

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **ESCUELA DE FORMACIÓN DE TECNÓLOGOS**

**CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR A AIRE FORZADO PORTÁTIL  
CON CONTROL DE TEMPERATURA AUTOMÁTICO, PARA USO DEL  
PERSONAL DE MANTENIMIENTO ELÉCTRICO DE LA EMPRESA  
LAFARGE CEMENTOS.**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE TECNÓLOGO EN  
ELECTROMECAÁNICA**

**JUAN FRANCISCO ANDRADE RIVADENEIRA**

[juananitoandrade3040@hotmail.com](mailto:juananitoandrade3040@hotmail.com)

**DIRECTOR: ING. FERNANDO JÁCOME**

[luis.jacome@epn.edu.ec](mailto:luis.jacome@epn.edu.ec)

**Quito, Septiembre 2008**

## **DECLARACIÓN**

Yo, Juan Francisco Andrade Rivadeneira, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada por ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

Juan Francisco Andrade Rivadeneira

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Juan Francisco Andrade Rivadeneira, bajo mi supervisión.

---

Ing. Fernando Jácome  
DIRECTOR DEL PROYECTO

## **DEDICATORIA**

A mis padres Elisa y Cristóbal  
A mis hermanos: Fanny, Adiel, Lili, Silvia y Carlos  
A mi tía María  
A Jesucristo y a todos los Santos Buenos.

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios y todos los santos buenos que me cuidan y me dan la oportunidad de vivir para cumplir este sueño.

A mis padres que con tanto sacrificio me dieron la oportunidad de estudiar y siempre estuvieron apoyándome para que termine mi carrera.

A mis hermanos los cuales siempre estuvieron pendientes de mi, gracias por su apoyo de toda la vida.

A mi cuñado Luis Salas, gracias por tu apoyo, ayuda y por brindarme tus conocimientos.

A mi hermana Fanny y a mi cuñado Luis Garzón gracias por acogerme en su casa y atenderme como si fuese un hijo mas de ustedes.

A mi tía María, gracias por guiarme hacia el camino de Dios y a tener fé en el.

A mi novia Anita, gracias por su apoyo y por darme fuerzas para terminar mi carrera.

A todos mis compañeros con los cuales pasamos momentos de apoyo, compañerismo y distracción.

A todos mis profesores, los cuales me brindaron sus conocimientos para que pueda defenderme y ganarme la vida con dignidad.

Gracias a todos quienes me apoyaron y me brindaron su amistad.

**JUAN**

# CONTENIDO

RESUMEN.....	1
PRESENTACIÓN.....	2
Objetivos.....	2
CAPITULO 1.....	4
MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA.....	4
1.1 DEFINICIÓN DE TEMPERATURA.....	4
1.1.1 EQUILIBRIO TÉRMICO.....	5
1.1.1.1 Ley cero de la termodinámica.....	5
1.2 SENSORES DE TEMPERATURA.....	5
1.2.1 TERMÓMETROS.....	6
1.2.1.1 Termómetro de vidrio.....	6
1.2.1.2. Termómetro Bimetálico.....	6
1.2.1.3 Termómetro de Bulbo y Capilar.....	7
1.2.2 TERMOPARES.....	8
1.2.2.1 Tipos, características y campos de aplicación.....	9
1.2.2.1.1 Termopares Básicos.....	9
1.2.2.1.2 Termopares Nobles.....	10
1.2.2.1.3 Termopares Especiales.....	11
1.2.3 DETECTOR DE RESISTENCIA O CONDUCTORES RTD.....	12
1.2.3.1 Características de las sondas de resistencias.....	14
1.2.3.1.1 El Pt 100.....	15
1.2.3.2.1 Ventajas del Pt 100.....	15
1.2.3.2.2 Conexión del Pt 100.....	16
1.2.4 TERMISTORES.....	18
1.2.4.1 Características.....	18
1.2.5 PIRÓMETROS.....	19
1.3 ESCALAS TERMOMÉTRICAS.....	20

1.3.1 ESCALAS DE CELCIUS.....	21
1.3.2 ESCALAS DE REAUMUR.....	21
1.3.3 ESCALA FAHRENHEIT.....	21
1.3.4 ESCALA KELVIN.....	21
1.3.5 RELACIÓN ENTRE LAS ESCALAS DE TEMPERATURA.....	22
CAPITULO II.....	23
TRANSFERENCIA DEL CALOR.....	23
2.1 DEFINICIÓN DE CALOR.....	23
2.2 FLUJO CALORÍFICO.....	23
2.2.1 TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCIÓN.....	24
2.2.2 TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVENCION.....	25
2.2.3 TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACIÓN.....	26
2.3 CANTIDAD DE CALOR.....	27
CAPITULO III.....	28
MOTOR ELÉCTRICO.....	28
3.1 DEFINICIÓN.....	28
3.2 PARTES COMPONENTES Y DESPIECE DE UN MOTOR ELÉCTRICO.....	28
3.2.1 CLASIFICACION POR SU DISEÑO ELÉCTRICO.....	28
3.2.2 FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR TRIFÁSICO.....	29
3.3 ZONAS DE FALLAS EN LOS MOTORES ELÉCTRICOS.....	31
3.3.1 CIRCUITO DE POTENCIA.....	32
3.3.2 CALIDAD DE ENERGÍA.....	33
3.3.3 AISLAMIENTO.....	36
3.3.4 ESTATOR.....	38
3.3.5 ROTOR.....	39
3.3.6 EXCENTRICIDAD.....	41
3.4 MANTENIMIENTO DE UN MOTOR ELÉCTRICO.....	43
3.4.1 DEFINICIÓN DE MANTENIMIENTO.....	43
3.4.2 OBJETIVO DEL MANTENIMIENTO PREVENTIVO A UN MOTOR ELÉCTRICO.....	43
3.4.3 EQUIPOS DE PRUEBA PARA EL MANTENIMIENTO PREVENTIVO DE UN MOTOR ELÉCTRICO.....	44

3.4.3.1	Multímetro.....	44
3.4.3.2	Megahómetro.....	45
3.4.3.3	Termómetro.....	45
3.4.3.4	Brújula.....	46
3.4.3.5	Zumbador o growler.....	46
3.4.3.6	Tacómetro.....	47
3.5	DETECCIÓN DE AVERÍAS EN MOTORES ELÉCTRICOS.....	48
3.5.1	LOCALIZACIÓN DE CONTACTOS A MASA O FALLA A TIERRA.....	48
3.5.2	LOCALIZACION DE CORTOCIRCUITOS.....	50
3.5.2.1	Cortocircuito entre fases.....	51
3.5.2.2	Cortocircuito entre espiras de una misma fase.....	52
3.5.3	LOCALIZACIÓN DE CONDUCTORES CORTADOS.....	54
3.5.4	DETERMINACIÓN DE LA POLARIDAD CORRECTA.....	55
CAPITULO IV.....		67
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SECADOR A AIRE FORZADO PORTÁTIL CON CONTROL DE TEMPERATURA AUTOMÁTICO.....		57
4.1	JUSTIFICACIÓN.....	57
4.2	DISEÑO.....	58
4.2.1	GENERACIÓN DEL CALOR.....	58
4.2.2	TRANSMISIÓN DEL CALOR.....	59
4.2.2.1	Transmisión del calor Resistencia eléctrica –aire.....	60
4.2.2.2	Transmisión del calor secador-bobinados.....	60
4.2.2.2.1	Cáculos.....	62
4.2.3	CONTROL DEL PROCESO.....	66
4.2.3.1	CONTROL DE LA TEMPERATURA.....	67
4.3	MATERIALES Y ESQUEMA DEL EQUIPO.....	73
4.3.1.	MATERIALES.....	73
4.3.2.	ESQUEMA.....	74
4.4	APLICACIONES DEL SECADOR A AIRE FORZADO PORTÁTIL CON CONTROL DE TEMPERATURA AUTOMÁTICO.....	75
4.4.1	FORMA DE UTILIZACIÓN.....	80
4.4.2	PRUEBAS.....	82
CAPITULO V.....		89
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		89

5.1 CONCLUSIONES.....	89
5.2 RECOMENDACIONES.....	90
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	92
BIBLIOGRAFÍA	
ANEXOS	

## CONTENIDO DE FIGURAS

<b>Figura 1.1.</b>	Detección de temperatura.....	4
<b>Figura 1.2.</b>	Equilibrio Térmico.....	5
<b>Figura 1.3.</b>	Termómetro Bimetálico.....	7
<b>Figura 1.4.</b>	Termómetro de Bulbo y Capilar.....	7
<b>Figura 1.5.</b>	Sistema de termopar típico.....	8
<b>Figura 1.6.</b>	Canal de medición de la Temperatura.....	8
<b>Figura 1.7.</b>	Código de colores para termopares según la ASTM de los Estados Unidos.....	12
<b>Figura 1.8.</b>	Relación entre los materiales de sondas de resistencias.....	13
<b>Figura 1.9.</b>	Relación entre Resistencia y Temperatura del Pt 100.....	15
<b>Figura 1.10.</b>	Conexión de la Pt 100 con 2 hilos.....	16
<b>Figura 1.12.</b>	Conexión de la Pt 100 con 4 hilos.....	17
<b>Figura 1.11.</b>	Conexión de la Pt 100 con 3 hilos.....	18
<b>Figura 1.12.</b>	Principio del pirómetro óptico.....	19
<b>Figura 2.1.</b>	Conducción del calor.....	25
<b>Figura 2.2.</b>	Transmisión de calor.....	27
<b>Figura 3.1.</b>	Partes de un Motor Eléctrico.....	34
<b>Figura 3.2.</b>	Despiece de un motor eléctrico trifásico de inducción.....	30
<b>Figura 3.3.</b>	Estudio de Fallas en Motores Eléctricos.....	31
<b>Figura 3.4.</b>	Factor de reducción de potencia (NEMA).....	34
<b>Figura 3.5.</b>	Armónicas.....	35
<b>Figura 3.6.</b>	Degradación del aislamiento respecto al tiempo.....	37
<b>Figura 3.7.</b>	Desbalance inductivo - corto entre espiras.....	39
<b>Figura 3.8.</b>	RIC - rotaren buen estado.....	40
<b>Figura 3.9.</b>	RIC rotor con barras rotas.....	40
<b>Figura 3.10.</b>	Excentricidad estática.....	41
<b>Figura 3.11.</b>	Excentricidad dinámica.....	42
<b>Figura 3.12.</b>	Multímetro o pinza amperimétrica.....	44

<b>Figura 3.13.</b>	Megger.....	45
<b>Figura 3.14.</b>	Termómetro Infrarrojo.....	45
<b>Figura 3.15.</b>	Brújula.....	46
<b>Figura 3.16.</b>	Zumbador o Growler.....	47
<b>Figura 3.17.</b>	Tipos de tacómetros.....	48
<b>Figura 3.18.</b>	Localización de la fase puesta a masa o con falla a tierra, en estator y Rotor.....	49
<b>Figura 3.19.</b>	Localización de la bobina o grupo de bobinas puesta a masa.....	50
<b>Figura 3.20</b>	Localización de cortocircuitos entre fases.....	52
<b>Figura 3.21.</b>	Localización de espiras en cortocircuitos del estator y rotor.....	53
<b>Figura 3.22.</b>	Localización de conductores cortados.....	54
<b>Figura 3.23.</b>	Determinación de la polaridad correcta en un estator.....	56
<b>Figura 4.1.</b>	Cámara de calentamiento.....	59
<b>Figura 4.2.</b>	Transmisión del calor Resistencia eléctrica-aire.....	60
<b>Figura 4.3.</b>	Transmisión de calor secador-bobinados.....	61
<b>Figura 4.4.</b>	Flujo de aire en el sistema de calentamiento.....	63
<b>Figura 4.5.</b>	Ventilador.....	64
<b>Figura 4.6.</b>	Diagrama de bloques del lazo de control de temperatura del Secador.....	68
<b>Figura 4.7.</b>	Modo de control ON/OFF.....	69
<b>Figura 4.8.</b>	Esquema del Lazo de control de Temperatura del secador a aire Forzado .....	70
<b>Figura 4.9.</b>	Circuito eléctrico del sistema.....	71
<b>Figura 4.10.</b>	Sistema para la recirculación del aire.....	72
<b>Figura 4.11.</b>	Secador, Base, caja de conexiones y control.....	74
<b>Figura 4.12.</b>	Secador a aire forzado con control de temperatura automático y Estator.....	74
<b>Figura 4.13.</b>	Curva del secado del barnizado.....	79
<b>Figura 4.14.</b>	Proceso de secado y calentado en operación del estator.....	80
<b>Figura 4.15.</b>	Proceso interno de secado y calentado del estator.....	81

## CONTENIDO DE TABLAS

<b>Tabla 1.1.</b>	Características técnicas de las sondas de resistencia.....	14
<b>Tabla 1.2.</b>	Relación entre las escalas de temperatura.....	22
<b>Tabla 4.1.</b>	Temperaturas y tiempos de calentado.....	.76
<b>Tabla 4.2.</b>	Temperaturas y tiempos desecado .....	79
<b>Tabla 4.3.</b>	Tensión continua de ensayo sugerida.....	82
<b>Tabla 4.4.</b>	Valores mínimos recomendados para la resistencia de aislación a 40°C.....	82

## RESUMEN

La utilización de motores eléctricos en la Industria, como en nuestra vida cotidiana, son un factor indiscutible para la productividad de nuestro país, y es por ello que en el presente trabajo se ha realizado una construcción de un secador a aire forzado portátil con control de temperatura automático para establecer los lineamientos generales de su aplicación desde el punto de vista técnico y económico dentro del mantenimiento de los motores eléctricos de la Planta Industrial de la Empresa Lafarge Cementos.

Debido a que estos deben operar bajo condiciones críticas de temperatura, humedad, contaminación, etc., la realización de un mantenimiento preventivo a los motores eléctricos, ha adquirido una enorme importancia, ya que al considerarlo como parte de la conservación de los equipos, con un enfoque a la productividad, permite obtener mayores y mejores beneficios.

Por tales motivos, se ha realizado una ligera descripción teórica de aquellos temas en los cuales se basa el trabajo y de los factores mas comunes que pueden intervenir en la operación de un motor eléctrico, donde se incluye un análisis de las zonas de fallas, una descripción del equipo para la realización del mantenimiento preventivo y detección de averías de un motor eléctrico, con la finalidad de tener claros los principios de operación, funcionamiento y aplicación de cada uno de ellos, así como sus ventajas y desventajas respectivas.

Se determinó una metodología de investigación para aplicar el conocimiento teórico en un trabajo práctico con el fin de alcanzar los objetivos planteados, se definieron las etapas con las cuales se realizó el trabajo, así como la aplicabilidad del secador a aire forzado portátil con control de temperatura automático dentro del mantenimiento preventivo de los bobinados de los motores eléctricos específicamente.

Los resultados que se desprenden de este trabajo servirán como un referente técnico para ser implementado en cualquier lugar en donde se realice mantenimiento preventivo y rebobinado de motes eléctricos.

## PRESENTACIÓN

En la actualidad, la fiabilidad de los equipos dentro de la Planta Industrial de la Empresa Lafarge Cementos, es ya una política. El normal funcionamiento de los equipos regados a lo largo de toda la Planta tales como: bandas transportadoras, molinos, tornillos transportadores, balanzas, elevadores, bombas, compresores, válvulas rotativas, ventiladores, trituradoras, entre otros, todos estos teniendo en común como fuente principal para la operación a un motor eléctrico, representa un aspecto fundamental para garantizar la productividad y la calidad del producto final.

Es por esto que dentro de la Planta es necesario la implementación de métodos que garanticen la fiabilidad de los equipos, así como, la seguridad del personal, siendo una medida clara implantada la de aumentar la calidad del Mantenimiento realizado por el personal a los equipos para cumplir con este objetivo.

Por estas razones, se procedió a diseñar y construir un secador a aire forzado portátil con control de temperatura automático, que será utilizado por el personal de Mantenimiento eléctrico para la realización de un mantenimiento preventivo de alta calidad en el taller eléctrico o en el mismo lugar de montaje de los motores eléctricos de la Planta, cumpliendo así con el propósito de obtener una línea de producción confiable y segura.

Este trabajo pretende ser un aporte para la industria ecuatoriana, en especial, para todas aquellas personas que están involucradas con el Mantenimiento y con el fin de que se cuente con conceptos, datos técnicos y con una guía práctica para la localización de problemas y solución de los mismos. El trabajo se planteó bajo los requerimientos de los siguientes objetivos:

### **Objetivos:**

- Construir un secador a aire forzado con control de temperatura automático, el cual permita realizar un secado eficiente y a la vez obtener un calentamiento óptimo del bobinado para el barnizado de los motores

eléctricos en mantenimiento de la Empresa Lafarge Cementos.

- Aumentar la calidad del aislamiento, realizando un secado efectivo y un barnizado de alta calidad del bobinado de los motores eléctricos, evitando así que se produzcan daños internos por fallas de aislamiento.
- Mediante un sensor y un controlador de temperatura, tener un control estable de la temperatura del aire que será generado y transmitido hacia el bobinado de los motores.
- Diseñar, construir y comprobar el funcionamiento del secador a aire forzado con control de temperatura automático.
- Contar en el taller de mantenimiento eléctrico con un equipo portátil de secado y calentado de bobinados, que permita el traslado y utilización de este en cualquier punto de la Planta Industrial.

# CAPITULO I

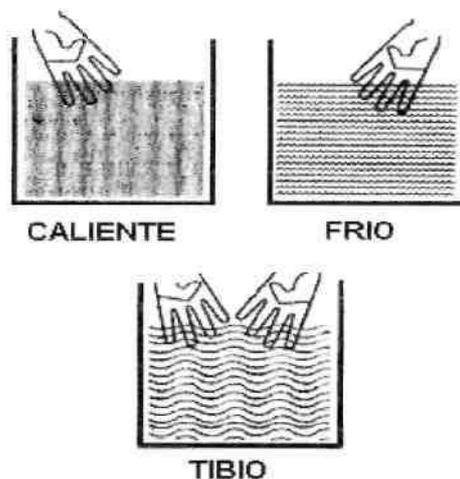
## MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA

La medida de la temperatura constituye una de las mediciones más comunes y más importantes que se realizan actualmente en los procesos industriales, las mismas que pueden tener ventajas o limitaciones dependiendo de las características del dispositivo a utilizarse, así como, la distancia entre el elemento de medida y el instrumento registrador, indicadores o controladores necesarios.

### 1.1 DEFINICIÓN DE TEMPERATURA.

**"Se la define como una medida de la energía cinética de las moléculas de una sustancia debido a la agitación térmica"<sup>1</sup>.**

La temperatura de un cuerpo es una medida de su estado relativo de calor o frío. Los seres humanos estamos en capacidad de usar nuestro sentido de la temperatura para percibir sensaciones de frío o caliente, y definir que la temperatura de un cuerpo es más elevada que la de otro. Sin embargo es evidente que nuestro sentido del tacto es demasiado limitado en su alcance y no lo suficiente preciso y práctico a la hora de valorar temperaturas muy elevadas o muy bajas.



**Figura 1.1.** Detección de temperatura.

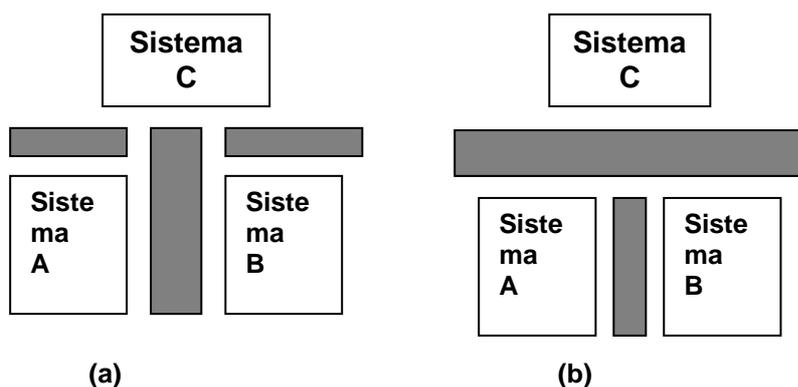
<sup>1</sup> BENÍTEZ, CORRALES, RODAS; Curso Básico de Instrumentación Industrial; Escuela Politécnica Nacional; Quito-Ecuador; 2002.

### 1.1.1 EQUILIBRIO TÉRMICO.

Es la condición de uno, dos o mas sistemas, substancias o cuerpos y su entorno cuando no existen diferencias de temperatura entre ellos.

#### 1.1.1.1 Ley cero de la termodinámica.

Dos sistemas en equilibrio térmico con un tercero están en equilibrio térmico entre sí.



**Figura 1.2.** Equilibrio Térmico.

(a) Si A y B están en equilibrio térmico con C; entonces (b) A y B están en equilibrio térmico entre sí.

## 1.2 SENSORES DE TEMPERATURA.

Hoy en día, se cuenta con un gran número de sensores utilizados para la medición de temperatura y la elección depende de los requerimientos de aplicación, tales como:

- El rango de temperatura
- La sensibilidad
- La exactitud
- El tiempo de respuesta y el ambiente

Únicamente unos pocos tipos de sensores son completamente pasivos, es decir, no requieren algún tipo de excitación aplicada, mientras que otros mantienen su interacción al mínimo con el ambiente de temperatura desarrollado, por ejemplo: prácticamente no existe un incremento, ni una disminución de calor en un ambiente dado al introducir en el una termocupla, o al medir la variación de resistencia en función de la temperatura a través de un sensor resistivo.

Con sensores resistivos ocurre una pequeña disipación de potencia debido a la baja corriente eléctrica que debe aplicarse a la resistencia para medir su valor. Pero debido al auto calentamiento, la temperatura de un sensor que requiere excitación puede llegar a ser parecida a la temperatura del sistema bajo medición y por tanto dar valores erróneos.

Igualmente, si se mide la temperatura de un sistema térmicamente aislado y con una pequeña capacidad térmica, la temperatura subirá debido a la disipación térmica del sensor.

Se clasifican en sensores que son solo indicadores de la temperatura y sensores que proporcionan parámetros eléctricos, entre ellos tenemos los siguientes:

### **1.2.1 TERMÓMETROS.**

Los termómetros son instrumentos mecánicos para medir la temperatura. En su operación se basan en el hecho de que casi todos los cuerpos se dilatan al aumentar su temperatura, dentro de los cuales tenemos:

- Termómetro de Vidrio
- Termómetro Bimetálico
- Termómetro de Bulbo y Capilar.

#### **1.2.1.1 Termómetro de Vidrio.**

El termómetro de vidrio consta de un tubo de vidrio que contiene algún fluido, por ejemplo mercurio, y que al calentarse se expande y sube en el tubo capilar. Los rangos de trabajo de algunos fluidos empleados son:

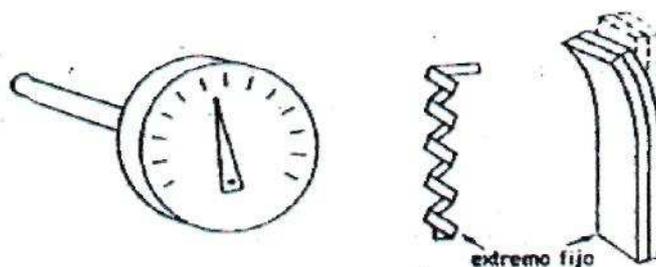
- Mercurio: -35 hasta +280°C
- Mercurio (tubo capilar lleno de gas): -35 hasta +450°C
- Pentanol: -200 hasta +20°C
- Alcohol: -110 hasta +50°C
- Tolueno: -70 hasta +100°C

#### **1.2.1.2 Termómetro Bimetálico.**

Se fundamentan en el distinto coeficiente de dilatación de los metales diferentes como el latón, monel o acero y una aleación de ferro-níquel o invar. Laminados conjuntamente.

