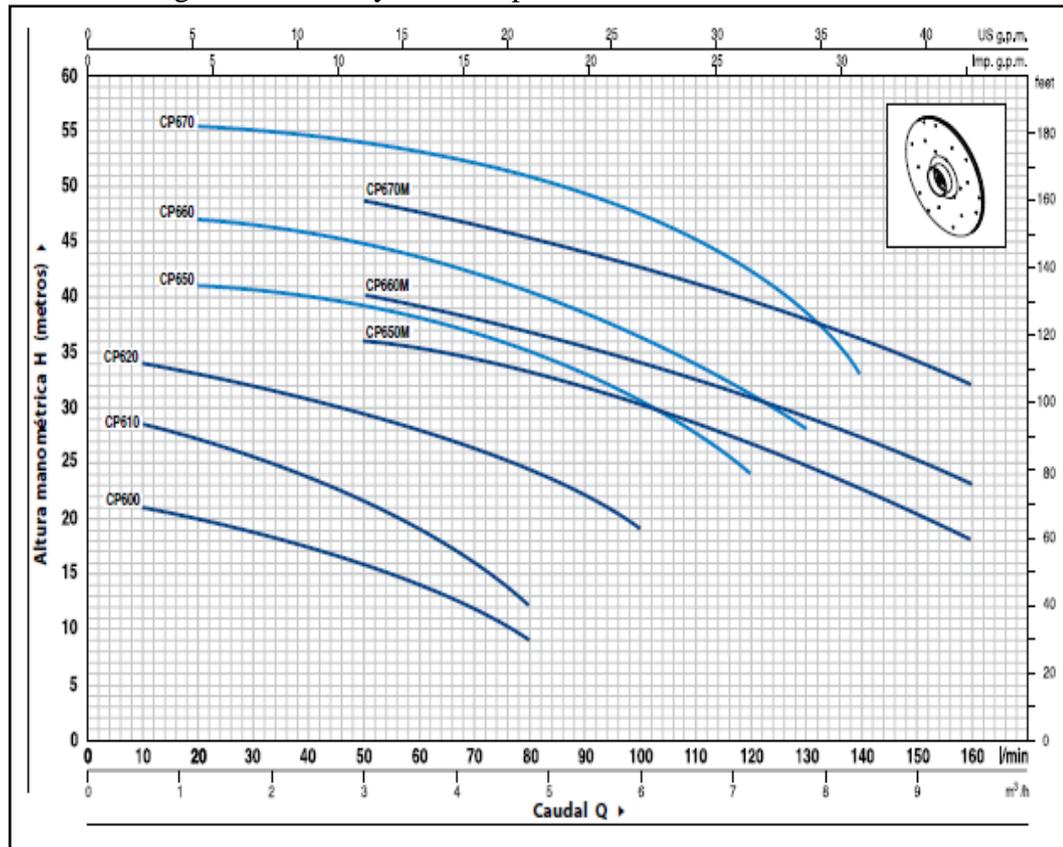


Componente	Características constructivas
Cuerpo bomba	Hierro fundido, con bocas roscadas ISO228/1
Tapa	Acero inoxidable AISI 304
Rodete	Acero inoxidable AISI 304
Eje motor	Acero EN10088-3
Sello mecánico	Grafito, Cerámica, NBR
Rodamientos	6204ZZ/6204ZZ
Condensador	31,5 Mf 450 VL 31,5 (200V)
Motor eléctrico	220/380V – 60Hz

Fuente: Manual electrobombas centrífugas

Dónde la curva de datos y prestaciones de la bomba se detallan en la figura 26. Cuyo consumo en amperios esta detallada en la tabla 21 se debe tener en cuenta la capacidad de la bomba en descarga en función a la tabla ya que es indispensable para el estudio pertinente por la relación que tiene con la presión del elemento sensor ubicado en el módulo.

Figura 26. Curva y datos de prestaciones de la bomba CP660



Modelo	Potencia		Q m³/h l/min	0	0,6	1,2	1,8	2,4	3,0	3,6
	kW	HP		0	10	20	30	40	50	60
CP660	1,5	2	H metros	48	47,5	47	46,5	46	45	43,5

Fuente: Manual electrobombas centrífugas

Tabla 21. Consumo de corriente en amperios

Modelo	Tensión				
	220 V	380 V	660 V	220 V	440 V
Trifásica CP660					
Corriente	6,7 A	3,9 A	2,3 A	6,4 A	4,1 A

Fuente: Manual electrobombas centrífugas

4.2.3 Selección del calibre del conductor eléctrico. Para la selección del calibre de conductor se toma como referencia la corriente nominal de la placa que es de 6,4 A, y a partir de éste se disminuye el calibre y la distancia del mismo.

