

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

MAESTRÍA EN CIENCIAS E INGENIERÍA



**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE UN
MOTOR DE INDUCCIÓN DE JAULA DE ARDILLA,
TRIFÁSICO, TIPO TEFC, OPERANDO EN CONDICIONES
DE TEMPERATURA AMBIENTE ELEVADAS**

T E S I S

que presenta para obtener el grado de MAESTRO EN INGENIERÍA

VICTOR MATA BRAUER

**DIRECTOR DE TESIS
M.I. CÉSAR AMARO HERNÁNDEZ**

**MEXICALI, B.C.
ÍNDICE**

OCTUBRE DE 2007
Página

2. Fundamentos de transferencia de calor	5
2.1 Fundamentos	5
2.2 Energía y calor	6
2.3 Formas de transferencia de calor	7
2.3.1 Conducción	7
2.3.2 Convección	10
2.3.3 Radiación	11
2.3.4 Mecanismos combinados	12
2.4 Medición de la temperatura	13
2.4.1 Dispositivos basados en expansión térmica	13
2.4.2 Dispositivos de medición con resistencia eléctrica	14
2.4.3 Dispositivos de medición por radiación	16
2.5 Termopares	17
2.5.1 Tipos de termopares	18
2.5.2 Unión de referencia de un termopar	19
3. Motores de inducción de jaula de ardilla	22
3.1 Generalidades	22
3.2 Construcción de un motor de jaula de ardilla	22
3.3 Principios de funcionamiento	26
3.4 Circuito equivalente	29
3.5 Diseño NEMA de un motor de inducción de jaula de ardilla	30
3.6 Pérdidas en los motores de inducción de jaula de ardilla	31
3.7 Causas de sobrecalentamiento	32
3.8 Temperatura límite de los materiales aislantes	34
4. Desarrollo experimental	36
4.1 Procedimiento experimental	36
4.2 Desarrollo del experimento	37
4.2.1 Medición de la temperatura con la cámara térmica	37
4.2.2 Medición de la temperatura con termopares	40
4.3 Mediciones obtenidas con la cámara térmica	44
4.4 Mediciones obtenidas con los termopares	45
5. Análisis de los resultados experimentales	51
5.1 Análisis del embobinado como un elemento concentrado	51
5.2 Relación entre las pendientes de las curvas térmicas	56
5.3 Pronóstico de la temperatura final en el devanado del motor utilizando las pendientes de las curvas térmicas	59
Conclusiones y trabajos futuros	67
Referencias	69
Índice de figuras	
<u>Figura</u>	Página
1.- Transferencia de calor a través de una pared	8
2.- Diagrama de la dirección de flujo de calor en un cuerpo	9
3.- Transferencia de calor por convección. Relación de la velocidad del aire y la temperatura	11
4.- Efecto Seebeck en dos metales distintos A y B, homogéneos	17
5.- Efecto Peltier	18
6.- a) Termopar tipo T de cobre-constantán conectado al medidor. b) FEM	20