Las láminas bimetálicas pueden ser rectas o curvas formando espirales o hélices.

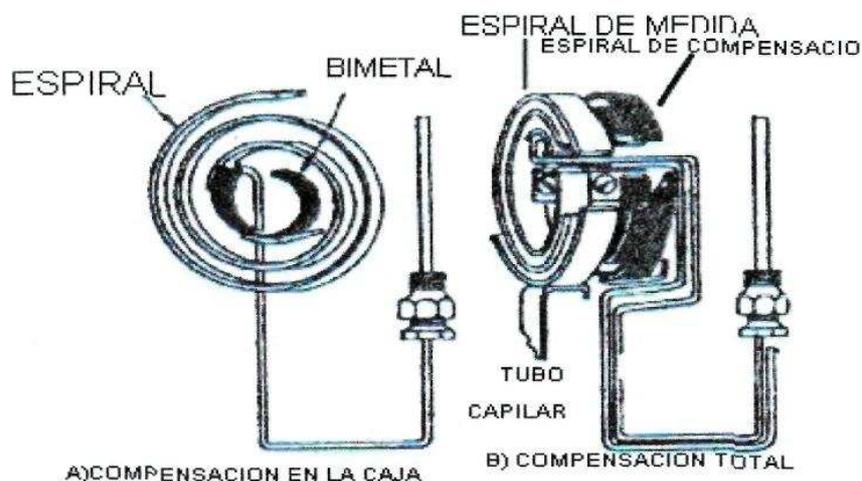
Es un indicador ya que la aguja sujeta el extremo libre de la espiral o de la hélice y el propio elemento Bimetálico. Su precisión es de  $\pm 1\%$  y su campo de medida de  $-200$  a  $+500^{\circ}\text{C}$ .



**Figura 1.3.** Termómetro Bimetálico.

### 1.2.1.3 Termómetro de Bulbo y Capilar.

Consisten esencialmente en un bulbo conectado por un capilar a una espiral. Cuando la temperatura del bulbo cambia, el gas o el líquido en el bulbo se expanden y la espiral tiende a desenrollarse moviendo la aguja sobre la escala para indicar la elevación de la temperatura en el bulbo.



**Figura 1.4.** Termómetro de Bulbo y Capilar.

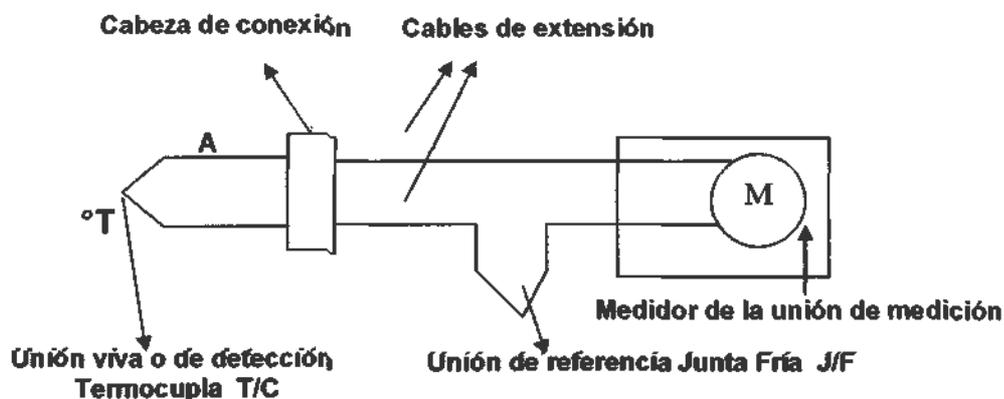
Entre los sensores que generan señales eléctricas, que luego deben ser acondicionadas, tenemos:

## 12.2 TERMOPARES.

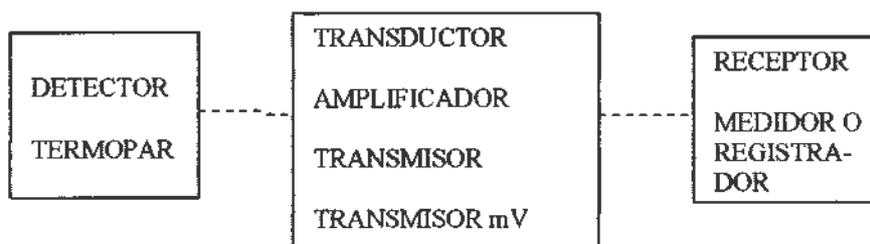
Un termopar es un circuito formado por dos metales distintos que produce un voltaje siempre y cuando sus juntas se encuentren a temperaturas diferentes.

Los termopares están fabricados a partir de dos conductores aislados, blindados o no blindados, con conductores sólidos o flexibles, fabricados en una variedad de diámetros y con varios conductores, fundas y aislantes. Para una unión de un tipo dado, el tiempo de respuesta decrece con la mayor longitud o menor diámetro del hilo utilizado. El rango de temperatura de los termopares ya sean estos básicos, nobles y especiales se extiende desde  $-250^{\circ}\text{C}$  a  $1500^{\circ}\text{C}$ .

Las uniones se pueden realizar mediante técnicas diferentes, pero nunca con una suelda como aporte, además pueden estar expuestas a la intemperie o encapsuladas, conectadas a tierras o aisladas.



**Figura 1.5.** Sistema de termopar típico.



**Figura 1.6.** Canal de medición de la Temperatura

En el diagrama de bloques del canal medición de temperatura (Fig. 1.6) el detector es un termopar. El siguiente bloque es un transmisor de mili voltaje (mV) a mili amperaje (mA). Dicho transmisor cumple la función de un transductor convirtiendo la salida de mV de un termopar en una señal de corriente de 4 a 20mA, cumple la función de un amplificador y la de un transmisor. En este canal de medición, el receptor puede ser un registrador, un medidor o un indicador. Para determinar la temperatura existente en su unión de medición, es necesario medir con precisión este voltaje mientras se mantiene la unión de referencia a una temperatura constante y conocida. Se utilizan tablas o medios electrónicos para convertir el voltaje medido en la temperatura de la unión de medición.

#### **1.2.2.1 Tipos, características y campos de aplicación de los termopares.**

Existen varias combinaciones de metales conductores que son utilizados como termopares, desde los más corrientes de uso industrial hasta los más sofisticados para usos especiales de laboratorio.

Las combinaciones de conductores deben poseer una relación razonablemente lineal entre temperatura y f.e.m. y que las variaciones de esta f.e.m. puedan ser detectadas por instrumentos de medida. Además, cada combinación tiene un rango ideal de trabajo, el cual debe ser respetado para prolongar la vida útil del termopar. Los termopares, pueden ser clasificados en tres grupos: básicos, nobles y especiales.

##### ***1.2.2.1.1 Termopares Básicos.***

Los metales y aleaciones utilizadas son de bajo costo y son los más utilizados industrialmente, dado que las aplicaciones lo admiten tienen un margen de error alto.

Entre ellos tenemos los siguientes:

- Tipo T
- Tipo J
- Tipo E
- Tipo K
- 

- **Tipo T:** La nomenclatura T está adoptada por la norma ANSÍ. Los conductores son de cobre y constantan. El rango de utilización va desde -200 °C hasta 370 °C, produciendo una f.e.m. de -5,603 hasta +19,027 mV.

Las aplicaciones más comunes son en criometría, industrias de refrigeración, investigaciones agronómicas y ambientales, químicas y petroquímicas.

- **Tipo J:** Nomenclatura adoptada por la norma ANSÍ. La combinación utilizada es hierro al 99,5 % y constantan. El rango de utilización va desde los -40 °C a los 760 °C. La f.e.m. va desde -1,960m, hasta +42,922 mV.

Aplicaciones: Se utiliza en centrales de energía, metalúrgica, química, petroquímica etc.

- **Tipo E:** Nomenclatura adoptada por la norma ANSÍ. Es una combinación de chromel y constantan.

El rango de utilización va desde los -200 °C a los +870 °C

La f.e.m. producida es de -8,824 a +66,473 mV.

Las aplicaciones más comunes son en la industria química y petroquímica.

- **Tipo K:** Nomenclatura adoptada por la norma ANSÍ. Es una combinación de chromel y alumel.

El rango de utilización va desde los -200 °C a los +1260 °C

La f.e.m. producida es de -5,891 a +50,99 mV.

Aplicaciones: metalúrgicas, fundición, cemento y cal, vidrios, cerámicas, etc.

#### *1.2.2.1.2 Termopares nobles.*

Son aquellos que utilizan platino en su composición. Por supuesto, su costo es elevado y exigen instrumentos de alta sensibilidad. Debido a su baja potencia termoeléctrica presentan altas precisiones. Entre ellos tenemos los siguientes:

- Tipo S
- Tipo R
- Tipo B

- **Tipo S:** Nomenclatura adoptada por la norma ANSÍ. Es una combinación de platino con rhodio y platino.

El rango de utilización va desde los 0 °C a los +1600 °C .

La f.e.m. producida es de 0 a 16,771 mV.

Aplicaciones: metalúrgicas, fundición, cemento y cal, vidrios, cerámicas, etc. Entre 1200 y 1600 °C, en algunos casos se utilizan sensor es descartables.

- **Tipo R:** Nomenclatura adoptada por la norma ANSÍ. Es una combinación de platino con rhodio y platino.

El rango de utilización va desde los 0 °C a los +16 00 °C

La f.e.m. producida es de 0 a 18,842 mV.

Aplicaciones: metalúrgicas, fundición, cemento y cal, vidrios, cerámicas, etc.

- **Tipo B:** Nomenclatura adoptada por la norma ANSÍ. Es una combinación de platino con rhodio y platino con rhodio.

El rango de utilización va desde los 600 °C a los + 1700 °C

La f.e.m. producida es de 1,791 a 12,426 mV.

Aplicaciones: Altas temperaturas en general.

### *1.2.2.1.3 Termopares especiales.*

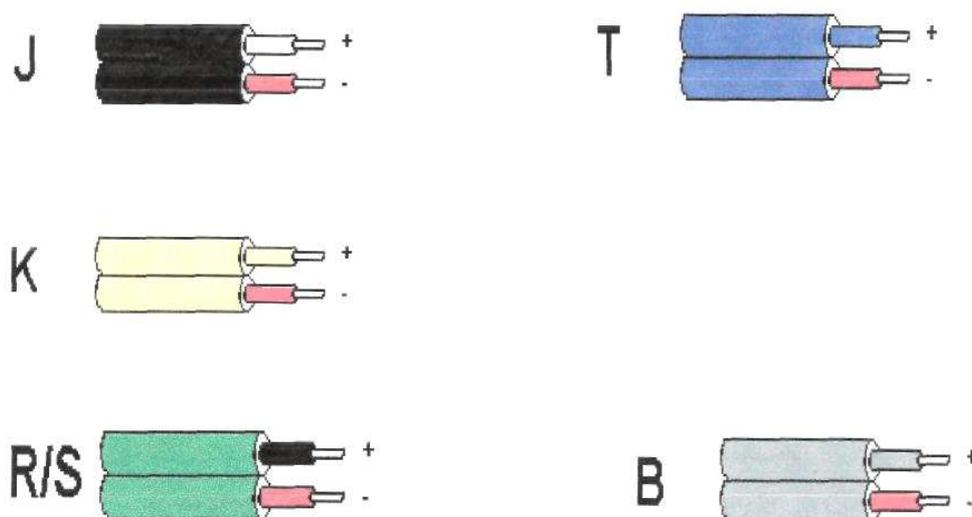
A lo largo de los años, se han desarrollado diferentes tipos de termopares con alguna característica útil para alguna aplicación en particular. Entre ellos tenemos los siguientes:

- Tungsteno - Rhenio
- iridio - Rhodio/Irídio
- Oro -Hierro/Chromel

- **Tungsteno - Rhenio:** termopar que puede ser utilizado en forma continua hasta 2300 °C y por periodos cortos hasta 2750 °C

- **iridio - Rhodio/Irídio:** Utilizados por períodos limitados hasta 2000°C

- **Oro -Hierro/Chromel:** Utilizados en temperaturas criogénicas.



**Figura 1.7.** Código de colores para termopares según la ASTM de los Estados Unidos

### **1.2.3 DETECTOR DE TEMPERATURA POR RESISTENCIA O CONDUCTORES: RTD**

Se basan en el principio de que la resistencia de un conductor (alambre) en función de la temperatura varía de una manera casi lineal.

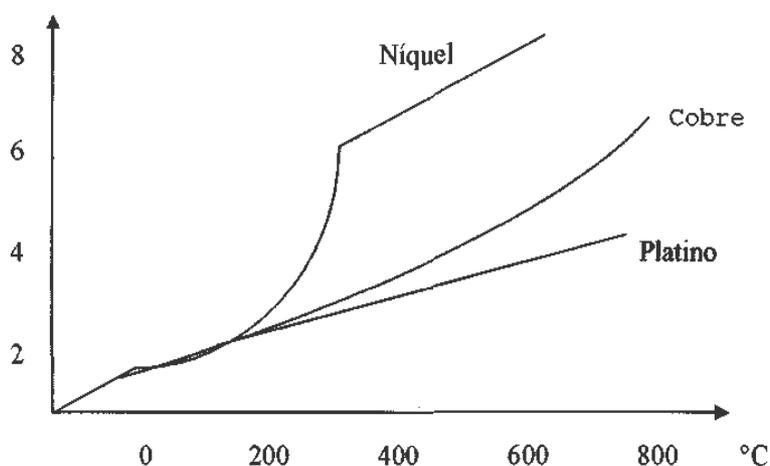
La medida de temperatura usando sondas de resistencia depende de las características de resistencias en función de la temperatura que son propias de los elementos de detección.

El elemento consiste usualmente en un arrollamiento de hilo muy fino del conductor adecuado bobinado entre capas de material aislante y protegido de un revestimiento de vidrio o cerámica.

Los materiales que se usan normalmente en las sondas de resistencia son el cobre, platino y el níquel.

Resistencia relativa

$R_t/R_0$  a  $0^\circ\text{C}$



**Figura 1.8.** Relación entre los materiales de sondas de resistencias

El platino es el metal más adecuado desde el punto de vista de precisión y de estabilidad pero presenta el inconveniente de su costo.

El níquel es más barato que el platino y posee una resistencia más elevada con una mayor variación por grado, sin embargo, tiene como desventaja la falta de linealidad en su relación resistencia-temperatura.

El cobre tiene una variación de resistencia uniforme, es estable y barato, pero tiene el inconveniente de su baja resistividad.

La resistividad de un alambre de platino varía casi linealmente con la temperatura, a una tasa de  $0.00391/^\circ\text{C}$  en un amplio rango desde  $-250^\circ\text{C}$  hasta  $1000^\circ\text{C}$ . El valor de  $100\Omega$  ha sido aceptado como un estándar industrial y de allí la popularidad de la conocida PT 100.

Las pequeñas desviaciones de la linealidad entre  $-200^\circ\text{C}$  y  $0^\circ\text{C}$  pueden representarse con una exactitud mayor a  $0,1^\circ\text{C}$  empleando la ecuación:

$$R = R_0[1 + \alpha\theta - \beta\theta^2 - \delta(\theta - 100)\theta^3]$$

donde:

$R_0$  = la resistencia del alambre de platino a 0°C

$\theta$  = temperatura en grados Celsius = a

$$3,0802 \times 10^{-3} \text{ C}^{-1} \quad \beta = 4,2735 \times 10^{-12} \text{ C}^{-4}$$

$$P = 0,580195 \times 10^{-6} \text{ C}^{-2}$$

Para el intervalo de temperatura de 0°C a 850°C la dependencia de temperatura es más sencilla:

$$R = R_0 [1 + \alpha\theta - \beta\theta^2]$$

Los materiales usados como sensores resistivos de temperatura deben poseer las siguientes características:

- Alto coeficiente de cambio de la resistencia por grado de temperatura (sensibilidad)
- Alta variación de resistividad lo que dará mayor rango de trabajo.
- Relación lineal Resistencia-Temperatura
- Rigidez y ductilidad
- Estabilidad de las características durante la vida útil del material.

### 1.2.3.1 Características de las sondas de resistencias.

**Tabla 1.1** Características Técnicas de las sondas de resistencias.

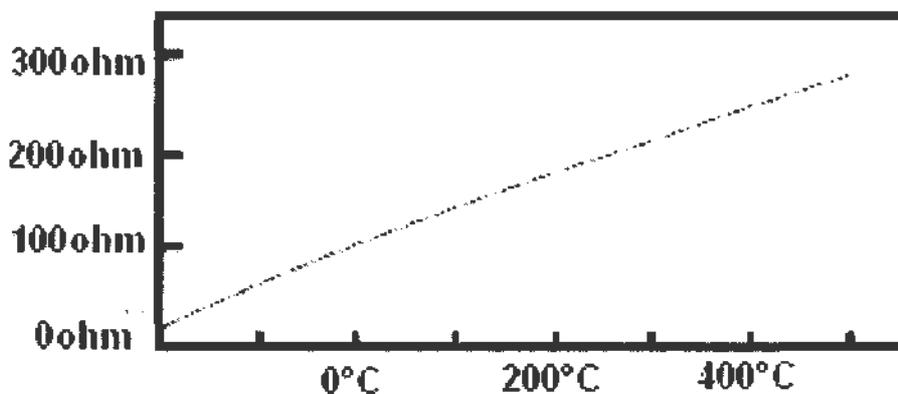
METAL	A( $\Omega/\Omega^\circ\text{C}$ )	INTERVALO UTIL $^\circ\text{C}$	$\Phi$ MIN(mm)	COSTO	R $^\circ\text{C}$	PRECISIÓN
PLATINO	0.00392	-200 a +950	0.05	Alto	100	0.01
NÍQUEL	0.006810	-150 a+300	0.05	Medio	100	0.5
COBRE	0.00430	-200 a 120	0.05	Bajo	10	0.1

### 1.2.3.2 El Pt 100.

Un tipo particular de RTD son las Pt **100**. Estos sensores deben su nombre al hecho de estar fabricados de platino (Pt) y presentar una resistencia de 100ohms a 0°C. Son dispositivos muy lineales en un gran rango de temperaturas.

Un PT 100, es un sensor de temperatura que consiste en un alambre de platino que a 0°C tiene 100 ohmios y que al aumentar la temperatura aumenta su resistencia eléctrica.

El incremento de la resistencia no es lineal pero si creciente y característico del platino de tal forma que mediante tablas es posible encontrar la temperatura exacta a la que corresponde.



**Figura 1.9.** Relación entre Resistencia y Temperatura del Pt 100.

Normalmente las Pt 100 industriales se consiguen encapsuladas en la misma forma que las termocuplas, es decir dentro de un tubo de acero inoxidable ú otro material (vaina), en un extremo está el elemento sensible (alambre de platino) y en el otro está el terminal eléctrico de los cables protegido dentro de una caja redonda de aluminio (cabezal).

#### 1.2.3.2.1. Ventajas del Pt 100.

Siendo los Pt 100 levemente más costosos y mecánicamente no tan rígidos como las termocuplas, las superan especialmente en aplicaciones de bajas temperaturas, esto es, entre -100 y 200°.

Los Pt100 pueden fácilmente entregar precisiones de una décima de grado con la ventaja que la Pt100 no se descompone gradualmente entregando lecturas erróneas,

si no que normalmente se abre, con lo cual el dispositivo medidor detecta inmediatamente la falla del sensor y da aviso.

Este comportamiento es una gran ventaja en usos como cámaras frigoríficas donde una desviación no detectada de la temperatura podría producir algún daño grave.

Además la Pt100 puede ser colocada a cierta distancia del medidor sin mayor problema (hasta unos 30 metros) utilizando cable de cobre convencional para hacer la extensión.

#### 1.2.3.2.2. Conexión del PT100.

Existen 3 modos de conexión para las Pt100, cada uno de ellos requiere un instrumento lector distinto. El objetivo es determinar exactamente la resistencia eléctrica  $R(t)$  del elemento sensor de platino sin que influya en la lectura la resistencia de los cables  $R_c$ .

Los 3 tipos de conexión son los siguientes:

##### - Con 2 hilos:

El modo más sencillo de conexión (pero menos recomendado) es con solo dos cables.

En este caso las resistencias de los cables  $R_{c1}$  y  $R_{c2}$  que unen la Pt100 al instrumento se suman generando un error inevitable.

El lector medirá el total  $R(t) + R_{c1} + R_{c2}$  en vez de  $R(t)$ .

Lo único que se puede hacer es usar cable lo más grueso posible para disminuir la resistencia de  $R_{c1}$  y  $R_{c2}$  y así disminuir el error en la lectura.

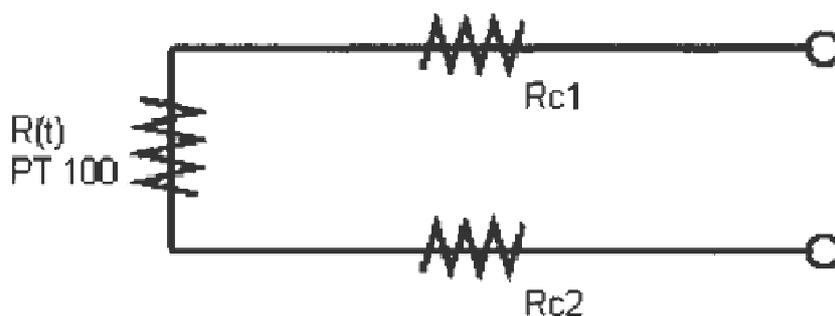


Figura 1.10. Conexión de la Pt 100 con 2 hilos

Por ejemplo si la temperatura es  $90^{\circ}\text{C}$ , entonces  $R(t) = 134.7$  ohms, pero si el cable  $R_{c1}$  tiene 1.3 ohms y el  $R_{c2}$  tiene 1.2 ohms, entonces la resistencia medida será  $134.7+1.3+1.2 = 137.2$  ohms y la lectura del instrumento será  $96^{\circ}\text{C}$ .

Un cable común razonablemente grueso sería uno de diámetro equivalente a 18 AWG. La resistencia de este cable es 0.0193 ohms por metro.

Por ejemplo si se usa este cable para medir una resistencia a 15 metros de distancia, la resistencia total de los cables será  $15 \cdot 2 \cdot 0.0193 = 0.579$  ohms lo que inducirá un error de  $1.5^{\circ}\text{C}$  en la lectura.

#### - Con 3 hilos

El modo de conexión de 3 hilos es el más común y resuelve bastante bien el problema de error generado por los cables.

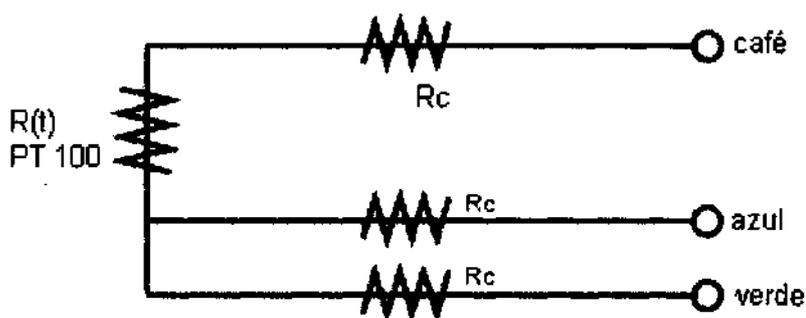
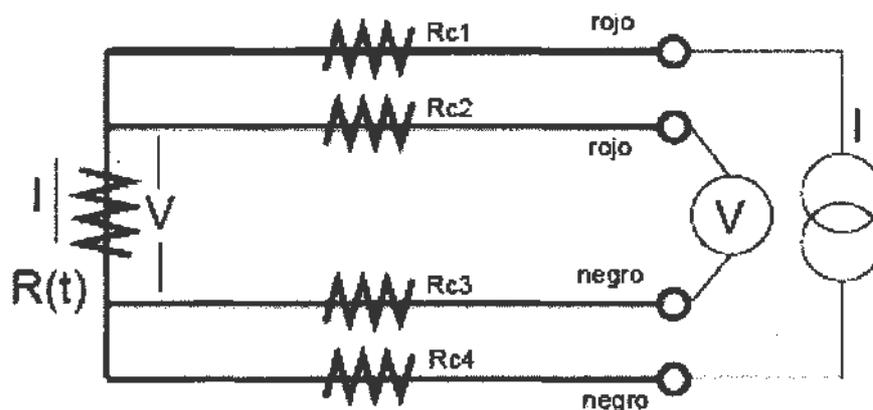


Figura 1.11. Conexión de la Pt 100 con 3 hilos.