Esta selección del calibre del conductor se realiza mediante el cálculo de su sección para poder determinar su calibre correspondiente mediante la tabla del anexo A.

Datos:

Temperatura ambiente = 18,1°C.

I = 6,4 A

L = 2m

Potencia = 2 Hp

C = 1,02

U = 220 V

$\rho = 0,018 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$

Para la selección de calibre se emplea la siguiente fórmula donde el valor de $\Delta U = 0,125$ V y $\cos\phi = 0,6$ se detalla en el anexo B y en el anexo C se explica otro método más práctico de selección con tablas.

$$s = \frac{\sqrt{3} \cdot \rho \cdot L \cdot I \cdot \cos\phi}{\Delta U} \quad (11)$$

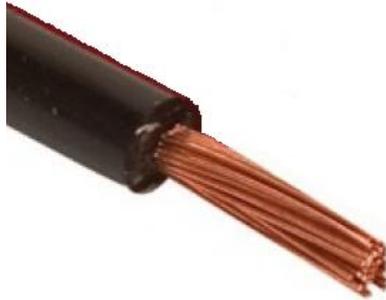
$$s = \frac{\sqrt{3} \cdot 0,018\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m} \cdot 2\text{m} \cdot 6,4\text{A} \cdot 0,6}{0,125}$$

$$s = \frac{0,27}{0,125} \text{mm}^2$$

$$s = 1,91 \text{mm}^2 \text{ Calibre 14}$$

A partir de los datos obtenidos en la placa nominal del consumidor y fichas de tabla se determina el calibre adecuado para optimizar el consumo de energía eléctrica. Cabe recalcar que el estudio que se realiza en la presente investigación inicia a partir de este calibre para proceder a subdimensionar la sección, provocando así el calentamiento y siendo propicio el estudio y comportamiento de los conductores de potencia eléctricos.

Figura 27. Conductor calibre 14



Fuente: Autor

Con la sección del conductor 14 AWG de la figura 27, se confirma que la resistencia al paso de la corriente disminuirá, como se demuestra a continuación:

$$S = 1,91 \text{ mm}^2.$$

$$\rho_{\text{cobre}} = 0,018 \text{ } \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$$

$$L = 2\text{m}$$

$$R = \rho * \frac{L}{S} = 0,018 \text{ } \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m} * \frac{2\text{m}}{1,91 \text{ mm}^2} = 0,018 \text{ } \Omega \quad (12)$$

En este proyecto se trata de mal dimensionamiento del calibre del conductor para observar y realizar un análisis de las fallas tanto por termografía como de análisis energético, se tomó el de calibre 24 AWG de la figura 28 con una sección mucho menor, dónde la resistencia al paso de corriente aumentará y se producirá la falla.

$$R = \rho * \frac{L}{S} \quad (13)$$

$$R = 0,018 \text{ } \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m} * \frac{2\text{m}}{0,3247 \text{ mm}^2}$$

$$R = 0,11 \text{ } \Omega$$

Figura 28. Conductor calibre 24



Fuente: Autor

4.2.4 *Procedimiento para la construcción del módulo de trabajo y pruebas de funcionamiento.* A continuación se detallará el procedimiento a seguir para la construcción del módulo de trabajo:

Primero se realizó la construcción del bastidor o soporte de la figura 29, según las dimensiones de diseño ya elaborado y se realizó el anclaje de la bomba CP660.

Figura 29. Bastidor o soporte del módulo de trabajo



Fuente: Autor

Se realizó el montaje y conexión eléctrica de todos los elementos en el tablero de control eléctrico y de la bomba centrífuga, como se observa en la figura 30.

Figura 30. Montaje y conexión eléctrica



Fuente: Autor

A continuación se realizó la conexión del sistema de succión y descarga del módulo de trabajo, con todos sus accesorios, como se indica en la figura 31.

Figura 31. Conexión del sistema de succión, descarga y demás accesorios



Fuente: Autor

4.2.5 *Prueba de funcionamiento.*

La prueba de funcionamiento del módulo de trabajo se realizó de la siguiente manera:

Se colocó en el modular una placa negra protectora de emisividad para controlar la temperatura que emitía el motor eléctrico, ya que los cables de potencia se encuentran cerca.

Se conectó los conductores eléctricos de potencia a su respectiva conexión en triángulo.

Se conectó a la alimentación de 220 V AC para energizar el módulo.

Luego se accionó el interruptor en encendido del tablero de control del módulo

Y se verificó en el manómetro la presión requerida.

Después de 2 horas se realizó la verificación del aumento de temperatura en los conductores eléctricos de potencia.