generada por la unión de dos metales distintos.	
7.- Termopar con la unión de referencia a 0°C	20
8.- Estator de un motor de inducción	23
9.- Rotor de jaula de ardilla	24
10.- Motor de jaula de ardilla tipo TEFC	25
11.- Interacción de las líneas magnéticas del rotor y del estator	27
12.- Circuito equivalente por fase de un motor de inducción trifásico	29
13.- Proceso de experimentación y equipo utilizado	36
14.- Prueba experimental con la cámara térmica	38
15.- Primera prueba, motor acoplado a un electrodinamómetro	39
16.- Imagen térmica del motor impulsando a un generador de corriente directa que alimenta cargas resistivas	39
17.- Fotografía del motor con los termopares instalados	40
18.- Corte axial del motor mostrando los lugares donde se instalaron los termopares	41
19.- Disposición física del equipo de medición	42
20.- Motor operando a la intemperie con una temperatura ambiente de más de 40°C	43
21.- En la fotografía se muestra al equipo de computo registrando las temperaturas del motor	43
22.- Gráfica del comportamiento térmico del punto de mayor temperatura registrado por la cámara térmica	44
23.- Medición llevada a cabo en el laboratorio. La mayor temperatura fue registrada por los termopares T5 y T7, la menor por el termopar T1	47
24.- Prueba llevada a cabo con una temperatura ambiente de más de 40°C. Nótese que la transferencia de calor en el núcleo magnético (T6) no es uniforme	49
25.- Gráfica de la curva de mediciones del termopar T5 y la curva generada en matlab por la ecuación 5.3	56
26.- Gráfica del comportamiento lineal de las curvas térmicas del tramo de 0 a 10 minutos	57
27.- Mediciones del experimento No. 1	58
28.- Mediciones del experimento No. 2	58
29.- Gráfica de las mediciones llevadas a cabo el 28 de septiembre de 2006	60
30.- Comparación de las curvas medida y pronosticada del comportamiento del devanado del motor	61
31.- Gráfica de las mediciones llevadas a cabo el 31 de mayo de 2006 a la Intemperie	62
32.- Comparación de los valores medidos y pronosticados de la prueba realizada el 31 de mayo de 2006	63
33.- Gráfica de las temperaturas medidas en el devanado y la carcasa del motor el 1°. de noviembre de 2006	64
34.- Gráfica de las mediciones llevadas a cabo el 5 de diciembre de 2006	65
35.- Gráfica comparativa de las curvas de mediciones y pronosticada del 5 de diciembre de 2006	66

Índice de tablas

<u>Tabla</u>	Página
1.- Identificación de los termopares	19
2.- Clasificación NEMA de los motores de inducción	25
3.- Características de diseño NEMA de los motores comerciales de inducción de jaula de ardilla	31
4.- Temperatura límite de los materiales aislantes	35
5.- Valores máximos de temperatura registrados en el motor, correspondiente	46

a la gráfica de la figura 4.11	
6.- Valores máximos de temperatura registrados en el motor, correspondiente a la gráfica de la figura 4.12	48
7.- Valores medidos y generados	55

Capítulo 1

Introducción

Los motores de inducción de jaula de ardilla son los más empleados en las industrias, comercios y hogares, por su eficiencia, economía, facilidad de mantenimiento, y porque su velocidad de operación se ajusta a una marcha casi constante.

Este tipo de motores pueden estar alimentados en forma monofásica o en forma trifásica, siendo esta última la más empleada en las industrias. Se instalan y emplean en una amplia variedad de sistemas, para impulsar bombas hidráulicas, ventiladores, compresores, etc. En ambientes en los cuales los motores están expuestos a factores externos que pueden envejecerlos, provocando un deterioro gradual de sus componentes y provocar fallas que pueden afectar a todo el sistema eléctrico al cual están conectados con pérdidas económicas considerables.

En algunas ciudades del noroeste de México, es característico que durante el verano la temperatura ambiente se eleve a más de 40 grados centígrados a la sombra y llegue hasta 50 grados centígrados directamente al sol. Los motores eléctricos empleados en la región están expuestos a estas temperaturas. Esto, sumado a la generación normal de calor del motor cuando está operando, provoca que la temperatura interna de la máquina se eleve. Y aún más si se encuentra instalado en un lugar cerrado sin ventilación externa. Lo anterior, unido al hecho de que nuestra región es semidesértica y de clima seco, el polvo tapa las ventilaciones del motor o se acumula en la parte externa disminuyendo considerablemente su disipación de calor.

Los motores deben operar dentro del valor límite de elevación de temperatura de acuerdo con el tipo de aislamiento de sus devanados para asegurar una vida útil adecuada.