El único requisito es que los tres cables tengan la misma resistencia eléctrica pues el sistema de medición se basa (casi siempre) en el "puente de Wheatstone". Por supuesto el lector de temperatura debe ser para este tipo de conexión. En este caso particular, se hace pasar una corriente conocida a través de los cables azul y verde con lo cual el instrumento mide  $2R_c$ . Luego mide la resistencia por los cables café y azul para finalmente restarle  $2R_c$  al valor medido y obtener  $R(t)$ .

#### -Con 4 hilos:

El método de 4 hilos es el más preciso de todos, los 4 cables pueden ser distintos (distinta resistencia) pero el instrumento lector es más costoso.



**Figura 1.12.** Conexión de la Pt 100 con 4 hilos.

Por los cables 1 y 4 se hace circular una corriente  $I$  conocida a través de  $R(t)$  provocando una diferencia de potencial  $V$  en los extremos de  $R(t)$ .

Los cables 2 y 3 están conectados a la entrada de un voltímetro de alta impedancia luego por estos cables no circula corriente y por lo tanto la caída de potencial en los cables  $R_{c2}$  y  $R_{c3}$  será cero ( $dV = I_c \cdot R_c = 0 \cdot R_c = 0$ ) y el voltímetro medirá exactamente el voltaje  $V$  en los extremos del elemento  $R(t)$ . Finalmente el instrumento obtiene  $R(t)$  al dividir  $V$  medido entre la corriente  $I$  conocida.

Tablas de relaciones entre temperatura y resistencia de la Pt 100. Ver en anexo 1.

#### 1.2.4. TERMISTORES.

Llamados también sensores de temperatura resistivos utilizando semiconductores, son de gran sensibilidad y están constituidos por resistencias hechas con materiales semiconductores con coeficientes de temperatura tan grandes como 4%. Se emplean extensamente a pesar de su pobre linealidad; son mucho más sensibles que las resistencias de platino, tienen un elevado coeficiente de temperatura negativo que representa una curva característica lineal tensión-corriente siempre que la temperatura se mantenga constante.

##### 1.2.4.1. Características.

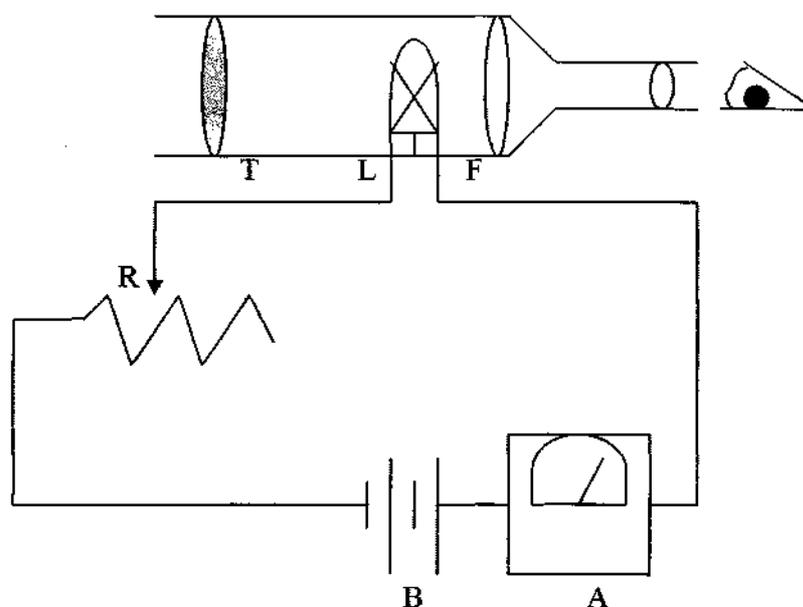
Los Termistores, o resistores térmicos, son dispositivos semiconductores que se comportan como resistencias con un coeficiente de temperatura de resistencia alto y,

generalmente negativo. En algunos casos, la resistencia de un termistor a temperatura ambiente puede disminuir hasta un 6% por cada 1°C que se eleve la temperatura. Dada esta alta sensibilidad al cambio de temperatura hacen al termistor muy conveniente para mediciones, control y compensar con precisión la temperatura. El uso de termistores está muy difundido en tales aplicaciones, en especial en el rango más bajo de temperatura de -100°C a 300°C.

### 1.2.5. PIRÓMETROS.

Los pirómetros de radiación se fundamentan en la ley de Stefan-Boltzman, que dice que la intensidad de energía radiante emitida por la superficie de un cuerpo aumenta proporcionalmente a la cuarta potencia de la temperatura absoluta del cuerpo. En el método pirométrico, temperaturas superiores a cientos de grados centígrados se miden a través de la distribución espectral de la radiación térmica emitida por el material bajo medición. Los pirómetros de radiación miden la temperatura de un cuerpo a distancia en función de su radiación.

Los instrumentos que miden la temperatura de un cuerpo en función de la radiación luminosa que este emite se denominan pirómetros ópticos de radiación parcial o pirómetros ópticos y los que miden la temperatura captando toda una gran parte de la radiación emitida por el cuerpo se denominan pirómetros de radiación total.



**Figura 1.12.** PRINCIPIO DEL PIRÓMETRO ÓPTICO.

El pirómetro óptico consiste esencialmente en un telescopio T provisto de un filtro de vidrio rojo F y una pequeña lámpara incandescente L montada en el tubo.

Cuando el pirómetro se dirige hacia un horno, el observador que mire a través del telescopio ve el filamento oscuro contra el fondo brillante del horno.

El filamento de la lámpara está conectado a una batería B y a un reóstato R.

Variando R puede aumentarse gradualmente la corriente que pasa por el filamento y, por tanto, su brillo hasta que se iguala con el del fondo.

Calibrando previamente el instrumento a ciertas temperaturas conocidas, puede graduarse la escala del amperímetro A del circuito, para leer directamente la temperatura.

Como no es necesario poner en contacto ninguna parte del instrumento con el cuerpo caliente, el pirómetro óptico puede usarse a temperaturas superiores a las de los puntos de fusión de los metales.

### **1.3 ESCALAS TERMOMÉTRICAS.**

Para fijar un criterio de referencia entre las diversas temperaturas se ha establecido una regla uniforme que permita graduar todos los termómetros con esta finalidad se ha tomado como puntos de referencia a 2 temperaturas constantes la del hielo fundente y la del vapor del agua en ebullición.

Las escalas termométricas son mediciones matemáticas de la temperatura y se clasifican en

- a) Escala absoluta
- b) Escalas normales

Escalas absolutas son cero absolutos, es un producto ideal o teórico en donde no existe el estado gaseoso y está designado por - 273 o - 460, lo uno es para la escala centígrada y la otra para la escala Fahrenheit. En cambio que las escalas normales o corrientes se dividen en escalas centígradas o de Celsius y la escala Fahrenheit representadas así respectivamente ( $^{\circ}\text{C}$ ), ( $^{\circ}\text{F}$ ).

Existen en la actualidad varias escalas termométricas de las cuales las más importantes son:

### **13.1. ESCALA DE CELSIUS.**

Llamada también centígrada es actualmente la más difundida. Los índices que se fundamentan son 0°C a la temperatura de fusión del hielo y 100°C a la temperatura del vapor del agua en ebullición, esta escala puede extenderse en valores superiores como también en valores inferiores, para explicar mejor, Celcio dividió el espacio comprendido entre la temperatura del hielo y la del agua hirviendo en 100 partes iguales que grabó en su termómetro. Cada uno de ellos se llamó grado.

### **13.2. ESCALA DE REAUMUR.**

Reaumur dividió para su termómetro la distancia comprendida entre el hielo fundido y la del agua hirviendo en 80 partes iguales por lo tanto los 100g. Celsius equivalen a 80 Reaumur. Como  $100^{\circ}\text{C} = 80^{\circ}\text{R}$ ;  $1^{\circ}\text{C} = 800/100\text{R}$  o  $4 / 5 \text{ R}$ . Se utiliza aún en Francia y en Bélgica. En ello se señalaron, 0°R para la temperatura de fusión del hielo y 80°R para la temperatura de ebullición del agua ambos a presión de un atu.

### **1.3.3. ESCALA FAHRENHEIT.**

Este físico tomó la temperatura del agua hirviendo y otra más fría que la del hielo y dividió en 212° correspondientes el grado 32 de este termómetro al grado 0 de la otra manera que los 180° sobrantes corresponden a 100°C y 80°R. Se utilizó principalmente en los países anglosajones. La temperatura de fusión del hielo se señala en 32 F en tanto que la temperatura de ebullición del agua se fijó a 212T.

### **1.3.4. ESCALA DE KELVIN**

Según la ley de Charles:

$$(2) V_t = V_o (1 + 1/273.t) = V_o/273(273 + t) = K1T$$

Ley de Gay - Lursac

$$(3) P_t = p_o (1+1/273.t)= P_o/273(273+ t) = K2T$$

En las expresiones (2) y (3) sugiere la posibilidad de una nueva escala de temperatura en la cual el valor del grado sea igual al grado de la escala centígrada para con el valor  $-273^{\circ}\text{C}$ .

### 1.3.5. RELACIÓN ENTRE LAS ESCALAS DE TEMPERATURA.

**Tabla 1.2 RELACIÓN ENTRE LAS ESCALAS DE TEMPERATURA.**

	K	C	R	F
Punto de vaporización del Agua	373°	0°	492°	32°
Punto de Fusión del hielo	273°	78°	351°	109°
Punto de solidificación del CO <sub>2</sub>	195°	183°	162°	298°
Punto de ebullición del Oxígeno líquido	90°	273°	0	460°
Cero Absoluto	0			

## **CAPITULO II**

### **TRANSFERENCIA DEL CALOR**

#### **2.1 DEFINICIÓN DE CALOR.**

Podemos decir que el calor es una forma de energía presente en el movimiento molecular, además esta energía se puede transferir debido a la diferencia de temperaturas entre uno o más sistemas y su entorno. Existen muchas fuentes de calor y las principales son las fuentes Naturales y las fuentes Artificiales.

Las Fuentes Naturales son fuentes energéticas espontáneas, no intervienen para su generación la mano del hombre, como por ejemplo podemos citar el calor del sol. En cambio las fuentes artificiales, son aquellas en las que interviene la mano del hombre para su generación, así tenemos la generación de calor por energía eléctrica, etc.

#### **2.2. FLUJO CALORÍFICO.**

Es una transferencia de energía o calor que se produce exclusivamente en virtud de una diferencia de temperatura a través de una superficie de una unidad de área por una unidad de tiempo.

Los físicos han clasificado los fenómenos del transporte del calor en tres tipos distintos, los cuales corresponden a tres clases de procesos diferentes que son:

- Conducción
- Convención
- Radiación

La diferencia que existe entre estos otros procesos fundamentales puede ser puesta con la ayuda de tres ejemplos extraídos de nuestra vida cotidiana. Así tenemos que el calor que es transmitido por contacto entre la plancha de una estufa y una cacerola es un ejemplo de conducción, si tenemos un radiador que al conductor de aire que lo rodea hace que este se eleve, dando lugar a la circulación de aire en la habitación el cual se calienta entonces por convención.

Además también existe la temperatura que es medida por instrumentos de medida que sirve para determinar la temperatura de los cuerpos, o sea, que podemos decir que una medida de la temperatura sería el calor, se conoce una constante que, se obtiene de la relación entre la temperatura y el tiempo a esta constante se la conoce constante de rapidez de calentamiento.

Para explicar mejor estos tres fenómenos expondremos el siguiente ejemplo, a una persona expuesta a la radiación ultravioleta producida por una lámpara de cuarzo y que por radiación puede llegar a broncearse tan rápidamente como lo hacía en la playa.

A continuación explicaremos cada uno de estos fenómenos.

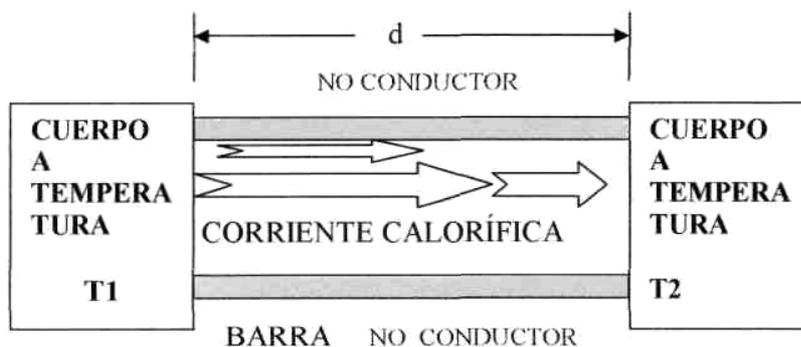
### **2.2.1 TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCIÓN.**

Es un proceso de transformación de calor por el cual partículas agitadas de la superficie del cuerpo más caliente al chocar con moléculas quietas del cuerpo frío permite que estos adquieran mayor energía cinética y que las primeras disminuyen energía. Las partículas de la superficie del cuerpo, más frío que ya recibieron energía de agitación del cuerpo más caliente chocan a su vez con sus residuos internos y las permiten dar parte de su energía continuando así este proceso. . La capacidad de conducción del calor propio solamente de los metales ya que solamente los metales transmiten el calor de la parte caliente a la parte fría pero solo por contacto.

El calor se propaga por conducción cuando se han comunicado de una molécula a otras de su cuerpo hasta que llega a calentarse totalmente. Todos los metales se calientan por conducción, ejemplo, si calentamos una barrilla llegará un momento en que tendremos que soltarla porque nos quemará. La participación relativas de las moléculas de las sustancias no varía, solamente varía la energía. Esta manera de transferir energía de calor de un punto a otro es característica de los cuerpos sólidos. Cuando tocamos con la mano un pedazo de hierro y un pedazo de madera, según el termómetro tienen la misma temperatura, pero sentimos como si el hierro estuviese más frío.

Esto se debe a la rapidez con que el hierro conduce el calor, de nuestra mano. Se comprueba que esta cantidad de calor transmitida  $Q$  proporcional a el área  $A$  de la

carga a través de la cual se estudia la conducción al tiempo  $t$  y a la diferencia de temperatura  $t_2 - t_1$ , entre las dos cosas siendo inversamente proporcional a su expresor  $d$ . Este es:  $Q = KAt \cdot t_2 - t_1/d$ , como se muestra en la figura 2.1.



**Figura 2.1.** Conducción del calor.

### 2.2.2 TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN.

Si existe una diferencia de temperatura en el interior de un líquido o un gas, es casi seguro que se producirá un movimiento del fluido. Este movimiento transfiere calor de una parte del fluido a otra por un proceso llamado convección. El movimiento del fluido puede ser natural o forzado. Entonces; se denomina convección a la transferencia de calor a causa del desplazamiento de las moléculas de un medio. Es la forma de intercambio de calor que nos es más familiar. Supongamos, por ejemplo, que calentamos desde abajo una cacerola llena de agua. El líquido más próximo al fondo se calienta por el calor que se ha transmitido por conducción a través de la cacerola. Al expandirse, su densidad disminuye y como resultado de ello el agua caliente asciende y parte del fluido más frío baja hacia el fondo, con lo que se inicia un movimiento de circulación. El líquido más frío vuelve a calentarse por conducción, mientras que el líquido más caliente situado arriba pierde parte de su calor por radiación y lo cede al aire situado por encima. El proceso continúa y se produce circulación continua de corriente de agua más caliente hacia arriba y más fría hacia abajo, demasiadas corrientes de convección. Esta forma de transmisión de calor es propia solamente de los líquidos y de los gases, se produce este fenómeno

por el intercambio de masas calientes con masas frías como por ejemplo, el viento a las corrientes marinas.

La convección es responsable de la formación de los vientos de las corrientes oceánicas, del desplazamiento de los humos de la chimenea, de la circulación de aire caliente de los sistemas de calefacción de las casas, de la circulación del aire en las refrigeradoras, etc. La convección tiene un papel importante en la transformación del calor entre una pared y un fluido en movimiento debido a que el coeficiente de conducción térmica de los fluidos y en partículas de los gases es relativamente pequeña y la complejidad de este fenómeno hace difícil una ley simple que permita colocar los intercambios de calor que se producen por convección. En la convección "**forzada**" se utilizan medios mecánicos para favorecer el mezclado, por ejemplo, ventiladores, bombas o cuando calentamos nuestros alimentos es muy común que utilicemos un cucharón para agitar el fluido y obtener un calentamiento más uniforme. La rapidez se determina con la ecuación:

$$H = h \cdot A \cdot \Delta T$$

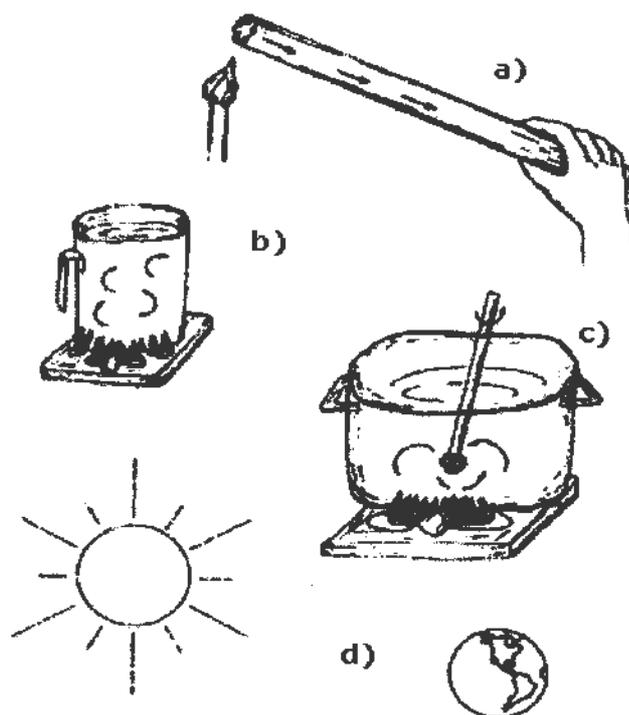
Donde: **h** (Constante de transferencia por convección)

**$\Delta T$**  ( $T_2 - T_1$ : temperatura inicial - temperatura final)

**A** (Área del cuerpo en contacto con el ambiente)

### 2.2.3 TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACIÓN.

La radiación de esta es otra forma de transmisión que tiene el calor. Es donde el calor se transmite en forma de ondas desde el origen como por ejemplo: calor solar o también el calor de las fogatas. También un cuerpo que transmite calor lo hace por medio de ondas, todo el cuerpo que contiene el calor lo emite por medio de radiación así como un foco de luz emite radiación más luminosa. Así el sol emite sus radiaciones caloríficas que llegan hasta nosotros.



**Figura 2.2.** Transmisión de calor

(a) Por conducción (b) Por convección libre (c) Por convección forzada, y (d) Por radiación.

### 2.3. CANTIDAD DE CALOR.

La capacidad calorífica de un cuerpo es la razón o cociente entre el calor ganado o perdido  $\Delta Q$ , para la variación de temperatura  $\Delta T$ , esto es:  $C = \Delta Q / \Delta T$  (Ec.1); mientras que el calor específico de un cuerpo es la capacidad calorífica por unidad de masa, esto es:  $C_e = C/m$  (Ec.2).

Reemplazando la ecuación 1 en la ecuación 2, y despejando  $\Delta Q$ ; es decir la cantidad de calor necesaria para aumentar la temperatura de una masa  $m$  de sustancia en un diferencial de temperatura obtenemos la ecuación 3:  $\Delta Q = m \cdot C_e \cdot \Delta T$ ; donde el calor específico  $C_e$  depende del material o sustancia.

## CAPITULO III MOTOR ELÉCTRICO

### 3.1 DEFINICIÓN

"Máquina con la capacidad de transformar energía eléctrica en energía mecánica transferida a un eje de rotación para la ejecución de un trabajo."

### 3.2 PARTES COMPONENTES DE UN MOTOR ELÉCTRICO.

1. CARCASA ( Estator, yugo, bobinados)
2. TAPA ANTERIOR (FRENTE)
3. BASE
4. FLECHA O EJE DEL ROTOR (Jaula de ardilla, doble jaula, rotor bobinado)
5. CAJA DE CONEXIONES (bornera)
6. TAPA POSTERIOR

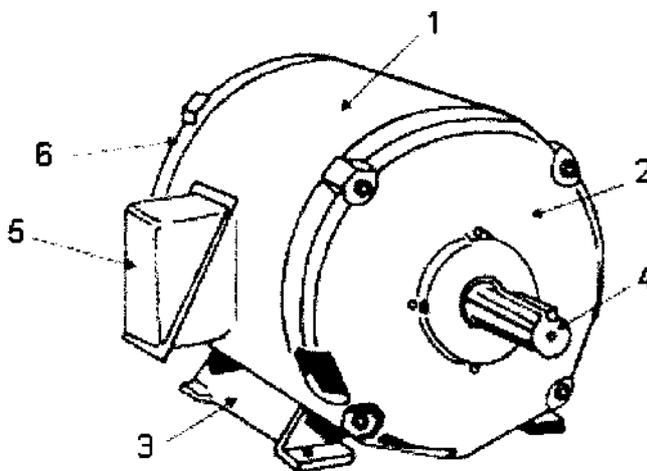


Figura 3.1. Partes de un Motor Eléctrico.