4.3 **Procedimiento para la medición de pérdidas de energía en conductores eléctricos.**

4.3.1 *Medición de pérdidas de energía en conductores eléctricos de potencia utilizando la cámara termográfica.* Al momento de tomar los datos iniciales se detectó que la temperatura del motor influía en los cables de potencia, además al ser un circuito cerrado la de succión y descarga también se presenciaba calentamiento en el fluido.

Por lo que al no ser un dato creíble la termografía se procedió a colocar el circuito de potencia por la parte posterior del módulo, en especial el punto a ser analizado cubriéndolo con una plancha aislante de color negro para de esa manera evitar la transferencia de calor del motor y fluido hacia los conductores de potencia de esa manera obtener medidas confiables.

Figura 32. Vista posterior y frontal del circuito de potencia



Fuente: Autor

4.3.1.1 *Inspección visual y mecánica.*

Inspeccionar de condición física, eléctrica y mecánica del equipo.

Remover todas las cubiertas necesarias a priori para la inspección termográfica.

Utilizar todos los equipos de seguridad y protección personal apropiados.

El equipo inspeccionado debe incluir todos los dispositivos que transporten corriente.

4.3.1.2 *Parámetros de prueba.* Inspeccionar sistemas de distribución con equipos de imágenes capaces de detectar una diferencia de temperatura mínima de 1°C a 30°C, como se muestra en la figura 23

El equipo debe detectar la radiación emitida y convertir la radiación detectada a una señal visual. Las inspecciones termográficas deben ser realizadas durante periodos de carga

máxima posible pero no menos del 40% de la carga promedio del equipo eléctrico que están siendo inspeccionados.

4.3.1.3 *Valores de prueba.* Este es uno de los aspectos más relevantes de esta norma, como apoyo al proceso de análisis de los resultados por inspección termográfica, basados en los criterios para ayudar a determinar los grados de severidad de un problema eléctrico mediante la norma NETA, de la tabla 6.

4.3.1.4 *Reportes o informes de termografía.* Las recomendaciones de la norma NETA son las siguientes:

- Descripción del equipo inspeccionado.
- Discrepancias.
- Diferencia de temperatura entre el área concerniente y el área de referencia.
- Causa probable de la diferencia de temperatura.
- Áreas inspeccionadas. Identificar las áreas y equipos inaccesibles o inobservables.
- Identificar las condiciones de carga en el momento de la inspección.
- Tomar fotografías o termogramas de área deficiente.
- Acción recomendada.

Mediante las recomendaciones de la norma NETA e informes reales que se aplican en la actualidad en empresas industriales reales, en el siguiente capítulo se permite observar los deltas de temperatura, de esa manera emitir un criterio acerca del incremento de temperatura de manera gradual al momento de sub dimensionar el conductor de potencia.

4.3.2 *Medición de pérdidas de energía en conductores eléctricos de potencia utilizando el analizador trifásico de energía.* Antes de realizar las mediciones se debe conocer como ejecutar las conexiones al sistema de distribución eléctrica en prueba y cómo ajustar los valores del analizador, pero antes de tomar la medición se debe verificar las siguientes características:

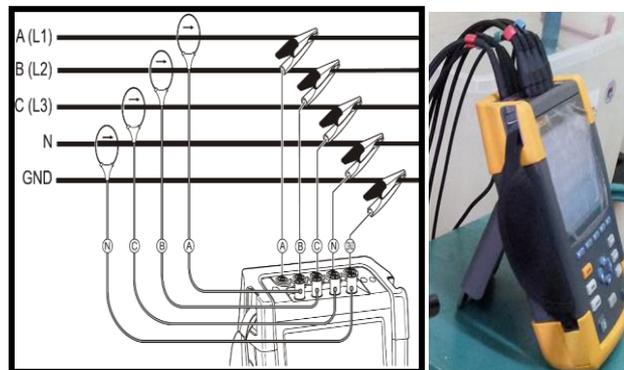
- Configuración de cableado.
- Tensión nominal.
- Frecuencia nominal.

- Límites utilizados para la supervisión de calidad de la energía eléctrica y sus eventos.
- Propiedades de los cables de conexión y pinzas amperimétrica.

4.3.2.1 *Conexión del analizador trifásico de energía.* Para ejecutar las conexiones primero se desactiva siempre los sistemas de alimentación antes de realizar las conexiones.

Luego colocar las pinzas amperimétrica alrededor de los conductores de fase L1, L2, L3 y N. En un sistema trifásico, realizar las conexiones como se muestra en la figura 33.

Figura 33. Conexión del analizador a un sistema de distribución trifásico



Fuente: FLUKE 435-II

A continuación se debe realizar las conexiones de tensión, siempre se empieza con la conexión a tierra y después en sucesión de N, L1, L2, L3.

4.3.2.2 *Configuración del analizador trifásico de energía.* Antes de realizar una medición se configura el analizador según la tensión de línea, la frecuencia y configuración de cableado del sistema de alimentación que se desee medir.