Generalmente en las industrias, comercios y casas habitación, los motores son operados a plena carga sin tomar en cuenta la temperatura ambiente. Los estándares de la National Electrical Manufacturer Association NEMA [1], recomiendan que al elevarse la temperatura ambiente a valores mayores para los cuales el equipo fue diseñado la potencia

del equipo debe disminuirse, situación que muy rara vez es tomada en cuenta. G.Enríquez Harper [2] en su texto de Pruebas y Mantenimiento a Equipo Eléctrico muestra el porcentaje en que se tiene que disminuir la potencia de salida de un motor eléctrico cuando se rebasa la temperatura de operación de 40°C.

En algunos de los artículos publicados por la IEEE [3-15], en textos [2], [26-30] y artículos de diversas fuentes [16-19], que tratan sobre el comportamiento térmico de los motores de inducción, resaltan la importancia de este tipo de estudio debido al amplio uso de los motores en la vida cotidiana. Estas investigaciones se han enfocado al comportamiento térmico de algunas de las partes del motor bajo condiciones de operación muy específicas, ya sea en vacío, bajo carga, en condición de falla, en arranques y paradas del motor, etc.; y su efecto sobre los campos magnéticos, curvas de histéresis en los núcleos, vibraciones, etc.

Sin embargo, en las pruebas experimentales del comportamiento térmico de los motores de inducción, presentadas en estos artículos, se observó lo siguiente:

- a) Los análisis del comportamiento térmico del motor eléctrico tal como se muestra en [4], [5], [8], [13], [14] y [16] los llevan a cabo sometiendo al motor a pruebas en laboratorios o lugares donde las temperaturas no son tan elevadas como en el verano de la región noroeste de nuestro país. No indican cual es la temperatura ambiente a la cual se hacen las pruebas ya que aparentemente no la consideran importante. Aunque la temperatura inicial en los devanados y partes del motor no exceden los 25 grados centígrados tal como se muestra en los resultados.
- b) Los métodos de análisis son sofisticados y poco sencillos de entender ya que no proporcionan mucha información, además de emplear software y equipos bastante costosos como en las referencias [6], [7], [8] y [11].
- c) La mayoría de las pruebas son de equipos europeos que trabajan a 50 Hz, en México la frecuencia de operación es de 60 Hz. Esto se puede apreciar en la mayoría de la publicaciones de la IEEE como en las referencias [3-12]. Los motores diseñados para trabajar a 60 Hz difieren de los motores de 50 Hz en el diseño de su núcleo magnético, ya que al incrementarse la frecuencia se incrementan las pérdidas por corrientes parásitas y por histéresis. Es por esto que las laminaciones con las que se

construye el núcleo son más delgadas y con un mayor aislamiento entre cada laminación.

- d) La mayoría muestran gráficas del comportamiento bajo condiciones de laboratorio mas no bajo condiciones ambientales externas. Inclusive en algunas gráficas las curvas inician desde 0°C y muestran como las curvas crecen hasta alcanzar la máxima temperatura de operación del motor, situación poco clara, ya que los máximos valores se alcanzan cuando el motor opera a la máxima temperatura ambiente para el cual fue diseñado [4-5], [8], [13-14], tal como lo especifica el fabricante en los datos de placa del motor.

Por lo anterior se decidió investigar experimentalmente cual sería el comportamiento térmico del motor eléctrico operando a temperaturas elevadas.

Debido a las observaciones anteriores y a que en pocos lugares del mundo se tienen temperaturas ambiente de más de 40°C como en Mexicali, se tiene la oportunidad de observar, medir y analizar el comportamiento térmico real, de un motor operando a plena carga a una temperatura ambiente elevada mediante el uso de termopares y un programa de adquisición de datos, lo que nos proporciona un panorama de lo que sucede en el interior de una máquina eléctrica. Este comportamiento pudo llevarse a cabo mediante programas de simulación, sin embargo, el algoritmo de estos programas no toma en cuenta algunos factores como el viento variable, si el motor está bajo el sol o en la sombra o en un lugar poco ventilado.