#### 3.2.1 CLASIFICACIÓN POR SU DISEÑO ELÉCTRICO.

1) Motores asincrónicos polifásicos de inducción:

- Jaula de ardilla
- Doble jaula de ardilla
- Rotor bobinado

2) Motores asincrónicos monofásicos de inducción:

- Fase partida
- Con condensador
- Con doble condensador

3) Motores asincrónicos polifásicos con colector:

- Motores shunt
- Motores series

4) Motores asincrónicos monofásicos con colector:

- Motores universales
- Motores de repulsión

5) Motores de polos sombreados

### **3.2.2 FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR TRIFÁSICO.**

El motor trifásico basa su funcionamiento en la inducción electromagnética y es así que cuando se conecta el motor a la red trifásica se establece un campo magnético giratorio alrededor del grupo o núcleo de chapas del estator, este campo induce voltaje en las barras del rotor jaula de ardilla, a la vez este voltaje hace que circule corriente por las barras apareciendo otro campo magnético alrededor de las mismas. Entonces la combinación de los dos campos magnéticos, el de las barras del rotor y el principal que esta girando alrededor del núcleo hacen que el rotor gire.<sup>2</sup>

<sup>2</sup> CHILUISA CARLOS. Curso de Taller Eléctrico. Escuela Politécnica Nacional-Esfot. Módulo V. Unidad 7. Pág.2

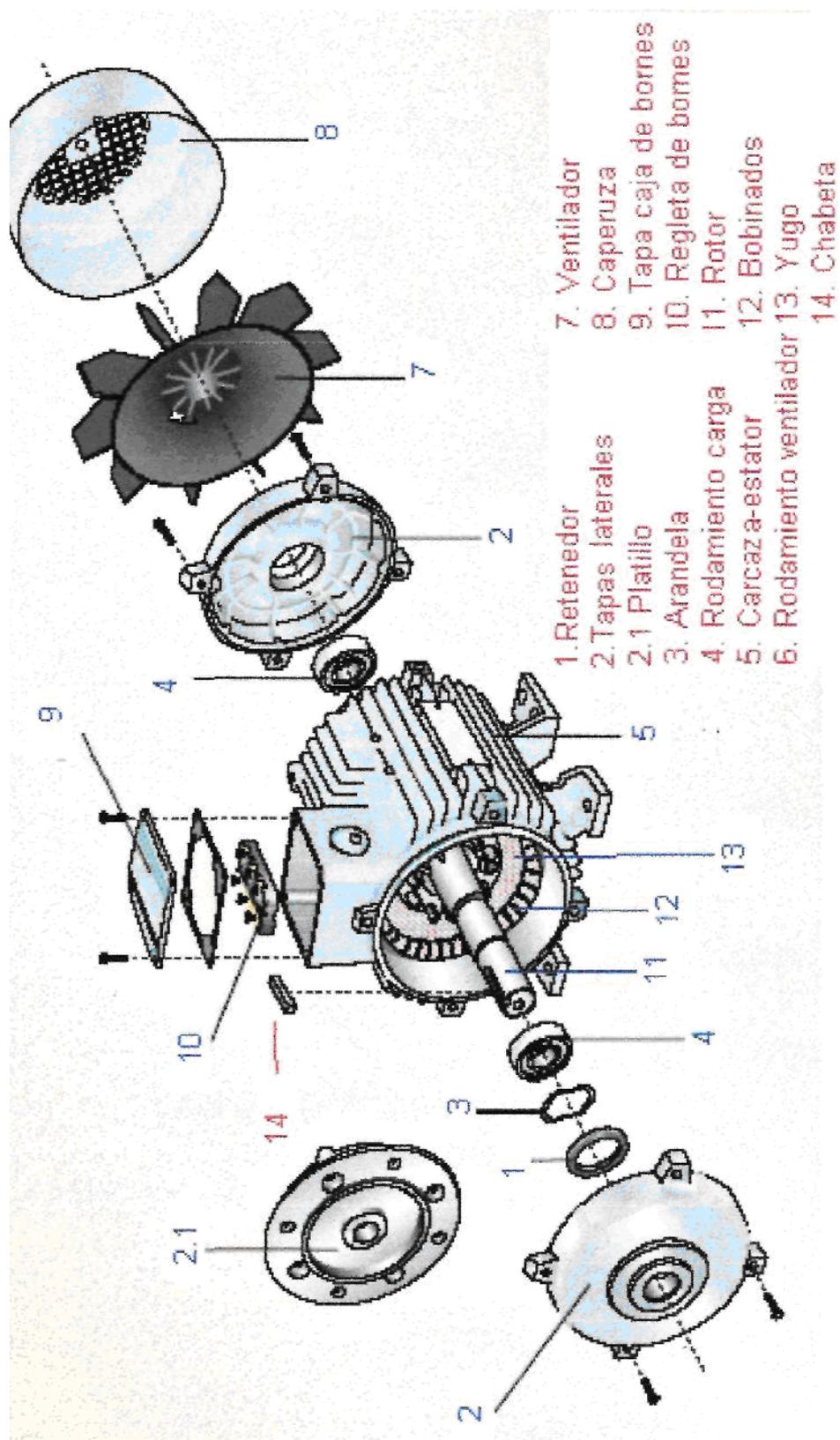


Figura 3.2. Despiece de un motor trifásico de inducción.

### 3.3 ZONAS DE FALLAS EN LOS MOTORES ELÉCTRICOS.

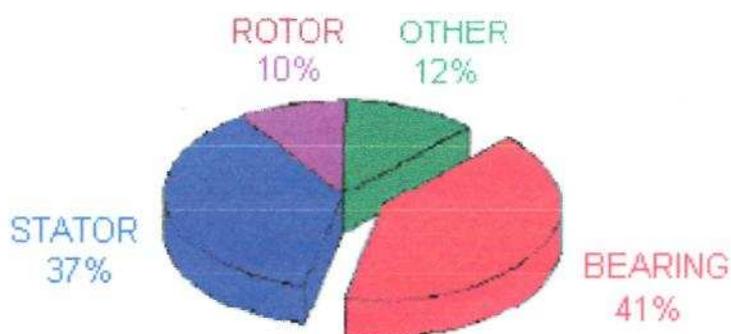
Comúnmente las únicas herramientas usadas por el personal de mantenimiento para detectar fallas en motores han sido un megger (medidor de aislamiento) y un óhmetro.

Desdichadamente la información brindada es muy general y no precisa la zona de falla del motor en estudio. Es muy fácil el diagnóstico erróneamente si se confía solo en los resultados de un megger.

Por ejemplo, un corto entre espiras o entre fases puede perfectamente estar disparando un motor y al medir el aislamiento este presenta un buen estado, ya que estas fallas aunque son un problema de aislamiento en el devanado podrían estar aisladas completamente de tierra y por lo tanto el megger no las detecta.

Este tipo de anomalías deteriora rápidamente el devanado lo cual resultara en un futuro reemplazo u "overhaul" del motor.

También se ha usado el análisis por vibraciones para detectar fallas en el rotor, estator y excentricidad.



**Figura 3.3.** Estudio de Fallas en Motores Eléctricos.

La figura 3.3, muestra un estudio realizado entre el Electric Power Research Institute (EPRI) y General Electric en 1985. El propósito de este estudio fue el mostrar las verdaderas fuentes de falla en motores eléctricos.

Como observamos, ni vibraciones, ni un óhmetro, ni un megger logra revisar todas las zonas de falla de un motor, entonces, la tecnología predictiva que se puede estar aplicando no es suficiente para evaluar todos los componentes que pueden causar la falla de un motor.

Las pruebas eléctricas aplicadas a un motor deben ser confiables y deben dar un diagnóstico completo de todas las zonas o áreas de falla de un motor. Las pruebas a realizar deben incluir pruebas tanto con motor energizado como con motor detenido. Las pruebas con motor detenido son de particular importancia en aquellos casos en que un motor se este disparando y su puesta en funcionamiento puede terminar de dañarlo, o en el caso de pruebas de puesta en marcha al instalarse un nuevo equipo de producción. Para el diagnóstico de un motor, analizaremos las siguientes zonas o áreas de fallas.

- Circuito de Potencia
- Calidad de energía
- Aislamiento
- Estator
- Rotor
- Excentricidad (entrehierro)

El análisis de estas 6 zonas nos permite distinguir entre un problema mecánico o eléctrico, y en el caso de un problema eléctrico detallar la solución.

### **3.3.1 CIRCUITO DE POTENCIA.**

Generalmente se establece desde el Centro de Control del Motor (MCC) hasta la caja de bornes del mismo, e involucra a todos los conductores con sus bornes, interruptores, protecciones térmicas, fusibles, contactores y cuchillas.

Los falsos contactos han sido la fuente de un 46% de las fallas en motores, por lo que aunque muchas veces el motor este en excelente estado, este se instala en un circuito de potencia defectuoso, que a la postre lo daña.

Los problemas de conexiones de alta resistencia (se oponen al paso de la corriente) son variados, entre ellos, tenemos.

- Generación de armónicas
- Desbalances de voltaje
- Desbalances de corriente

Típicamente las conexiones de alta resistencia son causadas por:

- Terminales corroídos
- Cables sueltos
- Barras sueltas
- Prensa fusibles corroídos
- Hilos abiertos
- Conexiones entre Aluminio - cobre
- Diferentes tamaños de conductores

Uno de los métodos que usamos para detectar defectos en el circuito de potencia en un motor / generador, trifásico es la medición de resistencia entre fases, es una prueba estática con motor detenido. En un equipo en buen estado las tres lecturas entre las fases deberían ser casi idénticas, su desbalance resistivo debe ser menor a un 5%.

Dinámicamente, con motor energizado el circuito es evaluado completamente al detectarse desbalances de voltaje en cualquiera de las fases.

Otro de los métodos utilizados para complementar el diagnostico del circuito de potencia es la termografía IR, sin duda una de las técnicas mas conocidas para detectar falsos contactos. Ver anexos.

### **3.3.2 CALIDAD DE ENERGÍA.**

La calidad de energía ha sido ignorada en muchos casos por el personal de mantenimiento y sin duda es una zona de falla con mucha influencia en la vida de un motor.

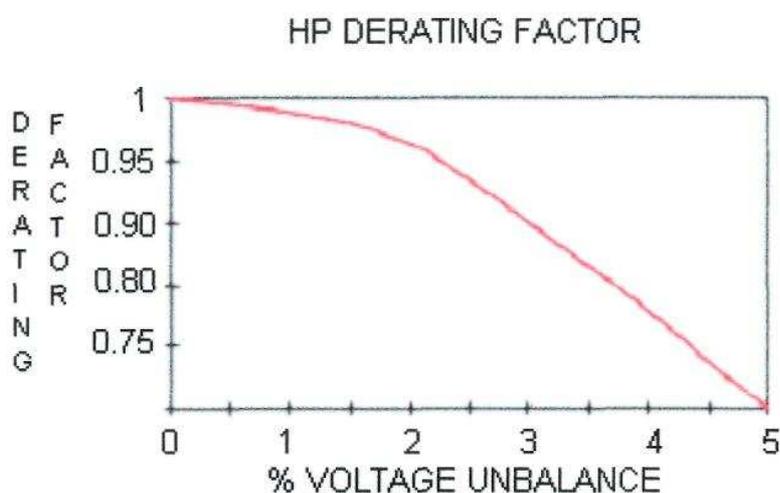
Existen varios factores involucrados en la calidad de energía; distorsión armónica tanto de voltaje como de corriente, picos de voltaje, desbalances de voltaje y factor de potencia son algunos de estos.

Sin embargo, con relación a las fallas en motores eléctricos nos concentraremos en dos de estos factores:

### 1) Desbalance de Voltaje.

Cuando los voltajes de línea aplicados a un motor no son equilibrados se desarrollan corrientes desbalanceadas en los devanados del estator, a estas se les conoce como corrientes de secuencia negativa y reducen el torque del motor. Se producen dos efectos importantes, aumenta la temperatura en el devanado y aumenta su vibración. Un aumento de la temperatura por encima de su valor permitido provocaría daños al aislamiento, y el aumento en los niveles de vibración provocaría en algún grado solturas mecánicas, rodamientos y aflojamiento/rietas bobinas. Con desbalances de voltaje presentes la potencia de placa de un motor debe ser multiplicado por un factor de reducción  $\leq 1$ , tal y como se observa en la figura 3.4. De acuerdo a NEMA ningún motor debe ser operado con desbalances de voltaje mayores a un 5%.

Por ej: Si un motor cuya potencia es 10 HP, tiene un desbalance de voltaje de 0% ,es decir, tiene voltajes casi equilibrados en sus 3 fases, el factor de reducción es 1, por lo que tenemos que  $10 \text{ HP} \times 1 = 10\text{HP}$ , entonces no tenemos una reducción en su potencia; mientras que si tuviera un desbalance de 3% de voltaje, el factor de reducción seria 0.9 y tendríamos:  $10\text{HP} \times 0.9 = 9 \text{ HP}$  de potencia, lo que significa 1HP de pérdida de la potencia nominal.



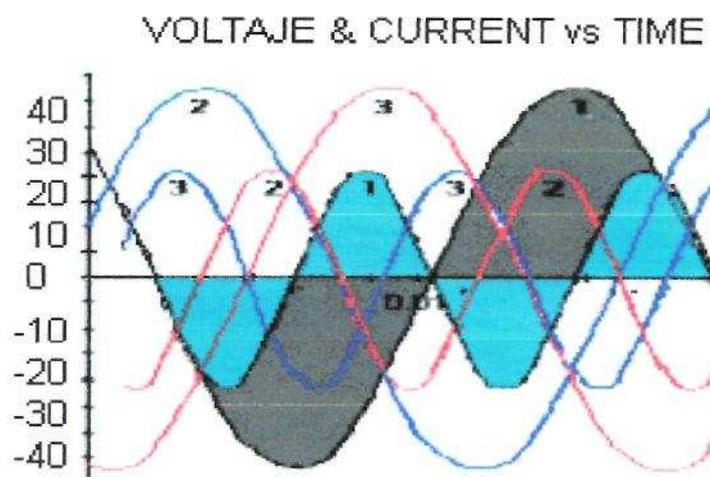
**Figura 3.4.** Factor de reducción de potencia (NEMA)

## 2) Armónicas.

Con la popularidad de los “drives” de CA y CD para motores se crean distorsiones importantes en la forma de onda de voltaje, a estas se les conoce como armónicas. El parámetro más conocido es la distorsión armónica Total (THD, en inglés) en términos simples es el valor RMS de la señal con la frecuencia fundamental removida. O sea, una onda sinusoidal perfecta de 60Hz tendría un THD de 0%. Cualquier otra onda presente junto con la fundamental se le considera distorsión armónica.

Entonces, las armónicas son señales que distorsionan a la onda fundamental, tienen una forma sinusoidal y están presentes en múltiplos de la fundamental.

Las armónicas existen en todos los sistemas trifásicos y son generadas por cargas no-lineales como: Convertidores de potencia electrónicos: rectificadores y variadores de frecuencia (VFD), Fluorescentes, Hornos de arco, UPS, etc.



**Figura 3.5** Armónicas

La figura 3.5, muestra la onda fundamental (negra) a 60Hz pero con otra onda sobrepuesta (verde), esta última completa 2 ciclos en el mismo tiempo que la fundamental completa uno, y se le conoce como la 2da. Armónica con una frecuencia de  $2 \times 60\text{Hz} = 120\text{Hz}$ .

Existen tres tipos de armónicas las cuales se las puede observar en el gráfico:

- Secuencia positiva: Crea un campo magnético en la dirección de rotación, por lo tanto ayuda al torque del motor; en el gráfico onda azul 3 respecto a la onda roja 2.
- Secuencia negativa: Se opone a la rotación del motor e incrementa la demanda de corriente a una carga determinada; en el gráfico onda roja 3 respecto a onda azul 2.
- Secuencia cero: No produce ningún trabajo, pero causa calentamiento y retorna al transformador de alimentación y sobre carga al mismo. Produce por lo tanto calentamiento en el transformador también.

### 3.3.3 AISLAMIENTO.

Cuando hablamos de la condición de aislamiento nos referimos a la resistencia que existe entre este a tierra (RTG, en ingles). La RTG indica que tan limpio o sano esta un aislamiento.

Se dice que un circuito está a tierra cuando la corriente se sale de su trayectoria normal y se va hacia la carcasa del motor. Esta falla es causada cuando el aislamiento se rompe o falla, o bien, es dañado y hace contacto con la carcasa del motor.

Para que se de una **falla a tierra**, deben de ocurrir dos cosas. Primero debe crearse un camino de conducción a través del aislamiento. Conforme el aislamiento envejece se fisura y posibilita que se acumule material conductor. Segundo, la superficie exterior del aislamiento se contamina de material conductor y conduce suficiente corriente a la carcasa o núcleo del motor que esta conectado a tierra.

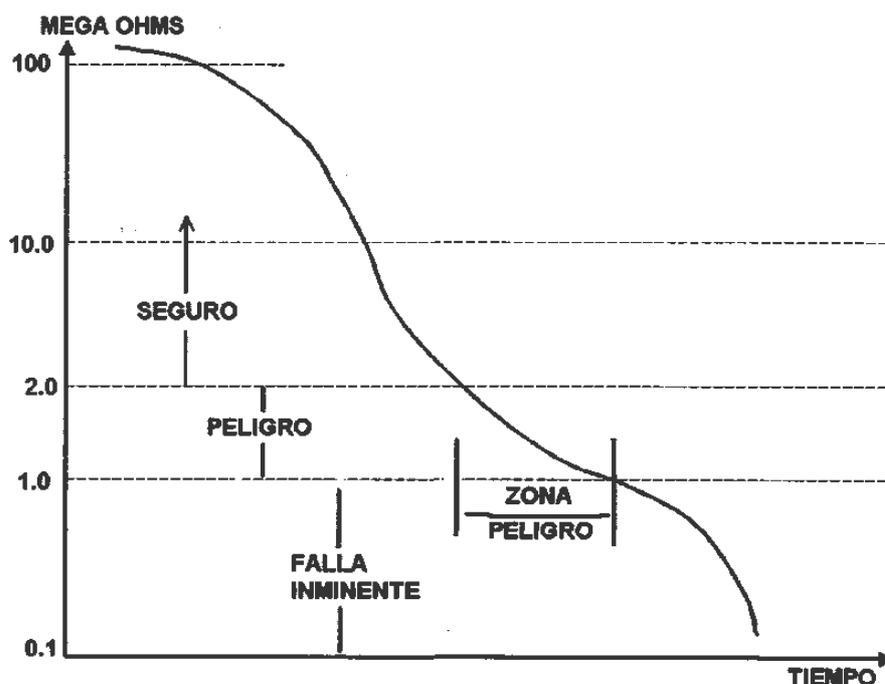
Hoy en día los sistemas de aislamiento han mejorado notablemente y son capaces de soportar mayores temperaturas sin sacrificar su vida esperada. La máxima temperatura de operación de un motor o generador depende principalmente de los materiales usados en su construcción, existen varias clases, pero las más usadas son:

- Aislamiento clase B, temperatura máxima 130°C
- Aislamiento clase F, Temperatura máxima 155°C
- Aislamiento clase H, temperatura máxima 180°C

Dichas temperaturas máximas, son a las cuales el aislamiento podría colapsar. Generalmente al medir la temperatura de la carcasa del motor, asumimos que el aislamiento esta en 20°C más alto que esta.

Por ejemplo, si observamos que la temperatura de la carcasa de un motor clase B es de 120°C, podría estar muy seguro que la temperatura del aislamiento esta a por lo menos 140°C excediendo la temperatura máxima permitida para esa clase de aislamiento.

El aislamiento pierde muy rápido sus propiedades al aumentar la temperatura, este mismo motor en vez de durar aproximadamente 15 años, duraría alrededor de 3 años.



**Figura 3.6.** Degradación del aislamiento respecto al tiempo.

La figura 3.6 muestra la relación de tiempo de falla respecto al aislamiento medido en MΩ, en donde observamos las zonas en las cuales un equipo puede estar trabajando de acuerdo a los valores de aislamiento que este presente, mientras este sobre los 2 MΩ entra en la zona de seguridad, pero si el aislamiento está por debajo de este valor entra en la zona de peligro o de una inminente falla en un periodo de tiempo cercano

El determinar la causa raíz de una falla en el aislamiento de un motor, puede involucrar alguno de estas causas posibles.

- Circuito de potencia: Una conexión de alta resistencia, produce un voltaje de línea desbalanceada
- Armónicas: que introducen corrientes de secuencia negativa y sobrecalentando el devanado.
- Ambiental: Contaminación en el motor.
- Corto entre espiras: Produce campos magnéticos desbalanceados, aumentando la temperatura y degrada el aislamiento.

### **3.3.4 ESTATOR.**

En un estator es importante el diagnosticar los devanados, el aislamiento entre vueltas, soldado de juntas entre las espiras y el núcleo del estator o laminaciones.

Tal vez, la falla más común es un corto entre vueltas, esto reduce la habilidad de producir un campo magnético balanceado. Esto a la vez trae otras consecuencias como un aumento en la vibración de la máquina, y por ende degradación del aislamiento y daños a los rodamientos del motor. Generalmente este tipo de cortos aumenta la temperatura y el corto se expande a un corto entre espiras y eventualmente destruye todo el motor.

Aún más grave que esta es la falla entre fases, un corto de este tipo acelera rápidamente la destrucción del motor.

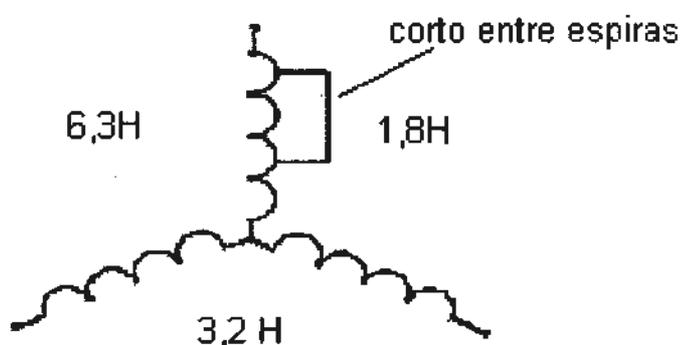
Fallas de este tipo pueden ocurrir varias veces en un motor y no resultan en una falla a tierra. Debido a esta razón, el utilizar solamente un megger como herramienta predictiva es insuficiente ya que este tipo de fallas pueden ser pasadas por alto. Sí el núcleo del motor se llegase a dañar el reemplazo del motor sería total. El diagnóstico de esta zona de falla puede ser efectuada directamente en los terminales del motor o desde el Centro de Control de Motores (MCC).

La prueba estática involucra mediciones de inductancia entre fases, para esto se envían señales de CA a alta frecuencia, y se calcula un desbalance inductivo. Un desbalance presente implica que las fases producen campos magnéticos desbalanceados y que muy probablemente tiene cortos entre vueltas o espiras.

También como parte de la prueba se toman valores de resistencia, si excede un valor predeterminado indica que pueden existir conexiones de alta resistencia en el circuito hacia el motor o en las juntas de soldado.

La figura 3.7 muestra gráficamente el efecto en un devanado en estrella.

La prueba dinámica con motor energizado identifica una falla en el estator tomando mediciones de voltaje y corriente por fase y calculando la impedancia en cada una. Si una fase tiene problemas en los devanados, el desbalance de impedancia aumenta.



**Figura 3.7.** Desbalance inductivo - corto entre espiras.

### 3.3.5 ROTOR.

Cuando nos referimos a la condición de un rotor se deben de revisar; las barras, laminaciones y los anillos de corto circuito.

Un estudio mostró que un 10% de fallas en motores se debió al rotor.

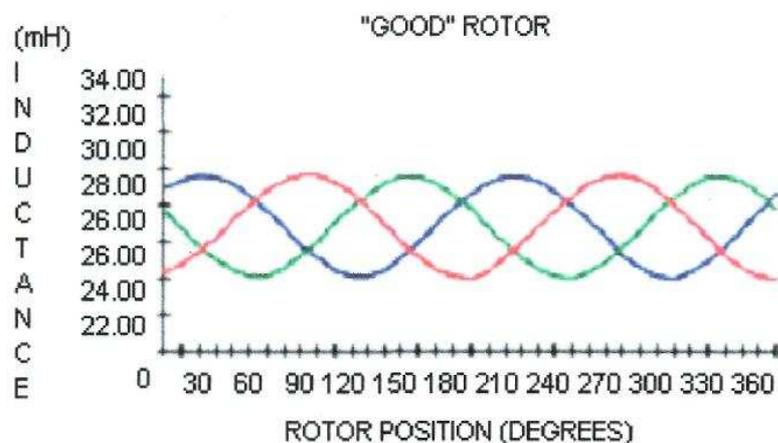
Una barra rota genera un calor intenso en la zona de ruptura y puede destruir el aislamiento cercano a las laminaciones y el devanado estático colapsará.

Desdichadamente, muchas veces, los problemas en las barras del rotor no son fácilmente detectables con tecnologías comunes y se obvia como causa-raíz. Habido la experiencia de muchas empresas que rebobinan varias veces un motor sin saber que la raíz del problema en el devanado estaba en el rotor.

Se puede detectar un problema en el rotor mediante la prueba del Rotor Influence Check (RIC), esta prueba es estática y relaciona el magnetismo entre el rotor y el estator.