4.3.2.3 *Medición del sistema trifásico del módulo de trabajo con el analizador de energía.* Para acceder a la pantalla del multímetro FLUKE 435-II, y poder realizar las mediciones de voltio, amperios, frecuencia, fluctuaciones, armónicos, potencia y energía se realiza los siguientes pasos:

Para poder manejar con facilidad el analizador se debe tener en cuenta las teclas de funciones disponibles, los mismos que son:

F1, es la tecla de arriba y abajo, utilizada para desplazarse por la pantalla del multímetro.

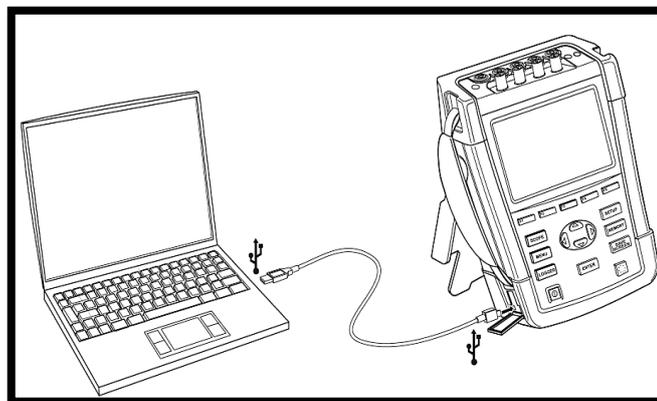
F3, es la tecla de acceso a la pantalla de tendencia.

F4, es la tecla de acceso a la pantalla de eventos.

F5, es la tecla de cambio entre los modos de actuación de pantalla HOLD (Retención) y RUN (Ejecución). Al cambiar de HOLD a RUN aparece un menú que permite definir la hora de inicio y duración de la medida.

4.3.2.4 *Descarga de datos obtenidos del analizador al PC.* Con la ayuda del software Power Log se puede descargar a un PC u ordenador portátil datos de tendencias y de formas de onda, así como capturas de pantalla, en formato de mapa de bits. La información suministrada con el software Power Log informa detalladamente sobre sus características. La conexión de interfaz que se encuentra detrás de una cubierta anti polvo situada en la esquina inferior izquierda del analizador se conecta mediante un cable USB con el PC como se muestra en la figura 34.

Figura 34. Descarga de datos



Fuente: MANUAL FLUKE

CAPÍTULO V

5. ANÁLISIS DE PÉRDIDA ENERGÉTICA EN CONDUCTORES ELÉCTRICOS

5.1 Análisis de pérdida energética según el mal dimensionamiento en conductores eléctricos

El análisis de pérdida energética de forma teórica, se realizó a conductores eléctricos de diferente calibre y distancia, de forma práctica se desarrolló en el conductor eléctrico calibre 24, apoyado del analizador de energía eléctrico y de la cámara termográfica.

5.1.1 *Análisis teórico de la pérdida energética* según el mal dimensionamiento de varios conductores eléctricos. Antes de analizar las pérdidas energéticas se debe tomar en cuenta la siguiente información obtenida de los mismos equipos que conforman el módulo de trabajo y variables necesarias para obtener los resultados requeridos para el análisis.

Datos:

Temperatura ambiente: 18,1°C

$t_{mes} = 24h \times 30 \text{ días} = 720 \text{ h}$

$I_N = 6,4 \text{ A}$

$C_{calibres} = 8, 12, 14, 22, 24$

S = Obtenida de la tabla ANEXO A

$L = 1, 2, 3, 4, 10, 20 \text{ m}$

P = 2 HP

V = 220V

$\rho_0 = 0,018 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$

Costo kW/h = 0,0933 USD (CONELEC)

Dónde las fórmulas empleadas para realizar el análisis con el empleo de conductores eléctricos de diferentes calibres, son las siguientes: (VIKON, 2010)

Fórmulas:

$$\text{Resistencia: } R = \rho_{\theta} * \frac{L}{S} \quad (14)$$

$$\text{Energía pérdida: } Ep = 3 * R * I^2 * t / 1000 \quad (15)$$

$$\text{Costo de energía pérdida: } Cp = Ep * \$ \quad (16)$$

Los datos obtenidos de la energía pérdida en varios conductores eléctricos, con una longitud de 2m son los siguientes:

Tabla 22. Energía pérdida en varios conductores eléctricos

Calibre	Sección [mm ²]	Resistencia [Ω]	Intensidad [A]	Energía perdida [kW/h]	Costo de energía perdida [USD]
8	8,32	0,004	6,40	0,39	0,04
12	3,29	0,011	6,40	1,07	0,01
14	2,08	0,017	6,40	1,65	0,15
22	0,32	0,109	6,40	10,57	0,99

Fuente: Autor

En la figura 35 se observa claramente que a mayor sección del conductor eléctrico existe menor pérdida de energía eléctrica, sabiendo que la resistencia de los conductores es inversamente proporcional a la sección del conductor. Para el módulo de trabajo de este proyecto según la gráfica se debería tomar el conductor calibre 8 (Anexo A) por presentar menos perdidas, pero se estaría sobredimensionando el conductor, ya que el conductor calibre 14 (Anexo A), tiene la capacidad suficiente para conducir la corriente del módulo de trabajo de 6,4 A.