En la parte experimental de esta investigación, se implementó un sistema de medición el cual proporcionó la información del comportamiento térmico de cada una de las partes vitales de un motor de jaula de ardilla totalmente cerrado enfriado por ventilador externo, trifásico, de ¼ de Hp, alimentado a 220V, operando a plena carga en condiciones de temperatura ambiente elevadas. Las lecturas fueron registradas mediante un sistema de adquisición de datos cada 1.2 segundos durante 80 minutos, graficando los datos para mostrar el comportamiento térmico de cada una de las partes del motor.

En las siguientes capítulos se presentan los fundamentos de la transferencia de calor y las formas en que este se disipa en un cuerpo, el principio de funcionamiento de los motores de inducción, el desarrollo experimental de medición de temperatura y localización del punto más caliente, la obtención de la ecuación que describe el comportamiento térmico

del punto de mayor temperatura en el motor, la forma en que se encontró la relación que existe entre la temperatura inicial y las pendientes de las curvas, y el pronóstico del comportamiento del punto más caliente en el motor operando a plena carga. Al final se presentan las conclusiones y los trabajos de investigación que se llevarán a cabo en el futuro en relación al comportamiento térmico del motor.

Capítulo 2

Fundamentos de transferencia de calor

En este capítulo se presentan los fundamentos de la transferencia de calor, las formas en que se transfiere el calor de un cuerpo al medio ambiente y viceversa, las variables que intervienen y los dispositivos más comunes de medición de la temperatura en un cuerpo. Se hace una descripción más detallada de la medición con termopares debido a que estos dispositivos fueron los utilizados en la medición de la temperatura del motor eléctrico.

2.1 Fundamentos

Siempre que existe una diferencia de temperatura entre dos cuerpos, se produce una transferencia de energía del cuerpo de mayor temperatura hacia el de menor, cuando estos se ponen en contacto. Esa energía es calor, por lo que se puede decir que existe una transferencia de calor entre los dos cuerpos.

Si hablamos de donde puede aplicarse el estudio de la transferencia de calor, podemos referirnos al cuerpo humano, donde el calor que genera el cuerpo y la velocidad con que se pierde en un medio frío está ligado con su comodidad, e inclusive con su supervivencia. Esta velocidad de transferencia de calor intentamos controlarla mediante medios aislantes que nos permitan vivir en un ambiente frío sin perder el calor generado. Algunos equipos como el refrigerador requieren, dentro de su diseño, un estudio de transferencia de calor para evitar que el calor externo pase a través de sus paredes después de que se ha extraído el calor del interior mediante un sistema de enfriamiento, y mantener la temperatura baja para conservar en buen estado los alimentos, medicinas, etc. Caso contrario, algunos requieren preservar el calor tal como una caldera. También, equipos como las computadoras, motores de combustión interna, motores eléctricos, televisores,

etc., deben estar diseñados para lograr una rápida transferencia de calor al exterior y evitarles un daño severo. Es importante añadir que en los últimos años ha cobrado interés el ahorro de energía, por lo que la construcción de casas-habitación, comercios e industrias, deben estar hechas de tal forma que puedan retener el calor en el invierno, o retener el frío en el verano.

Por lo anterior el estudio de la transferencia de calor es muy importante en ingeniería y puede llevarse a cabo en forma experimental o analítica.

Una de las ventajas del estudio experimental es que la medición con instrumentos aporta valores reales del comportamiento del equipo y, por lo tanto, los resultados obtenidos son las condiciones reales en la cual se encuentra operando. Sin embargo, la desventaja de este método es que puede ser costoso, además de que pueden presentarse algunos problemas al momento de colocar los instrumentos de medición, por lo que en algunas ocasiones se prefiere llevar a cabo un estudio analítico el cual es barato y rápido, y que incluso puede estimar el comportamiento de equipos o sistemas que aún no han sido construidos. Por ejemplo una caldera en una nueva fábrica. El inconveniente del método analítico es el número de consideraciones o hipótesis que deben tomarse en cuenta para hacer este análisis, y que en algunas ocasiones, pueden ser de influencia vital para el equipo o sistema. Un ejemplo de esto último son los equipos que únicamente se diseñan para trabajar a una temperatura ambiente máxima de 40°C , y que se emplean en lugares donde fácilmente se rebasa. Esto puede afectar la eficiencia del equipo, lo cual redundará en un menor tiempo de vida o mayor costo de operación.