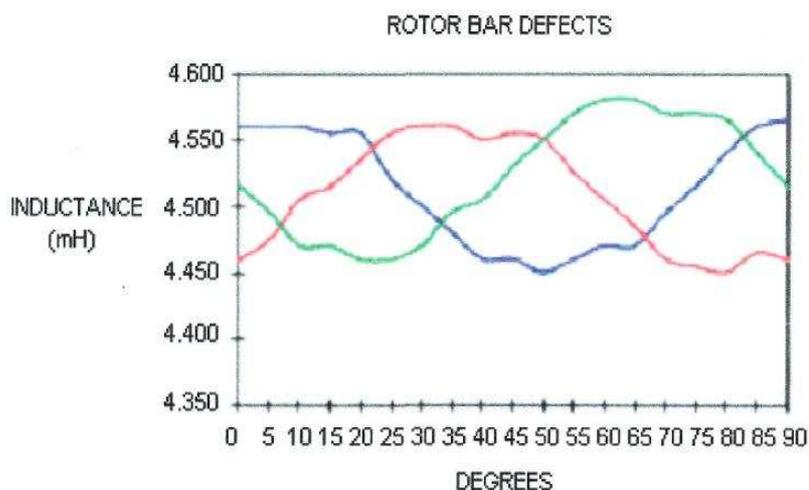
La prueba se realiza al rotor en incrementos específicos (determinados por el número de polos del motor) y tomando la lectura en el cambio de inductancia para cada fase.

Se recomienda efectuar la prueba del RIC como prueba inicial para un motor en su primer análisis.



**Figura 3.8.** RIC - rotor en buen estado.

La Figura 3.8 muestra un rotor en buenas condiciones, ya que los valores de inductancia son equilibrados en las 3 fases( onda azul, verde y roja) en cada grado de rotación del rotor; mientras que la figura 3.9 nos indica el R.I.C de un rotor con barras rotas ya que los valores de inductancia son erráticos y periódicos causados por la distorsión de flujo alrededor de la barra rota.



**Figura 3.9.** RIC rotor con barras rotas.

Dinámicamente se identifica las barras rotas en un análisis de corriente del motor, este se desarrolla al tomar la señal corriente de las tres fases del motor y se pasa al dominio de la frecuencia.

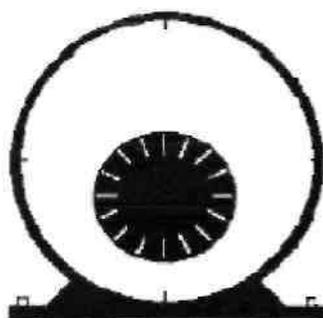
El análisis dinámico identifica una falla en el rotor como una banda lateral, a la frecuencia de línea a una frecuencia llamada frecuencia de paso de polo ( $F_p$ ).

Al utilizar tanto el análisis estático como dinámico para diagnosticar un problema en un rotor se tiene un alto nivel de confianza, especialmente cuando se tiene que sacar un motor importante de servicio.

### 3.3.6 EXCENRICIDAD

El rotor de un motor o generador debe estar centrado, existe un claro entre estos denominado "**Air Gap**", si este Air Gap no esta bien distribuido en los 360° del motor se producen campos magnéticos desiguales.

Se ha discutido ampliamente el efecto adverso que provocan estos campos magnéticos desiguales que a la larga resultará en una falla en el aislamiento y falla en los rodamientos. Este problema se le conoce como excentricidad, existen básicamente dos tipos, la estática en la cual el rotor esta descentrado pero fijo en un lugar generalmente este tipo de problemas es causado cuando los alojamientos de los roles están desalineados, por un inadecuado alineamiento o por que la carcasa del motor fue torcida cuando se instaló en su base. La figura 3.10 muestra como es la excentricidad estática.



**Figura 3.10.** Excentricidad estática.

El otro tipo de excentricidad es la dinámica, y como resultado el rotor se balancea dentro del estator, por lo tanto la inductancia varía. La excentricidad dinámica es producida por una deflexión en el eje generalmente.



**Figura 3.11.** Excentricidad dinámica.

### **3.4 MANTENIMIENTO DE UN MOTOR ELÉCTRICO.**

#### **3.4.1 DEFINICIÓN DE MANTENIMIENTO.**

**"Es una técnica de dirección que provee los medios necesarios para la conservación de los elementos físicos de una industria, en condiciones de operar con la máxima eficiencia, seguridad y economía"<sup>3</sup>**

**"El mantenimiento puede definirse como el trabajo necesario para que las fábricas y factorías de diversas índoles (factorías metalúrgicas, talleres de construcción mecánica, refinerías de petróleo, fábricas de hilados, etc.) se hallen siempre en buenas condiciones de funcionamiento."<sup>4</sup>**

#### **3.4.2 OBJETIVO DEL MANTENIMIENTO PREVENTIVO A UN MOTOR ELÉCTRICO.**

El principal objetivo del mantenimiento preventivo a un motor eléctrico, es garantizar que el equipo se encuentre en óptimas condiciones de operación, y aumentar su vida útil.

El mantenimiento predictivo se puede definir como una herramienta de planeación de mantenimiento usada para determinar la necesidad de acciones correctivas de mantenimiento. Los datos obtenidos en un programa de mantenimiento predictivo, proporcionan información para aumentar capacidad de producción, calidad del producto y efectividad de la planta.

Algunas herramientas usadas en mantenimiento predictivo son: análisis de aceite, termografía, monitoreo de vibración, análisis de gas, parámetros del proceso, monitoreos ultrasónicos, inspecciones visuales y mediciones eléctricas.

<sup>3</sup> JACOME J., FERNANDO. Curso de Mantenimiento Industrial. Escuela Politécnica Nacional-Esfot. Pág. 2.

<sup>4</sup>CEAC. Curso del Técnico Electricista. Impreso en España. Trama color S.A. Octubre 1974. Pág. 2621.

### 3.4.3 EQUIPOS DE PRUEBA PARA MANTENIMIENTO PREVENTIVO DE UN MOTOR ELÉCTRICO.

Los aparatos e instrumentos utilizados en la detección de fallas y reparación de motores eléctricos son muy variados, como: el multímetro, el mega óhmetro, el termómetro, comparador de carátula y nivel de burbuja, y otros aparatos que están expresamente diseñados para estas operaciones, como son: la lámpara de prueba, las brújulas, el zumbador o Growler y el tacómetro.

Las pruebas de detección de fallas en motores eléctricos se pueden hacer en campo o en un taller, pero las reparaciones eléctricas se hacen normalmente en los talleres eléctricos, por lo que estos aparatos de deben existir como mínimo.

A continuación detallaremos algunos tipos de herramientas para la de detección de fallas en los motores eléctricos:

#### 3.4.3.1 Multímetro.

Las mediciones eléctricas se requieren cuando se instala, opera o repara equipo eléctrico. El multímetro es el medidor más comúnmente usado. Es capaz de medir dos o más cantidades eléctricas. Los multímetros, generalmente, son instrumentos ligeros de tipo portátil que se pueden usar para medir en C.A. o en C.D. Puede medir voltaje (V), corriente (A) y resistencia ( $\Omega$ ).



**Figura 4.12.** Multímetro o pinza amperimétrica.

### 3.4.3.2 Megaóhmetro.

También conocido como megger, es un dispositivo que se emplea para medir resistencias de muy alto valor, por ejemplo: las que hay en el aislamiento de cables entre los devanados de los motores o transformadores. Estas resistencias, generalmente, varían de varios cientos a miles de ohmios. Ver figura 3.13.



Figura 3.13. Megger.

### 3.4.3.3 Termómetro.

Existen diferentes formas y efectos para medir la temperatura. El termómetro infrarrojo es un aparato profesional con un rango de medición hasta +1600 °C para realizar mediciones de temperaturas superficiales sin contacto. El termómetro infrarrojo puede ser usado en condiciones adversas. La pantalla tiene una clara iluminación. Ver figura 3.14.

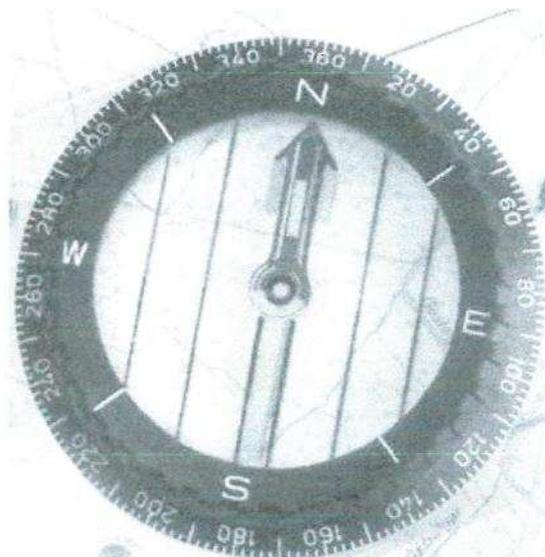


Figura 3.14. Termómetro Infrarrojo.

#### 3.4.3.4 Brújula.

La brújula se emplea principalmente para la determinación de la polaridad en los devanados. Como se sabe, la brújula es un imán en forma de aguja colocada sobre un pivote o soporte, de manera que pueda girar fácilmente

Uno de los polos de este imán se dirige hacia el norte geográfico de la tierra y corresponde al polo norte de la brújula, el otro polo de la brújula se le denomina polo sur, debido a que se orienta al polo sur geográfico. Generalmente, en las brújulas, el lado norte de la aguja magnética se encuentra pintada de negro. Ver figura 3.15.

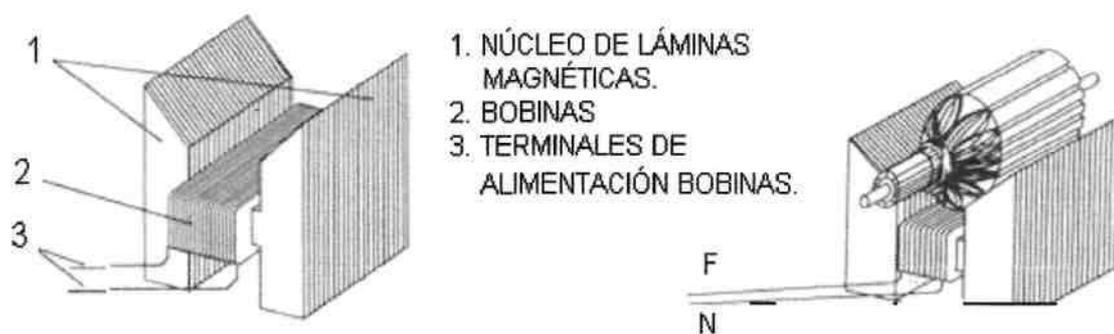


**Figura 3.15.** Brújula.

#### 3.4.3.5 Zumbador o Growler.

En los talleres electromecánicos de reparación de motores eléctricos, el Zumbador (Growler) es un dispositivo muy empleado para la detección de cortos circuitos, contactos a tierra, circuitos abiertos o interrupciones, etc.

En los motores eléctricos, el nombre de Zumbador (Growler en inglés) viene del zumbido característico que emite cuando opera. El fundamento de este dispositivo es el mismo que el de un transformador, es decir, la bobina del zumbador es el primario, por lo que se alimenta de la red (contacto o toma de corriente), y en el rotor o inducido montado sobre el zumbador, se induce un voltaje alterno que con la ayuda de una hoja de sierra y si se produce vibración en ella, podremos determinar la existencia de falla en los bobinados, como se muestra en la figura 3.21 y se explica en el numeral 3.5.1.2 de la página 56.



**Figura 3.16.** Zumbador o Growler.

El Zumbador es esencialmente un electroimán con núcleo de laminaciones magnéticas en forma de H. Las terminales de la bobina del electroimán se conectan a 127 V, a través de una clavija a una toma de comente según se ve en la figura 3.16. Por medio del Growler o Zumbador se pueden detectar:

- Fallas en el devanado de las máquinas
- Cortocircuito en las delgas del conmutador
- Corto circuito entre bobinas
- Contactos a tierra

#### **3.4.3.6 Tacómetro.**

Un tacómetro es un dispositivo que mide la velocidad de un objeto en movimiento. Estos dispositivos se usan para medir la velocidad de los motores eléctricos y detectar ciertas características de operación que pueden ser anormales. Los tacómetros pueden ser básicamente de tres tipos:

- Tacómetro de contacto,
- Foto-tacómetro,
- Tacómetro estroboscópico.

A continuación mostramos los 3 tipos de tacómetros más usados en la industria:



**Figura 3.17.** Tipos de tacómetros.

### 3.5 DETECCIÓN DE AVERÍAS EN LOS MOTORES ELÉCTRICOS.

Las detecciones de anomalías más frecuentes en las máquinas de corriente alterna son las relacionadas con:

1. Localización de contactos a masa
2. Localización de cortocircuitos
3. Localización de conductores cortados
4. Determinación de la polaridad correcta

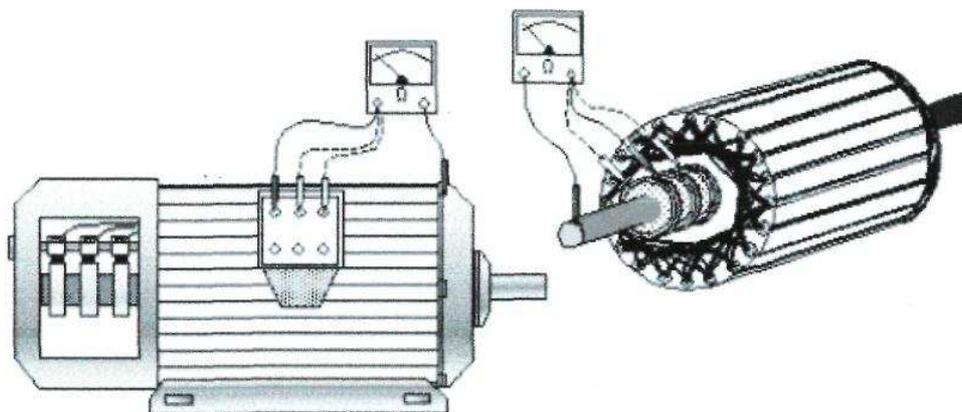
Seguidamente pasaremos a analizar la localización de estos cuatro tipos de averías, referidas a motores asíncronos trifásicos de corriente alterna, ya sean con rotor de jaula de ardilla o bobinado, por ser los más utilizados industrialmente. Todo ello se analizará de forma sencilla y sin el empleo de aparatos o sistemas sofisticados, de tal forma que cualquier profesional pueda realizarlo en su taller, bien sea con herramientas tradicionales de electricista o deducidas directamente con el solo empleo del sentido común.

#### 3.5.1 LOCALIZACIÓN DE CONTACTOS A MASA O FALLA A TIERRA.

Este tipo de anomalía puede presentarse tanto en estatores como en rotores bobinados, de cualquier máquina de corriente alterna, y la mejor forma de no llegar a esta situación que puede ser peligrosa desde sus comienzos, en cuanto a electrocución se refiere, y degenerar con el tiempo en un cortocircuito y la consiguiente destrucción de los devanados, es la de medir periódicamente el

aislamiento a masa de sus devanados, que debe ser según la Norma IEEE 43-2000: referente a medición de resistencia de aislación e índice de polarización (máquinas rotativas nuevas y usadas) como mínimo de 5 Mega ohmios, esto para valores de tensión nominal menores a 1KV y tiempo de prueba de 1 minuto. Lo ideal es una resistencia de aislamiento infinita.

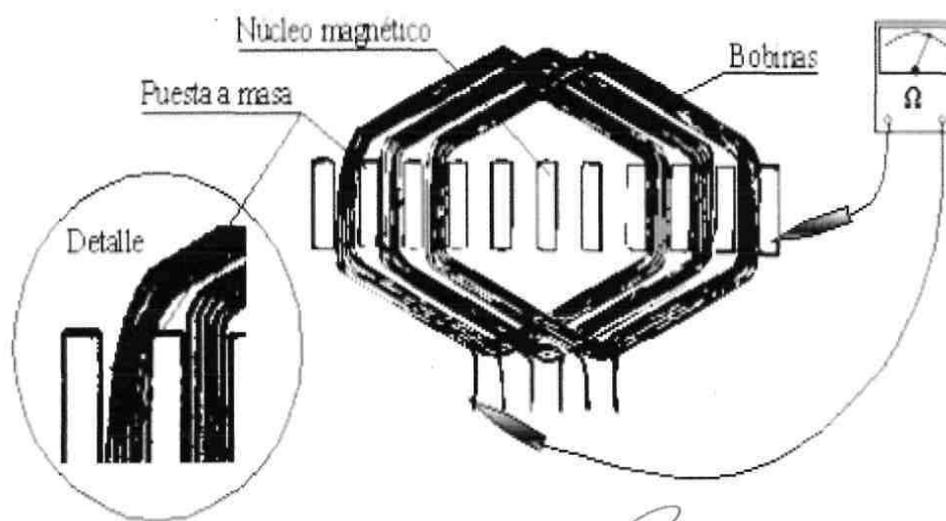
Para verificar la existencia de contactos a masa en el estator de los motores, procederemos como se aprecia en la figura 3.18, retirando primeramente los puentes de la placa de bornes, para medir a continuación el aislamiento entre cada una de las fases y la carcasa del motor, bien sea con el medidor de aislamiento de un polímetro o con un medidor de aislamiento apropiado como el Megger. La fase que acuse continuidad es la que tiene el defecto, luego como mas adelante veremos hay que localizar la bobina o bobinas puestas a masa, para su posterior aislamiento o sustitución.



**Figura 3.18.** Localización de la fase puesta a masa o con falla a tierra, en estator y rotor

Como ya se mencionó, cuando el **rotor** es de anillos rozantes este puede presentar en él la misma anomalía que en el estator, y la verificación puede realizarse tanto desmontado este como sin desmontarlo, siempre que aislemos correctamente sus escobillas de los anillos rotóricos. La comprobación se realiza de igual forma que en el estator, midiendo la continuidad entre el eje y cada uno de los tres anillos del rotor. En principio solamente detectamos si una fase esta puesta a masa; por el contrario si queremos saber que fase es la dañada, debemos desconectar las tres

fases del punto de la estrella del devanado y verificar las fases una a una.



**Figura 3.19.** Localización de la bobina o grupo de bobinas puesta a masa.

Una vez localizada la fase averiada, para determinar que bobina o bobinas están puestas a masa, hay que desconectar todos los puentes de conexión entre grupos de bobinas, de dicha fase, e ir comprobando la continuidad entre cada una de las bobinas y masa (figura 3.19). Una vez localizada la bobina averiada, se puede extraer y aislar convenientemente o bien sustituirla por otra nueva, siempre que el tamaño del motor y los tipos de bobinas lo hagan posible o bien sustituir el grupo al que pertenece la bobina averiada, e incluso toda la fase averiada o el devanado completo, como suele hacerse en los motores de pequeña potencia.

### 3.5.2 LOCALIZACIÓN DE CORTOCIRCUITOS.

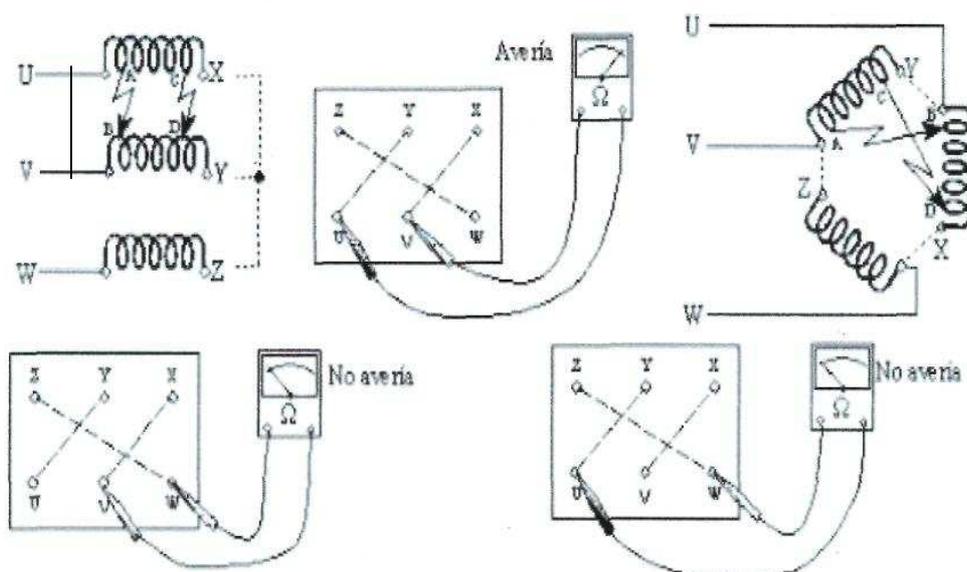
Los cortocircuitos en los devanados de corriente alterna, se suelen producir siempre que: los aislamientos fallen, debido a quemazón por sobrecargas frecuentes, o bien debido al empleo de materiales de aislamiento e impregnación de baja calidad, que fallan debido a las vibraciones del propio motor y a la degradación de los mismos. Los cortocircuitos producidos en los devanados los podemos clasificar en dos formas:

- Cortocircuitos entre dos fases distintas
- Cortocircuitos entre espiras de una misma fase

Los primeros suelen ser muy radicales, siempre que sean directos entre fases, estos son detectados por las protecciones del motor y este se queda instantáneamente fuera de servicio. En otros casos, ya sean del primer o segundo tipo, su grado de peligrosidad puede variar, dependiendo de las espiras que queden cortocircuitadas, lo que puede originar desde ningún síntoma apreciable cuando son pocas espiras de una misma fase, a una intensidad absorbida exagerada cuando las espiras eliminadas son muchas, o bien un calentamiento excesivo y la quema posterior del propio motor en los casos extremos.

#### **3.5.2.1 Cortocircuito entre fases.**

En estos casos, si el cortocircuito es franco como se lo observa entre las fases U y V de la figura 3.20, lo normal es que los fusibles o relés de protección contra cortocircuitos salten, el motor se desconecta y la avería no pase a tener mayores consecuencias. Pero otras veces, cuando el cortocircuito es entre bobinas de distinta fase y este no es franco, debido a la impedancia de las muchas espiras intercaladas, como es el caso C-D de la figura 3.20, el motor puede llegar a arrancar, calentarse exageradamente, e incluso llegar a quemarse sin que sus protecciones lo desconecten. Por tanto cuando un motor no sobrecargado se calienta exageradamente y sus protecciones no saltan, hay que suponer un cortocircuito incipiente entre fases, con una gran impedancia, debido a las muchas espiras que quedan intercaladas (ejemplo C-D). En estos casos para detectarlo hay que desmontar el motor, y si una observación visual no es suficiente para detectarlo hay que proceder a retirar los puentes de la placa de bornes y verificar el aislamiento entre las fases, por medio de un polímetro o un medidor de aislamiento, tal como se aprecia en la figura 3.20. Como es natural las fases cortocircuitadas acusarán continuidad entre ellas, siendo esta mayor o menor dependiendo del tipo e impedancia del cortocircuito.



**Figura 3.20.** Localización de cortocircuitos entre fases.

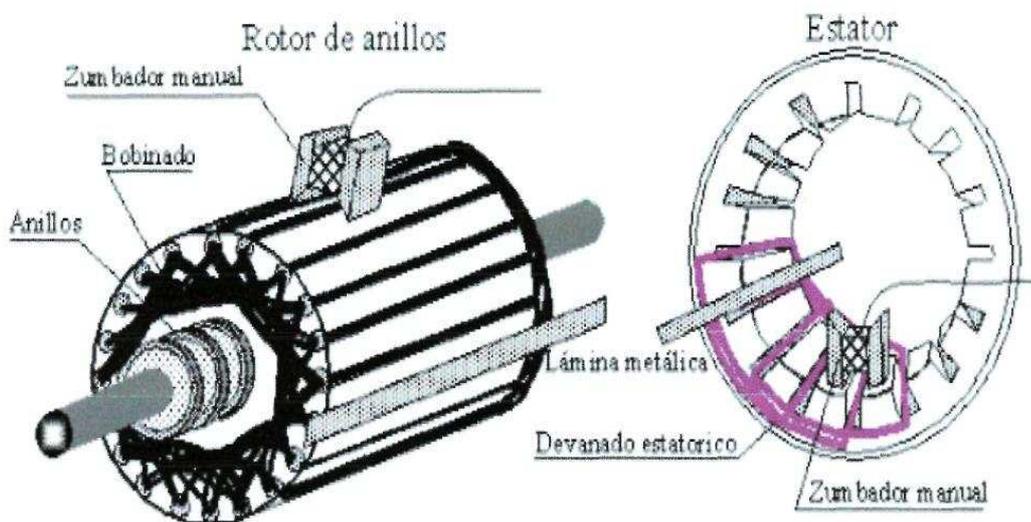
### 3.5.2.2 Cortocircuito entre espiras de una misma fase.