Figura 35. Costo de energía pérdidas en varios conductores eléctricos



Fuente: Autor

5.1.2 Análisis teórico de la pérdida energética de un mismo conductor eléctrico con diferentes longitudes. Mediante el empleo de diferentes longitudes para un mismo conductor eléctrico calibre 14, con las mismas fórmulas del análisis anterior, se obtiene los siguientes resultados mostrados en la tabla 23.

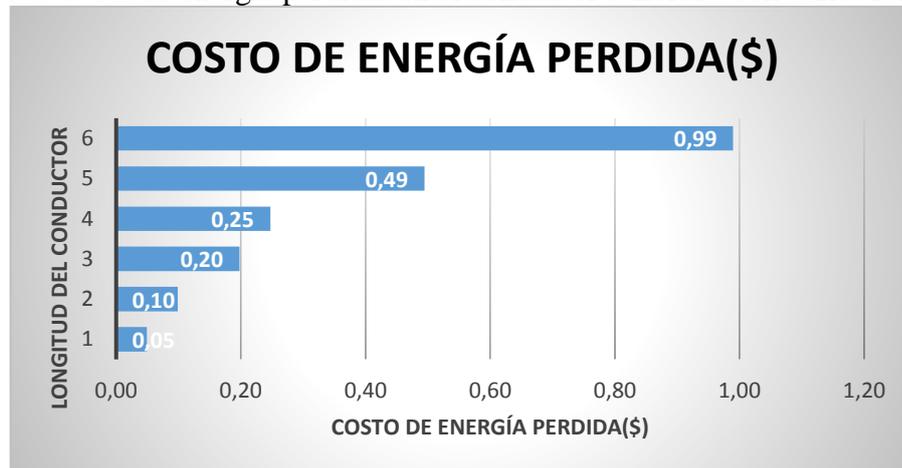
Tabla 23. Energía pérdida en el conductores calibre14 con varias longitudes

Calibre	Sección [mm ²]	Resistencia [Ω]	Intensidad [A]	Energía perdida [kW/h]	Costo de energía perdida [\$]
1	2,08	0,005	6,40	0,53	0,05
2	2,08	0,011	6,40	1,06	0,10
4	2,08	0,022	6,40	2,12	0,20
5	2,08	0,027	6,40	2,65	0,25
10	2,08	0,055	6,40	5,30	0,49
20	2,08	0,109	6,40	10,61	0,99

Fuente: Autor

En la figura 36 se observa que si el camino del conductor eléctrico es muy largo existe mayor resistencia eléctrica chocándose y agolpándose entre sí los electrones, generando más calor con mayor pérdida eléctrica, provocando mayores costos económicos.

Figura 36. Costo de energía pérdidas en el conductor calibre14 con varias longitudes



Fuente: Autor

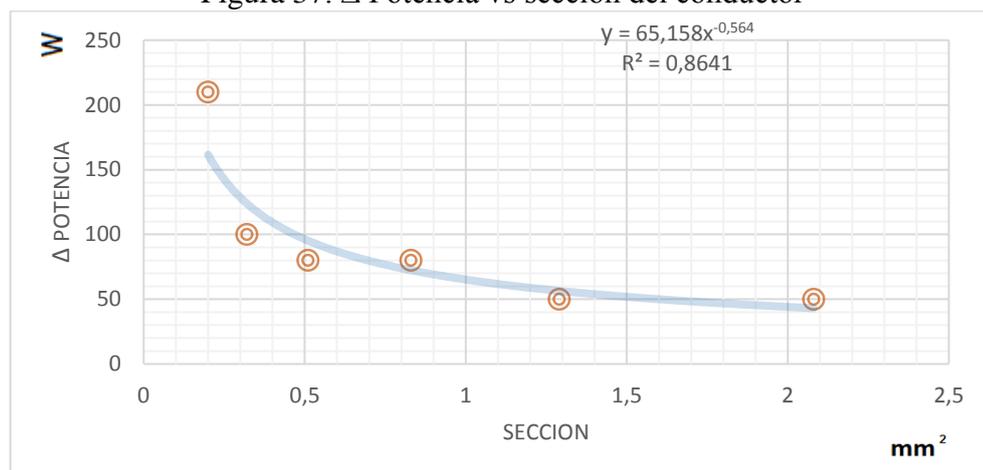
5.2 Estudio práctico de resultados obtenidos mediante termografía y analizador de la calidad energética.