2.2 Energía y calor

En todo el universo encontramos distintas formas de energía tal como la energía nuclear, cinética, potencial, eléctrica, etc. En un cuerpo, la actividad molecular produce energía a la cual se le conoce como energía interna, y por lo general se denota por U , siendo la unidad de medición en el sistema internacional el Joule (J) [20].

Otra forma de medir esta energía es la caloría, que se define como la cantidad de calor necesaria para elevar en un grado centígrado un gramo de agua. Una caloría es equivalente a 4.1868 Joules [20].

El calor específico se define como la cantidad de energía que se requiere aplicar para elevar en un grado una unidad de masa de la sustancia, y pueden ser a volumen constante C_v , o a presión constante C_p . La unidad de medición es en joules sobre kilogramo grado centígrado o kelvin, $J/kg^{\circ}C$ o $J/kg\ K$ [20].

El calor específico a volumen constante y a presión constante tienen casi el mismo valor $C_v \cong C_p \cong C$, ya que se considera que las sustancias con las que se trabaja son incomprensibles, por lo que el volumen específico no se altera significativamente con los cambios de temperatura y de presión. Este tipo de sustancias, por lo general, son sólidos o líquidos [20].

En toda la materia se tiene un valor de energía interna. Para el caso de los sólidos y los líquidos, el cambio en la energía interna se puede expresar como:

$$\Delta U = mC\Delta T \quad (J), \quad (2.1)$$

donde:

ΔU , es el cambio en la energía interna de la materia en Joules.

m , es la masa en kg.

C , es el calor específico promedio de la sustancia $J/kg^{\circ}C$.

ΔT , la diferencia de temperaturas en $^{\circ}C$.

A un cuerpo se le puede transmitir energía mediante dos formas, calor Q y trabajo W . Si existe una diferencia de temperaturas entre los cuerpos la energía se transfiere en forma de calor. Así mismo, se puede definir a la energía térmica como calor y a la transferencia de energía térmica como transferencia de calor. La cantidad de calor transferido en un proceso entre dos cuerpos, o un cuerpo y su medio ambiente, se le denota por Q , y la cantidad de calor transferida por unidad de tiempo se le conoce como transferencia de calor y se denota por $\dot{Q}$, con unidades de J/s o Watts [20].

2.3 Formas de transferencia de calor

La transferencia de calor se define como la ciencia que estudia la velocidad con la cual se transfiere energía térmica de un cuerpo a otro, o de un cuerpo al medio ambiente. Las formas en que el calor se puede transferir es por medio de conducción, convección y radiación [20-22].

2.3.1 Conducción

La conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas. La conducción tiene lugar en sólidos, líquidos y gases, pero por lo general, este mecanismo de transferencia de calor se

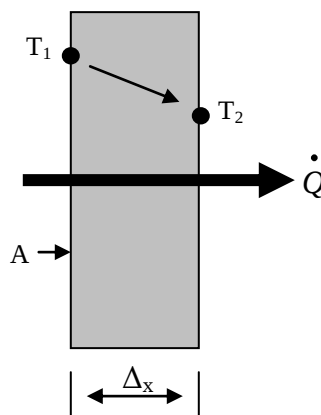


Figura 2.1. Transferencia de calor a través de una pared.

relaciona con los sólidos ya que el calor se transmite a mayor velocidad por conducción en estos materiales, que en los líquidos y gases.

Refiriéndonos a los materiales sólidos, la transferencia de calor depende del tipo de material y forma, es decir de su geometría.