En estos casos, si el cortocircuito es en el devanado del **estator** puede darse el caso de que el motor no pueda llegar a arrancar, por el contrario si al aparecer el cortocircuito el motor está en marcha puede seguir girando, aunque empezará a roncar y aumentará su calentamiento. En este caso también aumentará la corriente de la fase defectuosa, defecto que puede ser suficiente para que un relé de sobrecarga, del tipo diferencial pueda llegar a desconectar el motor.

Si las espiras cortocircuitadas pertenecen al **rotor** de un motor de anillos, el motor, si está parado, puede llegar a arrancar, pero lo hará con brusquedad y haciendo mucho ruido, a la vez que la corriente absorbida de la red oscilará durante el arranque.

En estos casos, tanto si el defecto es en el rotor como en el estator, y si visualmente no logramos detectar la bobina con espiras en cortocircuito, la mejor forma de localizarla es como se hacía en los devanados de corriente continua, o sea empleando un zumbador, manual o de sobremesa, y una lámina metálica u hoja de sierra, tal como se aprecia en la figura 3.21. A l ir recorriendo el devanado con el

zumbador, la lámina metálica vibrará cuando esta esté situada sobre la bobina defectuosa.



**Figura 3.21.** Localización de espiras en cortocircuitos del estator y rotor.

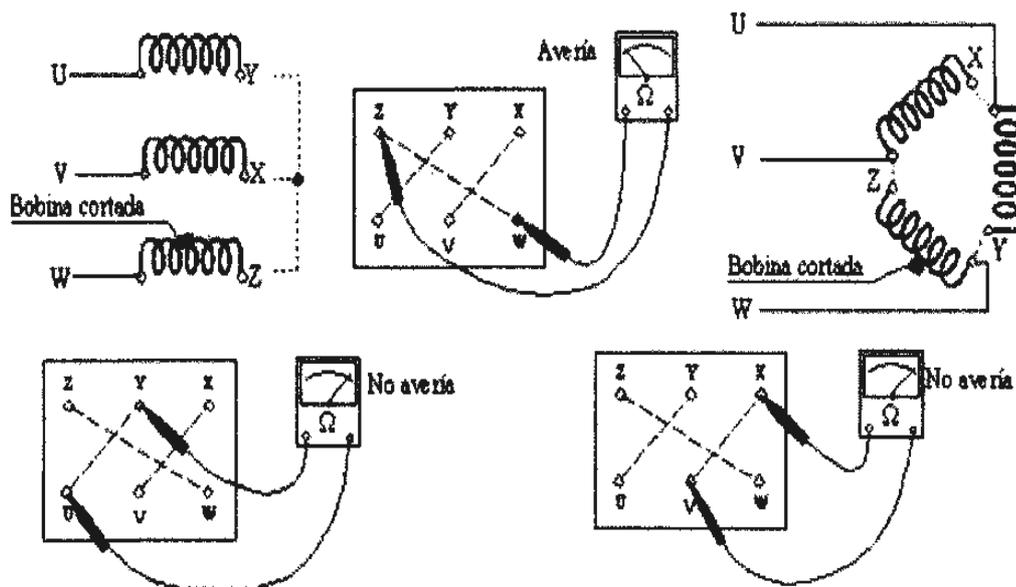
Para la mejor detección de la bobina con espiras en cortocircuito hay que mantener una distancia entre el entrehierro del zumbador y la lámina metálica igual al ancho de bobina del devanado.

Si antes de desmontar el motor, sospechamos que el defecto está en el rotor, podemos detectar la fase con la bobina defectuosa sin desmontar este, para ello se levantan las escobillas y, ya con el devanado del rotor abierto, se le aplica tensión al estator (si es posible inferior a la nominal) y se miden las tensiones entre los tres anillos del rotor. Si las tres tensiones son iguales nos indica que no hay espiras en cortocircuito en el rotor, en caso contrario, si una de ellas es nula o inferior a las otras, nos indica que en esa fase existen espiras en cortocircuito. Por medio del zumbador también podríamos detectar si en un rotor de jaula de ardilla hay alguna barra desoldada o cortada. Para ello procedemos como anteriormente se explicó, para un rotor devanado, observando que la lámina vibra en cada barra del inducido, excepto en la que esta interrumpida. Este defecto se manifiesta normalmente por

medio de: ruidos anormales, arranques dificultosos, e incluso pueden aparecer chispas entre las barras del rotor y sus discos de cortocircuito.

### 3.5.3 LOCALIZACIÓN DE CONDUCTORES CORTADOS.

Estas anomalías, tanto si el devanado es de rotor como si es de estator, se manifiestan con arranques dificultosos, el motor no logra alcanzar su velocidad nominal, ronca y se achica con la carga, o incluso no logra arrancar; todo ello debido a su alimentación en bifásico, como se aprecia en los esquemas de la figura 3.22. Si el devanado está ejecutado con circuitos en paralelo y es uno solo de esos circuitos el interrumpido, el motor presenta los mismos síntomas que si la fase completa estuviera cortada.



**Figura 3.22.** Localización de conductores cortados.

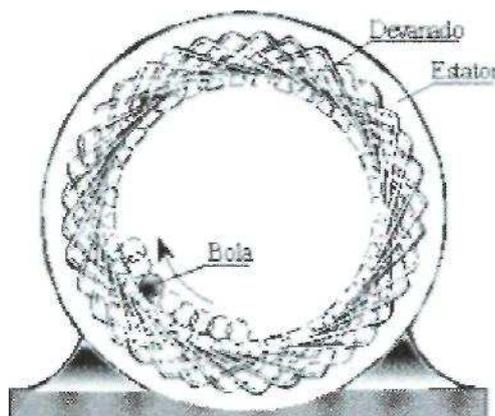
Primeramente debemos observar los conductores que van a la placa de bornes, ya que con frecuencia, y bien sea debido a las vibraciones, al envejecimiento del aislamiento o de las soldaduras de los terminales, se sueltan o cortan en la propia placa de bornes.

Luego para localizar las interrupciones en el devanado del **estator**, debemos comprobar la continuidad de cada fase por separado. Para ello retiramos los puentes de la placa de bornes, ya estén en estrella o en triángulo y con un medidor de continuidad (polímetro o medidor de aislamiento) verificamos una a una las fases del motor, tal como se aprecia en la figura 3.22

Para localizar las interrupciones en un **rotor** de anillos rozantes, empezaremos por aislar los anillos rotóricos, bien sea levantando las escobillas o colocando un aislante entre aros y escobillas. Seguidamente procedemos a medir la continuidad entre cada dos anillos o entre cada anillo y el punto de la estrella del devanado, si este es accesible, como si de un devanado de estator se tratara. Otra forma de localizar la fase cortada del rotor, una vez aislados los anillos rotóricos, consiste en alimentar el estator (si es posible a tensión reducida) y medir la tensión existente entre cada dos anillos, si una fase esta cortada no nos dará tensión alguna con ninguna las otras dos. Esto es debido a que en estas condiciones el rotor se comporta como el secundario de un transformador, en el que se inducen tensiones debido al flujo estáticos.

#### **3.5.4 DETERMINACIÓN DE LA POLARIDAD CORRECTA.**

Si alguna de las conexiones entre grupos de bobinas no se conecta correctamente, o bien se han equivocado algunas entradas (U, V, W) con salidas (X, Y, Z), el campo magnético no será completamente giratorio, y en consecuencia la máquina no podrá arrancar o lo hará con mucha dificultad.



**Figura 3.23.** Determinación de la polaridad correcta en un estator.

La localización de las bobinas o grupos de bobinas conectados incorrectamente, podría hacerse por medio de la brújula, para las máquinas de corriente continua, pero en la práctica, y sobre todo para motores que no sean de gran tamaño, existe un procedimiento mucho más fácil y rápido, aplicable a los estatores de las máquinas de corriente alterna, que es el reflejado en la figura anterior.

Este sistema de comprobación de la polaridad correcta, consiste en aplicarle tensión alterna al estator, desmontado, al que se le ha introducido previamente una bola de acero en su interior, un rodamiento o similar, tal como se aprecia en la figura 3.23. Si las conexiones están correctamente realizadas, la bola rodará por el interior del estator perfectamente, arrastrada por el campo magnético giratorio. Si existiera alguna conexión equivocada la bola permanecería en reposo u oscilaría, debido a la deformación del campo magnético.

Para realizar esta comprobación en los motores de mediana o gran potencia, es mejor hacerlo con una tensión inferior a la nominal de la máquina ya que a tensión nominal podríamos causar calentamiento excesivo y quemadura de los bobinados del estator por circulación de altas corrientes debido a la impedancia baja de las bobinas por no estar el rotor colocado, por ello, preferiblemente utilizar un Variador de voltaje alterno (Variac), ya que el campo magnético se forma perfectamente y es mucho más segura la prueba.<sup>4</sup>

<sup>4</sup> CHILUISA CARLOS. Curso de Taller Eléctrico. Escuela Politécnica Nacional-Esfot. Módulo V.

## **CAPITULO IV**

### **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SECADOR A AIRE FORZADO PORTÁTIL CON CONTROL DE TEMPERATURA AUTOMÁTICO.**

#### **4.1 JUSTIFICACIÓN.**

Se vio la necesidad de diseñar un secador de aire forzado portátil con control de temperatura automático, para uso del personal de mantenimiento eléctrico de la Empresa Lafarge Cementos., puesto que por la gran influencia e importancia que tienen los motores eléctricos dentro del sistema de producción de cemento, es imprescindible que no se produzcan paradas inesperadas de equipos , debido a fallas en el aislamiento de los motores , ya que no sólo afectan la producción sino que también ocasionan daños potenciales a equipos, riesgos al personal, mayores tiempos de reparación, entre otros.

Por lo anteriormente expuesto, se diseñó y construyó un secador a aire forzado portátil con control de temperatura automático, permitiendo así contar en el taller eléctrico de la Planta con una herramienta que permite realizar un secado efectivo del solvente utilizado para lavar el bobinado del estator de los motores eléctricos en mantenimiento, además permite calentar suficientemente el bobinado del estator de los motores que lo requieran, para proceder a barnizar y secar el mismo, realizando un mantenimiento preventivo de alta calidad en el mismo lugar de montaje de los motores eléctricos, permitiendo así, alargar la vida útil y optimizar las condiciones de operación de los mismos.

Corregir pérdidas de aislamiento producidos por humedad, vibración, contaminación, degradación por envejecimiento, así como, evitar sobrecalentamientos, cortocircuitos internos, vibración de espiras, es el objetivo principal de un secado y de un barnizado de alta calidad realizado a los bobinados de un motor eléctrico,

el mismo que lo podremos realizar utilizando el secador de aire forzado portátil con control de temperatura automático,

## **4.2 DISEÑO.**

Se fundamenta en los tres principios importantes de un diseño: eficiencia, economía, y seguridad.

El equipo está diseñado de tal forma que este puede transportarse y utilizarse en cualquier punto de la Planta, ya que sus dimensiones y peso lo hacen portátil y fácilmente transportable. Además se lo ha diseñado para que el voltaje de operación sea de 127Voltios, fácilmente encontrables a lo largo de toda la Planta Industrial.

El equipo cuenta con materiales y elementos fácilmente encontrados en el mercado, los mismos que han sido utilizados basados en pruebas prácticas y en la parte teórica expuesta en los capítulos anteriores, para la generación de las siguientes etapas del diseño:

- Generación del calor (Calentamiento del aire)
- Transmisión del calor
- Control del proceso.

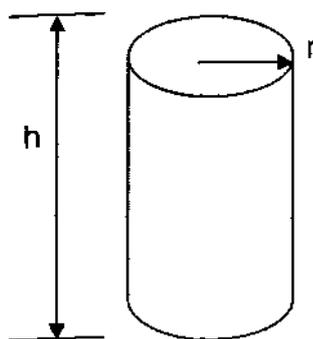
### **4.2.1 GENERACIÓN DEL CALOR.**

La generación del calor comprende el calentar el aire dentro de la cámara de calentamiento del secador. Esta cámara está diseñada de tal manera que su armazón es un cilindro hilado, cubierto de doble capa laminada rellena de material hermético que permita una buena mantención del calor interno generado y que evite en la máximo posible que el calor se transfiera hacia la capa exterior del cilindro.

La generación del calor se la realiza de forma artificial, es decir, se utiliza energía y una resistencia eléctrica para calentar del aire dentro de la cámara de calentamiento.

Con el fin de obtener un incremento rápido de temperatura respecto al tiempo dentro de la cámara de calentamiento, utilizamos una resistencia niquelada de 1000W de potencia, aplicada a una Red de 127Voltios, ya que experimentalmente determinamos que nos permite obtener alrededor de 1°C de incremento de temperatura por segundo; esta a su vez está enrollada sobre una base aislante espiralada de arcilla secada al horno y colocada a lo largo de el centro del cilindro.

Las dimensiones del cilindro de la cámara de calentamiento, están diseñadas de acuerdo a las dimensiones del ventilador usado y al largo de la base aislante de la resistencia eléctrica, por lo que tenemos una altura  $h = 44$  cm., y un radio  $r = 7$  cm., con lo que el área  $A$  del cilindro está definida son  $2 \pi \cdot r \cdot h$ , esto es  $194 \text{ cm}^2$ . Además se cuenta con un Véntury que es un cilindro truncado que nos permite dar dirección y uniformidad al flujo de salida de aire.



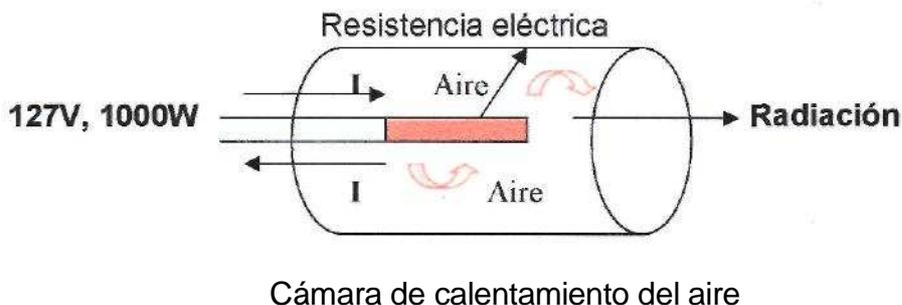
**Figura 4.1.** Cámara de calentamiento.

#### **4.2.2 TRANSMISIÓN DEL CALOR.**

Dentro del diseño se contemplan 2 etapas de transmisión de calor que intervienen en el sistema de operación del secador a aire forzado, la primera es la transmisión de calor resistencia eléctrica/aire, esto dentro de la cámara de calentamiento y la segunda etapa es la del secador al estator (bobinados del motor); a continuación detallamos estas etapas.

#### 4.2.2.1 Transmisión del calor Resistencia eléctrica -aire.

En esta etapa, realizamos la transferencia del calor generado por la resistencia eléctrica al hacer circular una corriente eléctrica a través de ella por **Radiación** hacia el resto del aire almacenado dentro de la cámara, lo cual se muestra en la figura 4.2.



**Figura 4.2.** Transmisión del calor Resistencia eléctrica-aire.

De esta forma, pasamos de una temperatura inicial de 20°C a una temperatura final del aire en reposo de hasta 250°C a razón de un grado centígrado por segundo, obteniendo un incremento de temperatura de 230°C id eales para nuestra aplicación práctica.

#### 4.2.2.2 Transmisión del calor secador-bobinados.

Esta se subdivide en 2 etapas:

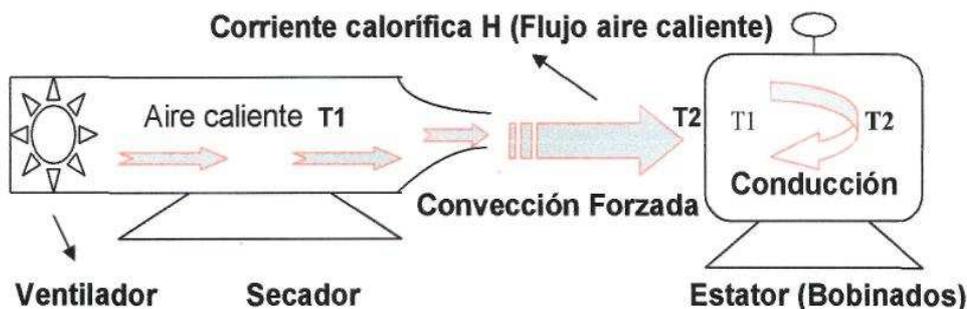
1. Aquella donde se realiza la transmisión del calor del aire almacenado en la cámara de calentamiento hacia el ambiente exterior por **convección forzada**, ya que al utilizar un ventilador, estamos usando un medio mecánico para favorecer el mezclado de las moléculas de aire y llevarlas de una temperatura inicial 1 a una temperatura final 2 a través de una corriente calorífica H, que será la que necesitemos para nuestra aplicación práctica como se observa en la figura 4.3.

Entonces:  $H = h \cdot A \cdot \Delta T$

Donde:  $h$  (Constante de transferencia por convección)

$\Delta T$  ( $T_2 - T_1$ : temperatura inicial - temperatura final)

$A$  (Área del ambiente a calentar)



**Figura 4.3.** Transmisión de calor secador-bobinados.

- La segunda etapa es la transmisión de calor por **conducción** que se origina en el estator, como se observa en la figura 4.3, la misma que se propaga con una rapidez calorífica  $Q$  en un intervalo de tiempo dado  $\Delta t$ , depende del área  $A$ , a través de la cual está ocurriendo la transferencia de calor y de la conductividad térmica en nuestro caso del hierro, además es proporcional a la diferencia de temperaturas  $T_2 - T_1$  e inversamente proporcional a su espesor  $L$ .

Por tanto la expresión queda resumida en:

$$Q = KA \left[ \frac{(T_2 - T_1)}{L} \right], \text{ siendo en nuestro proceso:}$$

$A$ , el área del estator del motor eléctrico

$k$ , la conductividad térmica del hierro = 1,7 J/s.m.°K ( de tablas, ver anexo 5)

T1, la temperatura del aire que llega al estator debido a la corriente calorífica H.

T2, la temperatura ambiente del estator

L, longitud del estator

#### 4.2.2.2.1. Cálculos.

Para la realización de los cálculos tomaremos como referencia un estator de un motor eléctrico de 60 HP, por ser de 0 a 60HP los motores más comunes y más abundantes en Lafarge Cementos y en la Industria, una temperatura máxima de trabajo de 120°C y los siguientes datos:

Na: potencia de la resistencia eléctrica: 1000W

Estator diámetro: 0,26m; altura: 0,5 m; asumiendo forma cilíndrica calculamos:

Área:  $A = 2\pi r \cdot h = 0.4084.07 \text{ m}^2$ ; Volumen:  $V = d^2 \cdot \pi h / 4 = 26533 \text{ cm}^3$

Ce: calor específico del hierro a 20°C: 0,11 cal/g. °C.

K: la conductividad térmica del hierro: 1,7 J/s.m. K

Densidad del hierro:  $d = 7,8 \text{ g/cm}^3$

A Temperatura = 120°C- 20°C = 100°C = 373.15K

Masa específica del aire:  $\rho_u = 1,2 \text{ Kg/m}^3$

Entalpia específica del aire:  $C_a = 1005 \text{ J/Kg. } ^\circ\text{C}$

Con estos parámetros determinaremos lo siguiente:

- a) Selección del ventilador.

- b) Tiempo necesario para calentar el estator de un motor eléctrico de 60HP a 120°C
- c) Consumo de energía eléctrica del sistema.

a) Selección del ventilador:

La potencia transferida al aire por un sistema de calentamiento,  $N_a$ , expresada en watts, se determina por el incremento de temperatura,  $\Delta T$  en °C, del flujo de aire,  $Q$ , en m<sup>3</sup>/s, de la masa específica del aire,  $\rho_u$ , en kg.m<sup>3</sup>, y de la entalpía específica del aire,  $C_a$ , en J/kg. °C por medio de la ecuación:  **$N_a = Q \cdot \rho_u \cdot C_a \cdot \Delta T$** .



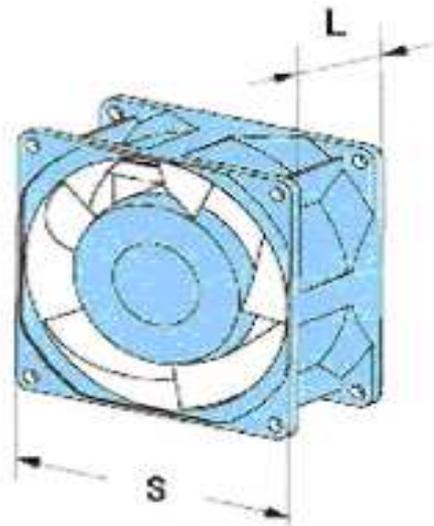
**Figura 4.4.** Flujo de aire en el sistema de calentamiento

Como la masa específica y la entalpía específica del aire se pueden considerar constantes e iguales a 1,2 Kg. /m<sup>3</sup> y 1005 J/Kg. °C, respectivamente, y la potencia que vamos a suministrar al aire por medio de la resistencia eléctrica es de 1000W; se puede determinar el flujo de aire  $Q$  requerido para pasar de una temperatura ambiente a una temperatura final de 120°C en este sistema de calentamiento por lo que despejando de la ecuación anterior tenemos:

$$Q = \frac{Na}{pu.Ca(\Delta T)}; Q = \frac{1000}{(1.2)(1005)(120 - 20)} = 0.0083m^3 / s = 0.5m^3 / min.$$

El flujo de aire necesario que me permite obtener la temperatura final deseada es de  $0.5m^3/min.$ , por lo que valiéndonos de tablas de fabricantes de ventiladores (ver anexo 5) utilizamos un ventilador que encontramos en el mercado y que más se acerca a las características técnicas:

L = 30mm. S = 119mm. Rpm = 1900; 115V.



**Figura 4.5.** Ventilador

b) Tiempo necesario para calentar el estator de un motor eléctrico de 60 HP.

Primero: calculamos la rapidez con que se transfiere el calor por conducción en el estator:

$$Q = kA \left( \frac{T_2 - T_1}{L} \right) = 1,7 \frac{J}{s.m.^{\circ}K} (0,408407)m^2 \frac{373.15^{\circ}K}{0.5m} = 518,15 J/s;$$

Siendo  $1 \text{ cal} = 4.186 \text{ J}$ , entonces  $Q = 123.78 \text{ cal/s}$ .

Segundo: calculamos la masa de hierro del estator de la siguiente manera:

$$m = d.V = 7.8 \text{ g/cm}^3 \cdot 26533 \text{ cm}^3; \text{ donde } m = 206957.4 \text{ g}$$

Tercero: determinamos la cantidad de calor necesaria  $Q$  para llevar esta masa a la temperatura final de  $120^{\circ}\text{C}$ :

$$Q = m.Ce.\Delta T = (20695.4 \text{ g}) (0.1 \text{ kcal/g.}^{\circ}\text{C}) (100^{\circ}\text{C}), \text{ entonces:}$$

$$Q = 2276531.4 \text{ cal.}$$

Cuarto: relacionamos la rapidez con que se transfieren las calorías en el estator por segundo con el total de calorías necesarias de calor para elevar la temperatura de la masa del estator:

$$\frac{123.78 \text{ cal}}{2276531.4 \text{ cal}} \text{ -----} \blacktriangleright \frac{1 \text{ s}}{t=?}$$

Donde  $t = 18391.75 \text{ s.}$ ; como 1 hora tiene 3600 segundos, entonces el tiempo que necesitamos para llevar a un estator de un motor de 60 HP a  $120^{\circ}\text{C}$  es aproximadamente de 5.1 horas.