En el siguiente estudio obtenemos resultados confiables basándonos en lo equipos

presentes en el laboratorio de mantenimiento predictivo, además del módulo didáctico que sirve como medio para realizar el estudio pertinente, al momento de ir cambiando cada dos horas la sección del calibre del conductor de potencia desde el número 14 hasta el 24.

5.2.1 *Análisis de la curva de potencia aparente versus la sección del conductor.* La siguiente imagen sale del resultado al obtener los deltas de potencia aparente a partir del valor máximo y mínimo del mismo luego de dos horas de trabajo. El tiempo mencionado se utiliza con cada calibre de conductor, para así obtener el resultado apoyándonos del equipo de analizador de calidad energética. Los datos se los consigue mediante el programa para computador Powerlog propio del equipo. Dichos valores son fuertemente confiables. Estos datos los encontramos en el anexo E

Figura 37. Δ Potencia vs sección del conductor



Fuente: Autor

El comportamiento de los datos al observar en la gráfica obtenida nos presenta una curva tipo potencial. Al analizar los puntos presenciamos que la tendencia es a menor sección de conductor mayor es el delta de potencia aparente, es decir que existe un mayor consumo de energía al disminuir la sección del conductor.

Podemos asimilar la siguiente ecuación:

$$y = [50, 50, 80, 80, 100, 210]$$

$$x = [2,08, 1,29, 0,83, 0,51, 0,32, 0,2]$$

[a a1] = capacidad (x);

[b b1] = capacidad (y);

$$a2 = b1;$$

Regresión logarítmica

$$x\ln = \log(x);$$

$$xx = x\ln.*x\ln;$$

$$xy = x\ln.*y;$$

$$yy = y.*y;$$

$$sxx = \text{sum}(xx);$$

$$sx = \text{sum}(x\ln);$$

$$sy = \text{sum}(y);$$

$$sxy = \text{sum}(xy);$$

Se arma la matriz a resolver para hallar a y b

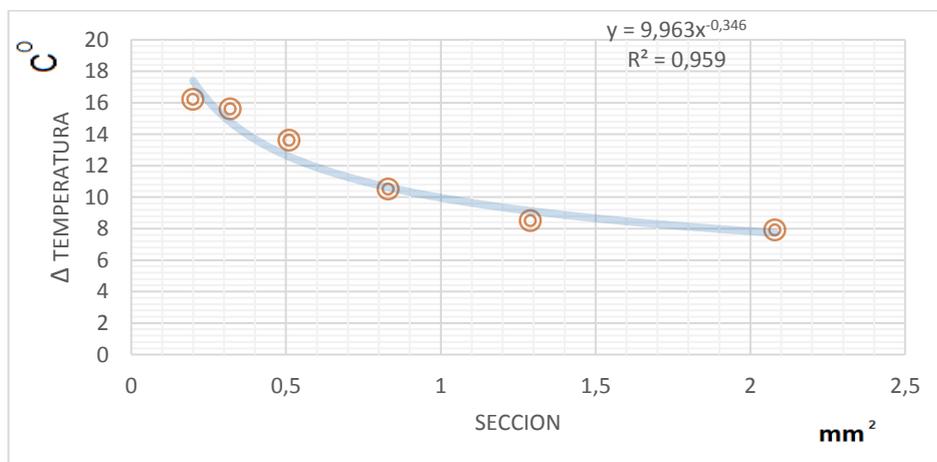
$$d = [sxx \quad sx \quad sxy ; sx \quad a2 \quad sy];$$

Para llegar a la ecuación resolvemos el sistema por el método de Gauss – Jordan

$$y = 65,158x^{-0,564} \quad \text{Reemplazando } \Delta P = 65,158 S^{-0,564} \quad (17)$$

5.2.2 *Análisis de la curva de temperatura vs sección del conductor.* Con respecto a la siguiente grafica los datos obtenidos resultan mediante el mismo método que se lo realizo en el análisis de la curva potencia vs sección, Solo que en este se utiliza un equipo para detectar el aumento de temperatura como es una cámara termográfica. Dicho termo grama sale contemplando todos los aspectos para el análisis que se debe tener en cuenta para el mismo como: distancia, humedad, temperatura ambiente, calibración del equipo. Los datos para la curva son los delta de temperatura que resultan del valor máximo térmico en el conductor eléctrico menos la temperatura ambiente estos lo podemos apreciar en el anexo E.

Figura 38. Δ Temperatura vs sección del conductor



Fuente: Autor

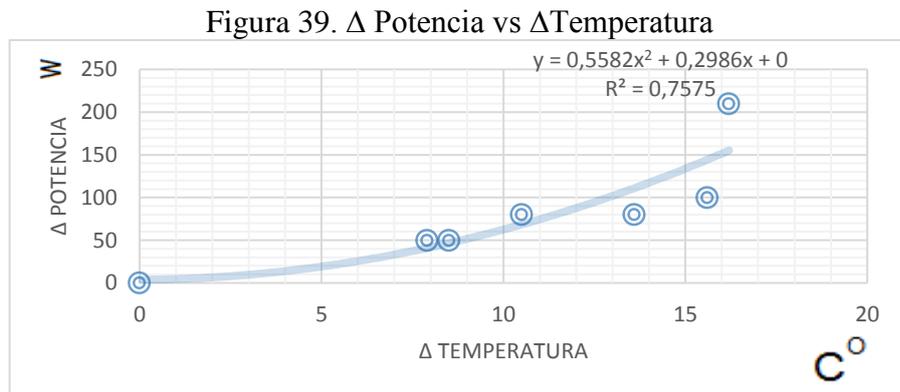
La tendencia de la curva es decreciente, el análisis de dicho comportamiento se debe a

que el calentamiento de los conductores a partir del número 14 hasta el 24 es gradual.

Con referencia a la gráfica anterior podemos notar claramente que aumenta la potencia y a la par la temperatura. Esto quiere decir que la energía eléctrica se disipa en forma de calor siendo una manera ineficiente la de utilizar calibres con menor diámetro. Obtenemos la siguiente ecuación.

$$y = 9,963x^{-0,346} \text{ Reemplazando } \Delta T = 0,963 S^{-0,346} \quad (18)$$

5.2.3 *Análisis de la curva de potencia vs temperatura.* El presente grafico es el resultado de obtener los delta de potencia aparente de valores máximos menos valores mínimos de los mismos versus los delta de temperatura de valores máximos menos temperatura ambiente, de esta manera obtener una referencia del comportamiento o relación que existe entre el aumento de temperatura y la pérdida de potencia en función a la sección, los datos lo tomamos del anexo E.



Fuente: Autor

La presente curva parte desde el punto cero debido a que se debe interpretar al no existir perdidas de potencia no debe generar temperatura. Por tanto al aumentar la pérdida de potencia se produce un calentamiento en el conductor, desde luego que se debe aclarar que todo esto es en función de la sección del mismo y de la cantidad de corriente que esta va a conducir.

Obtenemos la siguiente ecuación.

$$y = 0,5582x^2 + 0,2986 + 0 \text{ reemplazando } \Delta P = 0,558\Delta T^2 + 0,296\Delta T \quad (19)$$

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

Se logró la medición, visualización y análisis de la falla por la selección inadecuada de los conductores eléctricos de potencia.

Se diseñó un procedimiento adecuado para la realización del análisis termográfico, superando los inconvenientes por la incidencia de la temperatura del motor y fluido. Además de la recomendación y orientación de los parámetros de variación de temperatura, severidad y prioridad establecidos en la norma NETA.

Se analizó y evaluó los modos de fallos en conductores eléctricos de potencia mediante el AMEF que pueden ocasionar un mal funcionamiento permitiendo definir adecuadamente la función de los conductores eléctricos de potencia en base a su contexto operacional.

Al momento de establecer el comportamiento que existe en el calibre del conductor al sub dimensionar determinamos que. La relación que existe entre delta de potencia con la sección del conductor observamos mediante la curva resultante que el comportamiento es claramente a mayor sección menor pérdida de potencia.

Del análisis termográfico determinamos un delta de temperatura lo comparamos con la sección y observamos claramente en la curva que a menor sección mayor calentamiento, no obstante observamos que por más que se utiliza el calibre adecuado presenta incremento de temperatura.

El resultado obtenido es una curva entre delta de potencia aparente y delta de temperatura, observamos en la imagen el comportamiento de la curva a mayor caída de tensión aumenta el calor emitido en el cable, claro esta que esta debe partir de cero, es decir al no existir delta de potencia no se presenta calentamiento en el conductor.

6.2 Recomendaciones

Al hacer el análisis se delimita el campo de estudio, si éste es muy amplio es necesario realizarlo en varios AMEF.

Tener conocimiento básico de los equipos antes de la manipulación de estos, para la mejor comprensión de los mismos.

Al haber obtenido los termogramas y medidas de referencia, mediante ésta se hace el análisis específico para descubrir la causa raíz del problema, y es necesario analizar según la norma NETA para mejorar, reparar o cambiar, en cuanto a la potencia se debe tener claro el tipo ya sea activa, reactiva o aparente.