De esta forma, podemos determinar una tabla con el tiempo aproximado de calentamiento conociendo las dimensiones del estator y la temperatura a la que queremos trabajar.

c) Consumo de energía eléctrica del sistema.

La energía consumida por el sistema  $E_c$ , se calcula multiplicando la potencia de la resistencia eléctrica  $N_a$  en KW por el número de horas de operación del sistema, en nuestra caso tenemos:

$$E_c = N_a x h = 1Kw x 5.1h = 5.1KW.h$$

Este será el valor de energía consumida por el sistema si la resistencia eléctrica estaría trabajando consecutivamente todo el tiempo de calentamiento, por lo que con la finalidad de tener un ahorro de energía se diseñó y construyó una cubierta que permita cubrir al secador y al estator totalmente para poder recircular el aire caliente emitido por el secador y de esta forma tener un tiempo menor de conexión de la resistencia eléctrica. Esto se detalla en el siguiente tema.

#### 4.2.3 CONTROL DEL PROCESO.

El control es la función fundamental de la ingeniería y la administración cuyo propósito principal es medir, evaluar y ajustar la operación de un proceso, una máquina o un sistema en condiciones dinámicas, de tal modo que logre objetivos deseados dentro de especificaciones planeadas y de acuerdo con factores de costo y seguridad.

El control del proceso del secador a aire forzado se lo realiza a través de la parametrización del controlador de temperatura CERT C21; el cual nos permite obtener un control de tipo automático o control por retroalimentación ya que no se requiere la intervención de operadores para el funcionamiento del secador.

Entonces, el proceso estará contemplado de una forma simplificada de la siguiente manera y se lo detalla más detenidamente mas adelante:

- Un instrumento de control monitorea continuamente ciertas variables de salida del proceso controlado.
- Este comparará esta salida con ciertos valores deseados preestablecidos.
- Cualquier error resultante que se obtenga en esta comparación se usa para calcular la corrección requerida para ajustar el control del equipo controlado.
- En consecuencia, el valor de la variable de salida se ajustará a su nivel deseado y se mantendrá en él.

#### **4.2.3.1 CONTROL DE LA TEMPERATURA.**

El control de la temperatura está diseñado para que a través de varios elementos y de un circuito eléctrico conectado dentro de una caja de control, poder controlar automáticamente que la temperatura del aire emitida por el secador, que necesitamos sea transferida a los bobinados del motor eléctrico.

Por ello, el control de la temperatura del proceso del secador a aire forzado contempla un Lazo de control cerrado o con retroalimentación con modo de control **ON/OFF**, en el que intervienen los siguientes elementos:

- Elemento sensor de temperatura: Termocupla Tipo J, 0-300°C
- Instrumento controlador: Controlador de temperatura CERT 21
- Elemento final a controlar: Resistencia eléctrica.

Para la explicación del proceso empezaremos definiendo los términos de variable de Proceso , Setpoint y error.

##### **Variable de Proceso.**

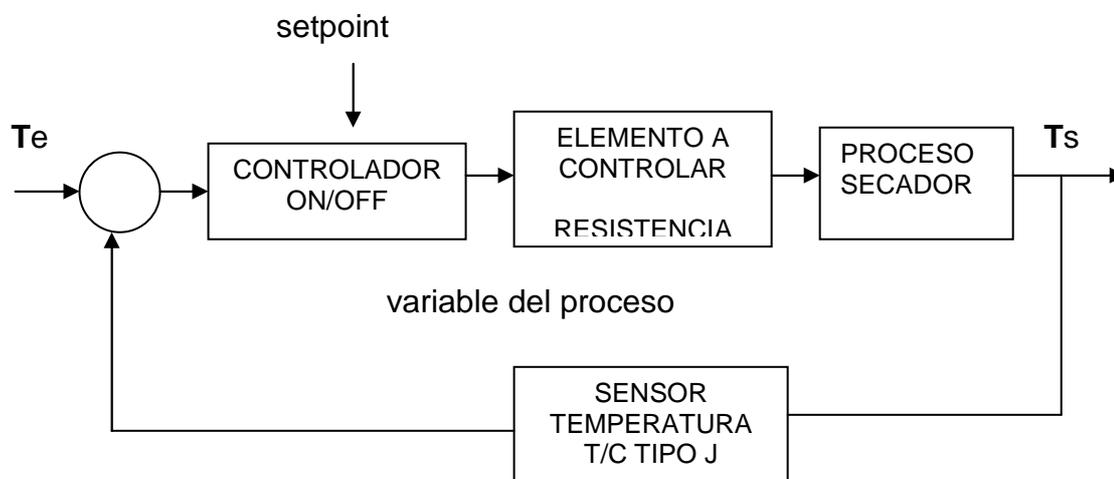
Se le llama a la variable medida que se desea estabilizar, en el caso del secador la temperatura que mide el controlador mediante la termocupla.

##### **Set Point.**

El set point o valor prefijado es el valor deseado de la variable del proceso, es decir, es el valor al cual el control se debe de encargar de mantener la variable del proceso.

##### **Error.**

Se define error como la diferencia entre la variable del proceso y el setpoint.



**Figura 4.6.** Diagrama de bloques del lazo del control de temperatura del secador

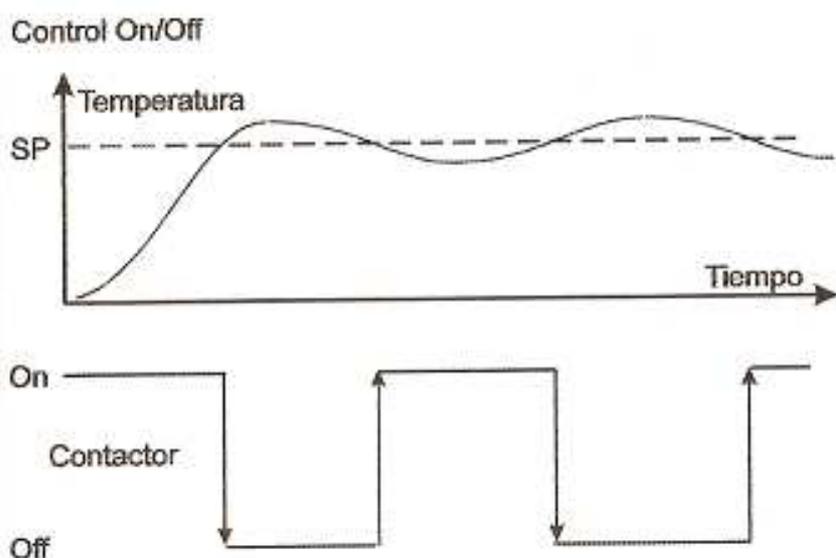
La figura 4.6, muestra el diagrama de bloques del lazo del control del proceso que permitirá que el calentamiento del aire se produzca para ser aplicado a los estatores de los motores eléctricos.

Se introduce en el controlador la temperatura del aire deseada (setpoint) a la que queremos transcurra el proceso y es el controlador quien manipula a la resistencia eléctrica para que el aire interno del sistema alcance el setpoint requerido de la siguiente manera:

La termocupla tipo J emite una señal de milivoltios de la variable del proceso, la cual se transmite hacia el controlador de temperatura CERT 21 en donde se convierte, amplifica, compara y registra esta señal en grados centígrados en el display del controlador.

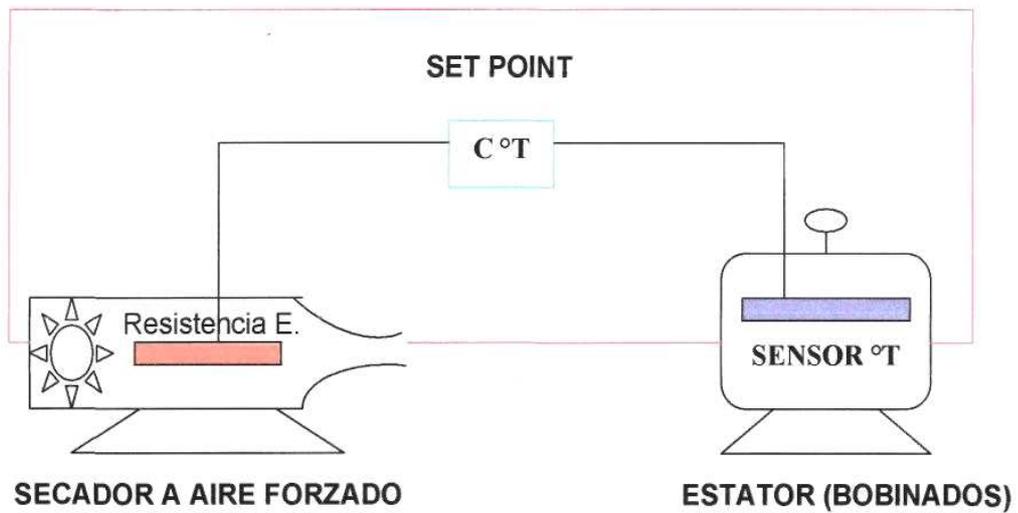
La temperatura aumentará al activar la resistencia calentadora mediante un contactor de estado sólido gobernado a su vez por un contacto normalmente abierto de un relé interno del controlador.

Esto sucederá cuando el controlador compare los valores medidos y el deseado de la variable a controlar (temperatura), para luego evaluar la diferencia entre ambos (error). Si no hubiera error, es decir, la variable a controlar está en el setpoint, el controlador no realiza acciones de control, pero si detecta un error el controlador actuará para minimizar la perturbación mediante la aplicación del modo de control on/off que será quien manipule de forma correcta al elemento final de control (resistencia).



**Figura 4.7.** Modo de control ON/OFF

El modo de control on/off consiste en activar el mando de calentamiento cuando la temperatura está por debajo de la temperatura deseada (setpoint), y luego desactivarlo cuando la temperatura esté por arriba, así como se observa en la figura 4.7.



Línea de control \_\_\_\_\_ Línea de aire caliente \_\_\_\_\_

**Figura 4.8.** Esquema del Lazo de control de Temperatura del secador a aire forzado.

En la figura 4.8 se muestra el esquema del control de temperatura del secador a aire forzado. Manipulando manualmente el controlador de temperatura con modo de control on/off, el operador podrá variar los setpoint de temperaturas deseadas, es decir, controlaremos la temperatura a la que queremos que transcurra el proceso de secado y de calentamiento de los bobinados para el barnizado.

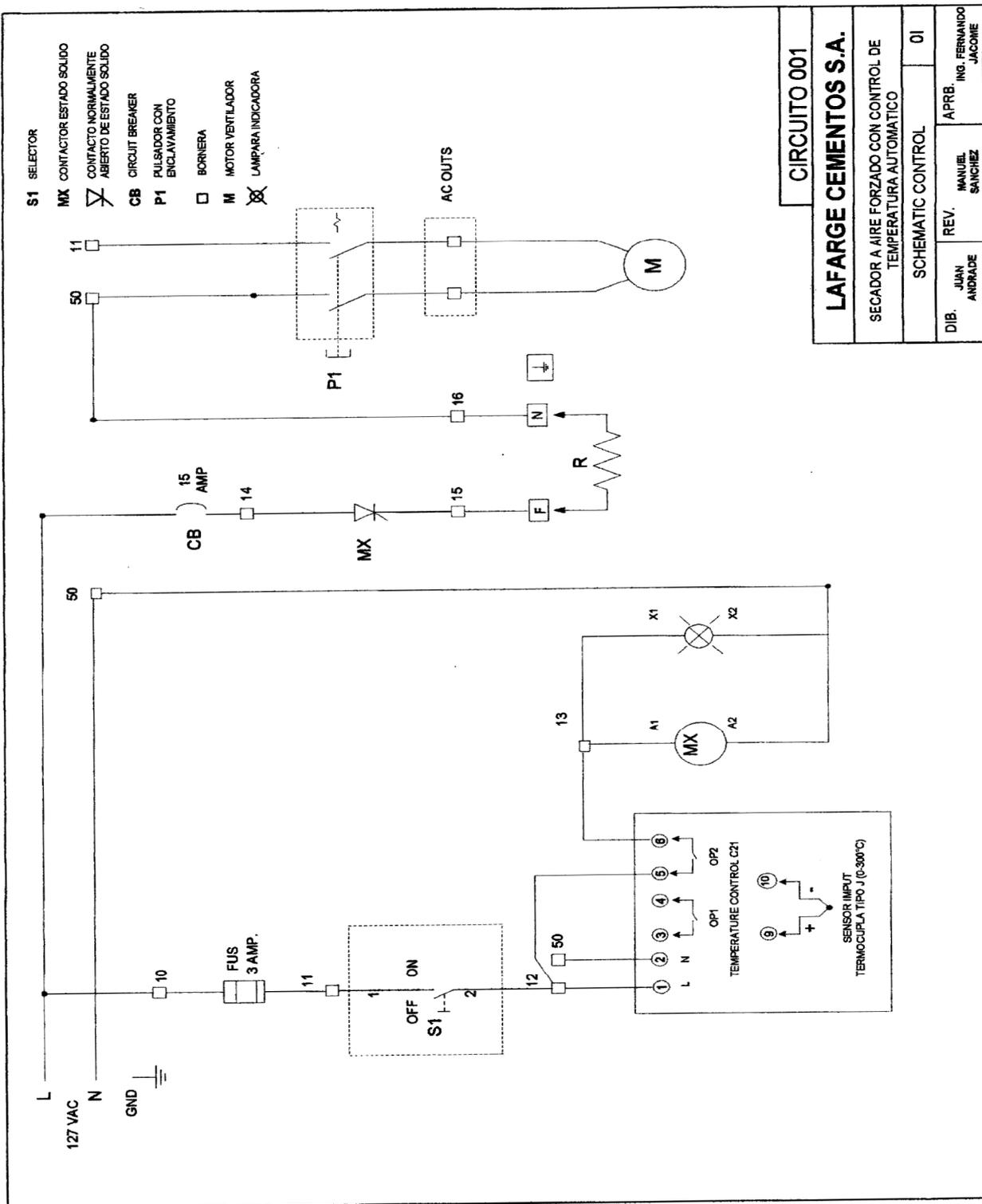


Figura 4.9. Circuito eléctrico del sistema.

Con el fin de optimizar y economizar el consumo de energía, el proceso se realiza con un circuito de aire recirculante, cubriendo totalmente al secador y al estator, lo que permitirá aprovechar todo el aire caliente generado y transmitido en el interior para reducir el número de conexiones de la resistencia eléctrica.

Para ello, según las dimensiones del secador y del estator de 60HP como referencia, se diseñó y construyó una base de aluminio desarmable de forma rectangular de las siguientes dimensiones: ancho: 700mm; largo: 1600mm y espesor: 700mm, que sostiene a una cubierta de panaflex para cumplir con el objetivo de almacenar el aire caliente en un área interna con el suficiente espacio para realizar una recirculación.

Los materiales de este sistema son livianos, además no ocupan mayor espacio físico por lo pueden ser transportados a cualquier lugar.

A continuación se muestran las ilustraciones:



Mesa de aluminio desarmable

Cubierta de panaflex

**Figura. 4.10.** Sistema para la recirculación del aire.

### 4.3. MATERIALES Y ESQUEMA DEL EQUIPO.

#### 4.3.1. MATERIALES

1. Cilindro hilado de alambre galvanizado #10 AWG
2. 2 Platinas de tol de 14 cm. de ancho, 44 cm. de largo y 1mm. de espesor.
3. Fibra de vidrio.
4. 1 Véntury.
5. 1 Ventilador 1900 rpm, 127V., 0,8 mA., 119mm. de diámetro.
6. Resistencia eléctrica Niquelada espiralada de 1000W. 127V.
7. Base aislante espiralada de arcilla.
8. Varilla de acero inoxidable de 42cm. de largo y 6mm. de ancho.
9. Caja para control eléctrico de 200 x 200 (mm)
10. Controlador de temperatura CERT C21
11. Contactor de estado sólido SIRIUS, 127V, de contacto normalmente abierto.
12. Termocupla tipo J, C105B 0-300°C.
13. Selector de 2 posiciones.
14. Bloque de contactos normalmente abierto.
15. Lámpara indicadora 127V.
16. Pulsador con enclavamiento de doble contacto 127V, 10Amp.
17. Mica aislante.
18. Cable flexible sucre # 16, #12 AWG y de admianto # 12 AWG.
19. Enchufe 127V. 15 A.
20. Terminales para cables eléctricos.
21. Porta fusible.
22. Fusible 3 A.
23. Breaker 15 A., 1Polo, 220/360 Voltios
24. Borneras 600V. 30 A.
25. Base metálica.
26. Base de aluminio desarmable de 700mm(a) x 1600mm (l) x 700(e).
27. Cubierta de panaflex.

### 4.3.2 ESQUEMA.



**Figura 4.11.** Secador, Base, caja de conexiones y control.



**Figura 4.12.** Secador a aire forzado con control de temperatura automático y estator.

#### **4.4. APLICACIONES DEL SECADOR A AIRE FORZADO PORTÁTIL CON CONTROL DE TEMPERATURA AUTOMÁTICO.**

El secador a aire forzado portátil con control de temperatura automático posee las siguientes aplicaciones prácticas principales, que las puede realizar en el mismo lugar de montaje de los motores, como en el taller de mantenimiento:

- **Secado de humedad.**

Con el uso del secador a aire forzado con control de temperatura automático, se logra secar el bobinado de los estatores de los motores eléctricos después de que estos han sido lavados con solventes eléctrico para quitar de su superficie partículas de polvo, aceite, grasa, etc., además, seca la humedad de rotores bobinados, transformadores, tarjetas electrónicas, bobinas que han sido embodegados, que han estado fuera de servicio por largo tiempo o que han sido afectados por algún líquido.

Todo esto, a través de un flujo de aire caliente con temperatura controlada de 100 a 120°C recomendados para esta aplicación. De esta forma, evitamos que los motores eléctricos y demás equipos, entren en operación con partículas de humedad, lo que puede ser perjudicial para su funcionamiento normal.

- **Calentado del estator para el barnizado.**

Con el uso del secador a aire forzado con control de temperatura automático, calentamos los estatores y bobinados a temperaturas entre 70 y 120°C, de modo que, cuando se aplique el barniz, éste penetre rápidamente en sus capas más recónditas.

De acuerdo a lo calculado en el numeral 4.2.2.2.1, pág.64, se ha elaborado una tabla con el tiempo aproximado de calentamiento, tomando como referencia las dimensiones de los estatores de 5, 15, 30 y 60 HP, con setpoint de temperaturas de trabajo de 70, 100 y 120°C.

**Tabla 4.1. TEMPERATURAS Y TIEMPOS DE CALENTADO.**

Potencia del Motor (HP)	70°C HORAS	100°C HORAS	120°C HORAS
HASTA 15	1	1.5	2
DE 15 A 30	2	2.5	3
DE 30 A 60	3	4.5	5.5

Estos son los tiempos y temperaturas de calentado recomendados con la aplicación del secador, los mismos que pueden variar según las especificaciones del barniz a aplicar.

#### - **Barnizado.**

Todos los devanados, deben impregnarse con un barniz aislante de buena calidad antes de ponerlos en servicio, o se debe reforzar el barnizado cuando el bobinado lo requiera, ya que este barniz tiene varios fines importantes. Cuando se aplica correctamente, penetra hasta las capas interiores de las bobinas y actúa como un aislamiento adicional de los conductores, aumentando así la rigidez dieléctrica del aislamiento entre ellos. Esta penetración del barniz en el interior de las bobinas, y en el encintado exterior, reduce considerablemente la probabilidad de que se produzcan cortos circuitos entre los conductores y masas con las ranuras o la armazón de la máquina.

#### **Impregnación.**

Antes de la impregnación las bobinas se calentarán a una temperatura de 70 a 120°C, se mantendrá esta temperatura durante el tiempo necesario para que la evaporación de la humedad sea lo mas completa posible, como se indica en la tabla 4.1. Este tiempo dependerá de la masa a calentar, del gradiente térmico interno de donde se realiza el proceso y variará en función de la humedad relativa ambiente.

La impregnación no debe efectuarse a temperaturas elevadas, para evitar una evaporación masiva de solventes, que traerían como resultado un aumento considerable en la viscosidad de algunos barnices, por consiguiente un poder de penetración menor, por lo tanto es aconsejable dejar enfriar la masa a impregnar hasta que la misma haya alcanzado una temperatura de 50 a 60°C, esto

dependerá de las características técnicas del barniz a aplicar, ya que existen también barnices que pueden impregnarse a temperaturas entre 100 y 180°C.

### **Método de impregnación.**

Se puede realizar la aplicación del barniz de las siguientes formas: por inmersión, por pulverización y por brocha. Este trabajo aplica la impregnación por brocha, ya que el secador a aire forzado con control de temperatura automático puede ser usado en cualquier punto de la Planta Industrial ya que es fácilmente transportable, pudiendo así realizar barnizados en el mismo sitio de montaje de los motores eléctricos, por ello es más práctico la impregnación del barniz por este método, ya que los otros 2 son más aplicables en lugares fijos como los talleres y necesitan de equipos especiales los cuales no se cuenta en el taller de mantenimiento eléctrico de la Planta Industrial.

Existen factores que deben tomarse en cuenta a la hora del barnizado del bobinado, a continuación se detalla cada uno de estos:

#### **a) La viscosidad del barniz:**

Un barniz muy viscoso tiene bajo poder de penetración y seca mal en profundidad

#### **b) Tiempo de impregnación:**

Se procurará por todos los medios evitar que quede aire ocluido en los espacios internos de las bobinas

#### **c) Escurrido del barniz:**

Una vez impregnadas las bobinas debe eliminarse el exceso de barniz, hay que evitar la formación de grumos que secan imperfectamente.

Cuando un devanado se ha saturado muy bien de barniz aislante, y éste se ha secado y endurecido en forma apropiada, aumenta mucho la resistencia mecánica de las bobinas, y mantiene rígidamente los conductores en su sitio, lo que impide vibraciones que podrían contribuir a desgastar y estropear el aislamiento; sobre todo en el caso de los devanados de corriente alterna en los cuales el flujo alterno tiende a hacer vibrar los conductores cuando está funcionando la máquina.

Así mismo, impide que penetre la humedad en las bobinas y reduzca la calidad del aislamiento, e impide que se acumule entre las bobinas el polvo, la suciedad y el aceite, lo que prolonga a vida del motor.

- **Secado del barnizado.**

Con el uso del secador a aire forzado con control de temperatura automático, realizamos un secado de alta calidad del barniz aplicado al bobinado, ya que al utilizar un ventilador, produce una corriente de aire forzado asegurando una buena ventilación, además, el secador aprovecha el aire caliente haciéndolo recircular para obtener un secado efectivo con ahorro de energía, como se observa en la figura 4.14 de la pág. 81, y siempre manteniendo un control estable de la temperatura durante toda la operación del secado.

A continuación se indica la tabla de temperaturas y tiempos de secado, donde muestra temperaturas y el tiempo aproximado en horas para secar barnices aislantes, datos obtenidos de acuerdo a pruebas prácticas y a especificaciones técnicas de los diferentes tipos de barnices dadas por los fabricantes. Se observará que cuando se secan inducidos o bobinados de estatores, se necesita más tiempo para los de mayor tamaño, así mismo, de que el secado más lento produce un aislamiento más elástico y de mejor calidad. En los casos de emergencia, cuando el tiempo es un factor muy importante, pueden secarse los devanados a temperaturas más altas en muchas menos horas, pero el barniz será algo más quebradizo, y más dispuesto a agrietarse cuando se le someta a algún esfuerzo.