Además para posteriores análisis del estudio de conductores sobredimensionarlos, y observar si realmente disminuye de forma considerable el calentamiento del conductor ya que en el estudio realizado al analizar el cable adecuado con la sección recomendada encontramos emisión de calor.

BIBLIOGRAFÍA

ALCALDE, Pablo. *Electronica aplicada.* España: Parainfo, 2010, pp120-152.

ALCALDE, Pablo. *Electrotecnia.* Madrid : Parainfo, 2011, pp 130-135.

BELEGA, Reichtner. *Instrumentation and measurement technology conference (I2MTC).* 2010P, pp 55.

CARDENAS, Ruben. *El motor asincrono trifasico, generalidades y ofertas de la abb para la coordinación de las protecciones.* [En línea]. España, 2013 [Consulta: 04 de octubre de 2016.]. Disponible en:<https://library.e.abb.com/public/477b5b9a47443becc125791a003ab>

BARUCH, Alexandra. *Diagnostico de fallas en motores eléctricos de inducción trifásicos tipo jaula de ardilla usando redes neuronales artificiales.* [En línea]. México, 2013. [Consulta:03 de octubre de 2015.].Disponible en: <http://cdigital.uv.mx/bitstream/123456789/33849/1/baruchveraalexandra.pdf>.

BETHEL, Noah. *Powerful Motor Management from PDMA, analisis por Zona de Falla.* [En línea]. España, 2015. [Consulta: 09 de Noviembre de 2016.]. Disponible en: http://www.pdma.com/pdfs/Articles/Analisis_de_Zonas_de_Falla.pdf.

CARDENAS ESPINOZA, Ruben Dario. *Corrección del factor de potencia y filtrado de armonicos en las intensidades eléctricas.* Barcelo-España: ABB, 2010, pp 43-45.

CASTILLO, Joseph. *Mantenimiento industrial, termografía.* [En línea]. España, 2010. [Consulta: 18 de Julio de 2015.]. Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos92/termografia-mantenimiento/termografia-mantenimiento.shtml>.

CIFP. *Introducción a los sistemas trifasicos. centro integrado de formación profesional área de sistemas electroténicos y automáticos.* [En línea]. Massachuset, 2013. [Consultado: 01 de agosto de 2015.]. Disponible en: http://www.cifp-mantenimiento.es/e-learning/index.php?id=2&id_sec=1.

ENRIQUEZ, Harper. *ABC de las instalaciones eléctricas.* México-Guatemala: Hall, 2013, pp. 56-61.

BATISTA, C. *Diagnóstico Técnico de Maquinas Rotativas.* Segunda edición. Cuba- La Habana: Holguín, 2005, pp. 46-54

CREAU, A. *Instrumentación Industrial.* Octava Edición. México-Guatemala: Alfaomega Grupo Editor, 2010. pp. 792-795.

HERNÁNDEZ, Manuel. *Eficiencia energética.* [En línea]. España, 2013. [Consulta: 18 de julio de 2015.]. Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos67/eficiencia-energetica/eficiencia-energetica2.shtml#ixzz3gNXW8q49>.

JIMENEZ, JUAN. *Maquinas eléctricas.* [En línea] Croacia,2011. [Consultado: 03 de agosto de 2015.]. Disponible en: <http://www.ie.itcr.ac.cr/juanjimenez/cursos/potencia%20diplomado/motores.pdf>.

BOYLESTAD, Robert. *Fundamentos eléctricos.* México : Prentice hall, 2008. pp 250.

ESPINOZA, Cardenas. Corrección del factor de potencia y filtrado de armónicos en las intensidades eléctricas. s.l. : ABB, 2010. pp 53-58.

HERNÁNDEZ, Manuel & Cueva, MATILDE. Eficiencia energética. 2015 pp 43-50.

LATINCASA. Selección del calibre de un conductor eléctrico de acuerdo con la norma de instalaciones eléctricas NOM-001-SEDE-2005. 2005. pp 102.

MARTÍNEZ, Roberto. Introducción a la instrumentación electrónica-Cinvestav. s.l.: ESCOM, 2014. pp 436-439.

OLARTE, Willian Y BOTERO, Marcela. Técnicas de Mantenimiento Predictivo utilizados en la industria. Pereira : s.n., 2010, pp 39.

PROFIDI, Pablo. Detección, análisis y prevención de fallas en cables. Bogotá, Colombia : s.n., 2009, pp 37-40 .

PROGRAMA, Casa segura. La importancia de la selección del calibre en los conductores eléctricos. 2005, pp 17-20.

RTE, INEN 021. Reglamento técnico ecuatoriano. conductores y alambres para uso eléctrico aislados con material termoplástico. Ecuador: s.n., 2008, pp 266-275.