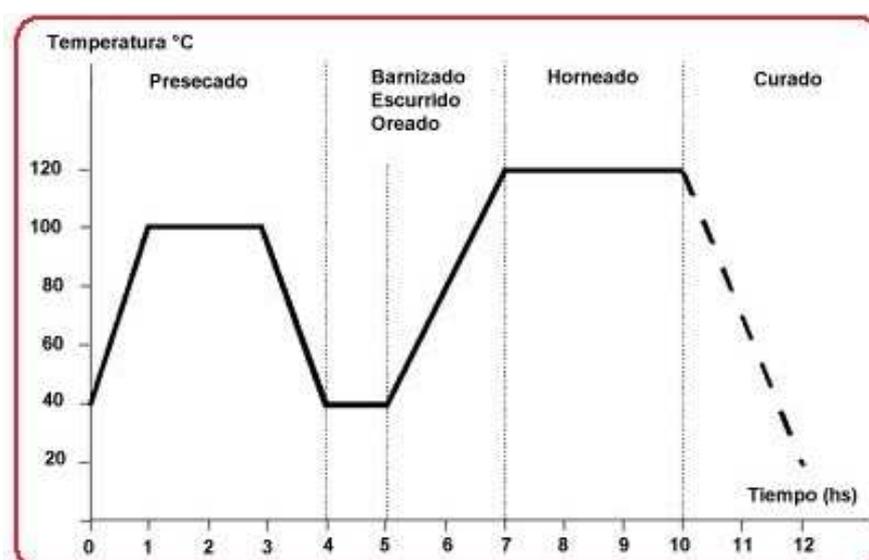
Cuando no es necesario apresurar mucho el trabajo, es preferible efectuar el secado a las temperaturas más bajas, y durante los períodos de tiempo más largos indicados en la tabla, de esta manera, se obtendrá un aislamiento mucho más duradero y más seguro.

**Tabla 4.2. TEMPERATURAS Y TIEMPOS DE SECADO.**

Tamaño del estator Diámetro del núcleo	120°C. Secado rápido Horas	107°C. Secado elástico Horas	100°C. Secado extra elástico Horas
Menos de 15 cm.	4 a 6	6 a 8	8a10
De 15 a 30 cm.	12	24	36
De 30 a 45 cm.	24	36	48
De 45 a 60 cm.	36	48	60

Estos son los tiempos y temperaturas de secado recomendados con la aplicación del secador, los mismos que pueden variar según las especificaciones del barniz a aplicar.

En general, para un proceso de reforzamiento del barnizado, se iniciará con un pre-secado a una temperatura inicial de aproximadamente 40°C por 30 minutos, para luego elevar la misma hasta alcanzar la temperatura de curado indicada por el fabricante del barniz o indicada en la tabla. Los incrementos de temperaturas deben ser de 30 a 50°C por hora.

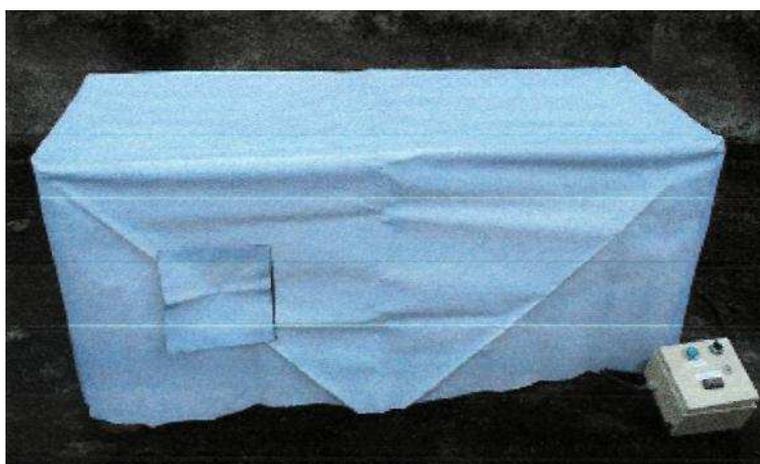
**Figura 4.13.** Curva del secado del barnizado

La Figura 4.11 muestra las relaciones de temperatura respecto al tiempo de las diferentes etapas del secado, las cuales se recomienda realizarlas cuando el bobinado es nuevo, es decir, el estator es rebobinado y será el primer barnizado. Los tiempos de escurrido y oreado se deben ajustar en función del volumen del estator que ha sido barnizado y puede ir desde 15 minutos a 3 horas.

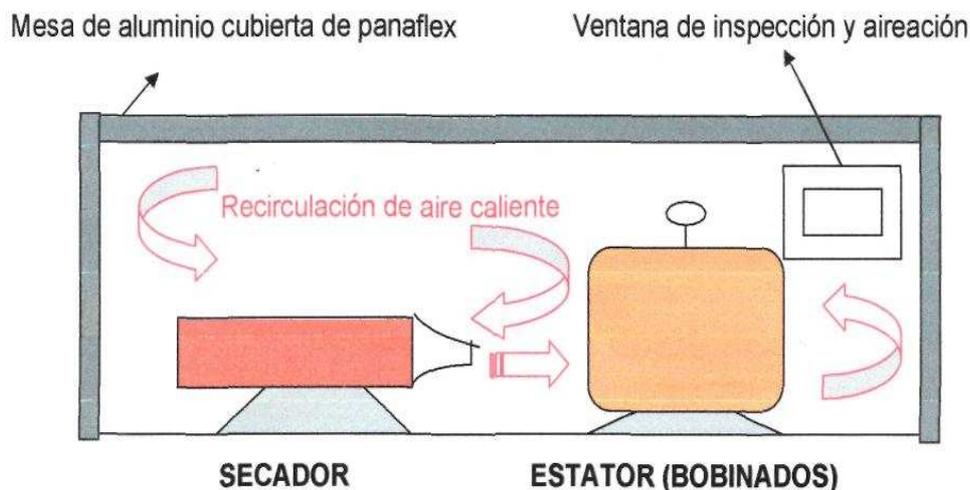
#### 4.4.1. FORMA DE UTILIZACIÓN.

Una vez determinada la necesidad de la realización de un mantenimiento del bobinado del motor eléctrico ya sea por observación, mediciones de aislamiento, mantenimiento programado, se utilizará el secador a aire forzado portátil con control de temperatura automático para este fin. Esta aplicación no dependerá de aspectos, tales como, tamaño del estator del motor ni del lugar en donde se realizará el proceso, ya que se puede realizar en el mismo lugar de montaje del motor o en el taller de mantenimiento.

A continuación se detalla la manera de utilización del secador.



**Figura 4.14.** Proceso en operación de secado y calentado del estator.



**Figura 4.15.** Proceso interno de secado y calentado del estator.

La figura 4.14, muestra el proceso en operación, mientras que la figura 4.15 muestra el proceso interno que produce. Se procede a colocar el secador a aire forzado con control de temperatura automático frente al estator que queremos calentar o secar; luego procedemos a cubrir totalmente con la base cubierta de panaflex (se puede utilizar también para este fin una cubierta de lona o carpa para estatores de motores mayores a 60 HP) al secador y al estator, produciendo de esta manera la recirculación del aire caliente interno generado por el secador.

Procedemos luego a fijar el set de temperatura que requerimos se mantenga constante según las tablas expuestas anteriormente o especificaciones técnicas del barniz a aplicar y esperaremos el tiempo necesario para que el proceso de calentamiento haya terminado. La cubierta de panaflex de la base posee una ventana de inspección y ventilación por donde podemos observar que el proceso se realice con normalidad y además podemos controlar el incremento de temperatura en el estator a través de un termómetro infrarrojo.

Una vez terminado el proceso de calentamiento, procedemos aplicar el barniz en las bobinas del estator y dependiendo las características de barniz que se ha utilizado se deberá repetir nuevamente el proceso para el secado, caso contrario se deberá secar el barnizado a temperatura ambiente. Este proceso se lo puede realizar tanto para estatores de motores grandes como para estatores pequeños y en cualquier lugar donde se requiera.

#### 4.4.2. PRUEBAS

Para las mediciones de aislamiento, antes y después de la realización del mantenimiento a los motores aplicando el secador a aire forzado portátil con control de temperatura automático, se tomó como referencia la norma IEEE actualizada para diagnóstico de máquinas rotativas IEEE 43-2000 referente a la resistencia de aislación e IP (máquinas nuevas y usadas), que propone los valores de tensiones de ensayo y los valores de resistencia de aislamiento mínima durante 1 minuto de prueba, datos que observamos en la siguientes tablas:

**Tabla 4.3. TENSIÓN CONTINUA DE ENSAYO SUGERIDA**

Tensión nominal del motor (V)	Tensión continua de ensayo de resistencia de aislación (V)
<1000	500
1000-2500	500-1000
2501-5000	1000-2500
5001-12000	2500-5000
>12000	5000-10000

**Tabla 4.4 VALORES MÍNIMOS RECOMENDADOS PARA LA RESISTENCIA DE AISLACIÓN A 40°C.**

Resistencia de aislación mínima	Máquina bajo ensayo
$R1 \text{ min} = kV+1 \text{ M}\Omega$ KV: Tensión de línea Nominal de la Máquina.	La mayoría de bobinados fabricados antes de 1970, bobinados de campo y otros no descriptos más abajo.
$R1 \text{ min} = 100 \text{ M}\Omega$	Para bobinados fabricados posteriormente a 1970
$R1 \text{ min} = 5 \text{ M}\Omega$	Para bobinados con tensión nominal inferior a 1 kV

## PRUEBA 1

Realización de mantenimiento preventivo del motor eléctrico del tornillo transportador de harina cruda de código 321.0B con el siguiente dato de placa:

<b>Potencia (HP): 5</b>	<b>Fases: 3~</b>
<b>Voltaje (V): 460</b>	<b>Factor de potencia (cos<math>\phi</math>):0,86</b>
<b>Corriente (A): 7.1</b>	<b>Frecuencia (Hz): 60</b>
<b>Velocidad (rpm): 1775</b>	<b>Frame: 213T</b>
<b>Clase de aislamiento: B</b>	<b>Factor de servicio: 1.15</b>

Trabajo a realizar:

- Mediciones de aislamiento inicial y final (antes y después del mantenimiento) utilizando el Megger
- Inspección-barnizado del estator utilizando el secador a aire forzado portátil con control de temperatura automático, tablas y especificaciones técnicas del barniz a aplicar.
- Inspección-cambio de rodamientos, ensamblaje del motor.
- Conclusiones y recomendaciones.
- Llenado de la hoja de datos del mantenimiento de motores eléctricos de la Empresa.

**a)**

Tensión Nominal Motor (V)	Tensión de ensayo (V)	Resistencia de Aislamiento (M $\Omega$ ) Inicial	Resistencia de Aislamiento (M $\Omega$ ) Final	Resistencia de Aislamiento mínima (M $\Omega$ )
460	500	26	Mayor a 50	CUMPLE

**b)**

- Desmontaje de partes componentes del motor.
- Inspección visual del estado del estator, el mismo que se encuentra con

asentaciones de polvo y grasa sobre el bobinado, además con un barnizado quebradizo.

3. Limpieza de suciedad y grasa interna, lavado del estator con solvente para motores eléctricos (ver anexo 5), y presurizado del estator con aire seco a una presión de 60 Psi.

4. Verificación de las características del barniz a aplicar:

Marca. Dolphs ER41; Secado a temperatura ambiente por 8 horas; Temperatura de aplicación: no indica.

5. Uso del secador a aire forzado portátil con control de temperatura automático para el secado de la humedad residual del lavado y calentado del estator para la aplicación del barniz según tabla 4.1:

Clase de aislamiento B	POTENCIA MOTOR (HP)	100°C/ Horas
°T máx. 130°C	5	1.5

6. Aplicación del barniz y secado como se indica a continuación:

°T Estator °C	Aplicación del barniz	°T. Secado	Tiempo de Secado (Horas)
100	Por brocha	Ambiente	8

**c)**

1. Cambio de rodamientos del rotor: 6208 Polea/6206 Ventilador

2. Limpieza de tapas, rotor y ensamblado del motor.

**d)**

- Se pudo realizar una buena aplicación de barniz, ya que el estator estuvo a una temperatura óptima para el proceso y permitió que el barniz ingrese con facilidad a través de las bobinas y ranuras del estator.

- Se reforzó el barnizado del bobinado ya que este estaba quebradizo.
- Después del proceso, aumentó la medición del aislamiento entre el bobinado y la carcasa del motor como se indica en la tabla del numeral a) de la prueba 1.
- Se recomienda no sobrepasar los valores máximos de temperatura que permite la clase del aislamiento del motor tanto para el secado y el calentado del estator.
- Se realizó un mantenimiento preventivo de alta calidad del motor eléctrico, lo que asegura su normal funcionamiento y alargamiento de su vida útil.
- Verificar las características técnicas de los barnices a aplicar, si no tienen mayor información tomar como referencias las tablas para calentado y secado expuestas anteriormente.
- Con el uso del secador a aire forzado portátil con control de temperatura automático se obtuvieron temperaturas óptimas para la realización de los procesos y confirmaron los valores expuestos en las tablas.

e) Ver anexo 4.

## PRUEBA 2

Determinar conclusiones, diferencias de la realización de un barnizado de los estatores de los 2 motores que a continuación se indican, el uno sin el uso y el otro con uso del secador a aire forzado portátil con control de temperatura automático.

### MOTOR 1

<b>Potencia (HP): 15</b>	<b>Fases: 3~</b>
<b>Voltaje (V): 230/460</b>	<b>Factor de potencia (<math>\cos\phi</math>): 0.9</b>
<b>Corriente (A): 54/57</b>	<b>Frecuencia (Hz): 60</b>
<b>Velocidad (rpm): 1750</b>	<b>Frame: 256T</b>
<b>Clase de aislamiento: F</b>	<b>Factor de servicio: 1.0</b>

## MOTOR 2

<b>Potencia (HP): 20</b>	<b>Fases: 3~</b>
<b>Voltaje (V): 460</b>	<b>Factor de potencia (<math>\cos\phi</math>): 0.86</b>
<b>Corriente (A): 20</b>	<b>Frecuencia (Hz): 60</b>
<b>Velocidad (rpm): 1755</b>	<b>Frame: 254T</b>
<b>Clase de aislamiento: F</b>	<b>Factor de servicio: 1.0</b>

Características del barniz a aplicar en ambos casos:

Marca: 44F Aismalibar; Secado al aire: 5 Horas; secado a 120°C: 1 hora

- **MOTOR 1. Barnizado sin uso del secador a aire forzado portátil con control de temperatura automático.**

1. Limpieza de suciedad interna, lavado del estator con solvente para motores eléctricos (ver anexo 5), y presurizado del estator con aire seco a una presión de 60 Psi.
2. Aplicación del barniz y secado indicado en la siguiente tabla:

°T Estator °C	Aplicación del barniz	°T. Secado	Tiempo de Secado (Horas)
Ambiente	Por brocha	Ambiente	5

3. Conclusiones.

- No se secó totalmente el solvente utilizado para el lavado del estator.
- El barniz aplicado se combinó con restos de solvente químico sobrante sobre las bobinas del estator, esto provoca que las características dieléctricas del barniz se reduzcan, así como, su resistencia mecánica y química.
- Al no haber temperatura en el estator la viscosidad del barniz es

alta, lo que impidió que tenga un alto poder de penetración.

- La aplicación del barniz no fue uniforme, y se originó la formación de grumos.
- No se garantiza un reforzado del barnizado de buena calidad, ya que se produjo un secado imperfecto debido a la formación de grumos y burbujas de aire sobre los bobinados.
- El tiempo de secado al ambiente se lo puede recortar con aplicación de temperatura.

### 1. MOTOR 2. Barnizado con el uso del secador a aire forzado portátil con control de temperatura automático.

1. Limpieza de suciedad interna, lavado del estator con solvente para motores eléctricos (ver anexo 5), y presurizado del estator con aire seco a una presión de 60 Psi.
2. Uso del secador a aire forzado portátil con control de temperatura automático para el secado de la humedad residual del lavado y calentado del estator para la aplicación del barniz como se indica en la siguiente tabla:

Clase de aislamiento F	POTENCIA MOTOR (HP)	100°C/ Horas
°T máx. 155°C	20	2.5

3. Aplicación del barniz y secado como se indica a continuación:

°T Estator °C	Aplicación del barniz	°T. Secado °C	Tiempo de Secado (Horas)
100	Por brocha	40	0.5
		120	1

Nota: Se comenzó el proceso con un pre-secado a una temperatura de 40°C por 30 minutos, luego se aplicó la temperatura de 120°C por 1 hora de acuerdo a

las especificaciones técnicas dadas por el fabricante del barniz para el curado total.

#### 4. Conclusiones:

- Se obtuvieron óptimas condiciones del estator para el secado y calentado gracias al control de la temperatura del aire caliente emitido por el secador.
- Se eliminó en la totalidad el resto de solvente utilizado para el lavado.
- Se tuvo una alta penetración del barniz ya que al tener temperatura en los bobinados la viscosidad disminuye y permite que fluya más fácilmente hasta los sitios más profundos.
- La aplicación del barniz fue uniforme y no se formaron grumos sobre los bobinados.
- Se reforzó el barnizado de los bobinados, ya que este secó y endureció perfectamente gracias a la temperatura escalonada y controlada entregada por el secador a aire forzado portátil con control de temperatura automático, rigiéndonos a las especificaciones técnicas del barniz.
- Se apresuró el proceso de secado, ya que el tiempo de secado aplicando calor, fue mucho menor al secado al ambiente, además la calidad del secado fue mejor.

## CAPITULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 CONCLUSIONES

- Basados en principios teóricos y prácticos se diseñó, construyó y se comprobó el funcionamiento del secador a aire forzado portátil con control de temperatura automático.
- Con el uso del secador a aire forzado portátil con control de temperatura automático garantizamos una vida larga y confiable de los motores eléctricos de la Empresa Lafarge Cementos.
- A través del uso y de la parametrización de un controlador de temperatura se implemento un control de temperatura automático para el aire transferido a los bobinados, obteniendo temperaturas óptimas requeridas para el secado y calentado de los bobinados de los motores eléctricos en mantenimiento.
- Con la aplicación del equipo se realizó barnizados de bobinados de alta calidad, se reforzó el aislamiento obteniendo un estator sólido y rígido disminuyendo las posibilidades de producirse daños internos por vibración y falla de aislamiento.
- El taller de mantenimiento eléctrico ya cuenta con un equipo de secado y calentado, fácil de transportar y que puede ser usado en cualquier punto de la planta Industrial.

## 5.2 RECOMENDACIONES

- Es importante que no deba intentarse nunca secar devanados a temperaturas mucho más altas que las que se dan en las tablas, pues es probable que se estropee el aislamiento existente entre las bobinas.
- El tiempo de calentamiento dependerá de las dimensiones del estator del motor eléctrico, así como también, de las especificaciones técnicas del barniz a utilizar.
- Lavamos y secamos los bobinados porque los motores con incrustaciones de polvo bajan su eficiencia, por eso se recomienda el uso de motores a prueba de ignición de polvo.
- Es recomendable que la persona que esta realizando el proceso de calentado haga un seguimiento del incremento de temperatura de los bobinados utilizando un termómetro infrarrojo, de esta manera determinará de una forma práctica si es necesario que el tiempo de calentado sea mayor o menor a lo recomendado.

- Es necesario que para el mantenimiento y realización del proceso a los motores eléctricos intervengan 2 personas, que deberá contar con un equipo de protección personal como guantes, gafas, mascarillas con filtros para polvo y gases, debido a que el proceso puede generar grandes cantidades de calor y provocar quemaduras; además algunos tipos de barnices pueden emanar gases tóxicos nocivos a la salud.
  
- Se espera que la investigación realizada detallada en los diferentes capítulos que sirvió de referencia fundamental para el desarrollo de este trabajo, sirva como ayuda didáctica para quienes tengan necesidad de esta información.

## GLOSARIO DE TÉRMINOS

<b>Aislamiento</b>	Sistema, dispositivo o material que impide la transmisión de la electricidad, el calor, el sonido, etc.
<b>ASTM</b>	American Society for Testing Materials (Sociedad Americana para ensayar materiales)
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.(Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, Sociedad de Estandarización)
<b>IP</b>	Índice de polarización, es una variante del ensayo de resistencia de aislación
<b>Cortocircuito</b>	Descarga que se produce accidentalmente o por contacto entre dos conductores sin aislamiento a diferente potencial.
<b>Polaridad</b>	Propiedad que tienen los agentes físicos de acumularse y de orientarse en dos direcciones contrapuestas
<b>Bobina</b>	Es un arrollamiento de un cable conductor alrededor de un cilindro sólido o hueco, cuya especial geometría le confiere importantes características magnéticas.
<b>Excentricidad</b>	Distancia entre el centro geométrico de una pieza y su centro de giro.
<b>Corriente Eléctrica</b>	Es el flujo ordenado de elementos portadores de carga eléctrica a través de un cuerpo conductor; su unidad de medida es el amperio.
<b>Corriente Alterna</b>	El flujo de corriente en un circuito es llamado alterno si varía periódicamente en dirección. Se le denota como corriente A.C. (Altern current) o C.A. (Corriente alterna).
<b>Corriente Continua</b>	El flujo de corriente en un circuito es llamado continuo si se produce siempre en una dirección.
<b>Inmersión</b>	Acción de introducir o introducirse algo en un fluido.

- Tierra** Comprende a toda la ligazón metálica directa, sin fusibles ni protección alguna, de sección suficiente entre determinados elementos o partes de una instalación y un electrodo o grupo de electrodos enterrados en el suelo, con el objeto de conseguir que en el conjunto de instalaciones no existan diferencias potenciales peligrosas y que al mismo tiempo permita el paso a tierra de las corrientes de falla o la de descargas de origen atmosférico.
- Ohmio** Se define como la unidad de medida de la resistencia eléctrica. Un ohmio equivale a la resistencia de un material por el cual circula un flujo de corriente de un amperio, cuando está sometido a una diferencia de potencial de un voltio.

## BIBLIOGRAFÍA

ZEARS, ZEMANSKY, YOUNG; Física Universitaria. Sexta Edición. Addison-Wesley Iberoamericana S.A. Estados Unidos, 1998.

CHILUISA CARLOS; Curso de Taller Eléctrico. Escuela Politécnica Nacional-Esfot. Módulo V. Quito-Ecuador.

BENÍTEZ, CORRALES, RODAS; Curso Básico de Instrumentación Industrial. Escuela Politécnica Nacional. Quito-Ecuador; 2002.

CEAC. Curso del Técnico Electricista. Impreso en España. Trama color S.A. Octubre 1974.

JÁCOME J., FERNANDO; Curso de Mantenimiento Industrial. Escuela Politécnica Nacional-Esfot. Quito-Ecuador.

ALONSO/ROJO; Física Mecánica y Termodinámica. México, 1979.

ÁLVAREZ T. MARCOS; Física N°3. Imprenta "Don Bosco" . Quito-Ecuador.

SACCHI JORGE; Características Térmicas en Régimen, Bobinado de Motores.

Biblioteca de Consulta Microsoft® Encarta® 2005. © 1993-2004 Microsoft

<http://www.ing.unlp.edu.ar/sispot/libros/cme/vol-08/2ape17/cm-a17.htm>

[http://usuarios.lycos.es/mugresoft/indice\\_tesina.htm](http://usuarios.lycos.es/mugresoft/indice_tesina.htm)

[http://www.termogram.com/pdf/nov14\\_03/Paper\\_IEEE\\_Concapan\\_XXI.PDF](http://www.termogram.com/pdf/nov14_03/Paper_IEEE_Concapan_XXI.PDF)

<http://www.fao.org/inpho/vlibrary.htm>