En la figura 2.1 se muestra un pared de material homogéneo, de sección transversal A , de grosor Δx , cuya diferencia de temperatura entre las caras es de $T_2 - T_1$, y donde $T_1 > T_2$. La transferencia de calor a través de esta pared es directamente proporcional a la diferencia de temperaturas entre las dos caras, al área de la sección transversal perpendicular al flujo de calor, e inversamente proporcional al grosor de la pared. Matemáticamente se puede expresar como:

$$\dot{Q} = -kA \frac{T_2 - T_1}{\Delta x} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (\text{W}), \quad (2.2)$$

donde k es una constante la cual se conoce como conductividad térmica, y es una propiedad característica de los materiales, que se puede definir como la capacidad que tienen los cuerpos de conducir el calor, siendo su unidad de medición $\text{W/m}^\circ\text{C}$ [20].

La ecuación (2.2) se puede representar en forma diferencial como:

$$\dot{Q} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (\text{W}). \quad (2.3)$$

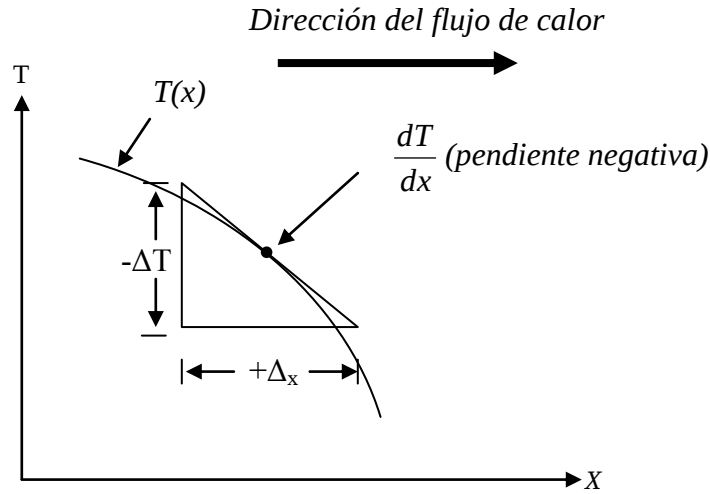


Figura 2.2 Diagrama de la dirección de flujo de calor en un cuerpo.

La ecuación (2.3) se le conoce como la ley de Fourier de conducción del calor y es una cantidad vectorial. Al término $\frac{dT}{dx}$ se le conoce como gradiente de temperatura. Y el signo negativo se agrega para garantizar que la transferencia de calor sea positiva cuando el calor fluye en el lado positivo de x , ya que el gradiente de temperatura se vuelve negativo tal como se muestra en la figura 2.2 [20].

Otro de los términos empleados en la transferencia de calor es la difusividad térmica α , que nos indica que tan rápido se propaga el calor en un material [20]. Esta se define por:

$$\alpha \equiv \frac{k}{\rho C} \quad (\text{m}^2/\text{s}), \quad (2.4)$$

donde:

k , es la conductividad térmica del material en $\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$.

ρC , es la capacidad calorífica o calor almacenado en el material $\text{J}/\text{m}^3^\circ\text{C}$.

Un valor elevado de difusividad nos indica que el material casi no almacena calor ya que todo se transmite al exterior; y un valor pequeño, que todo el calor que absorbe el material es almacenado y una pequeña parte es transmitido al medio ambiente.

2.3.2 Convección

Se presenta cuando la superficie de un sólido está en contacto con un líquido o un gas. La disipación de calor por convección está relacionada con el movimiento de fluidos, ya que entre mayor sea la velocidad, más rápida es la transferencia de calor entre el fluido y la superficie sólida.

La convección puede ser forzada o natural. Cuando al fluido se le incrementa la velocidad con la que roza la superficie mediante un dispositivo, ya sea una bomba, ventilador, etc., se le conoce como convección forzada.

La velocidad con la que el calor se transfiere por convección se puede expresar mediante [20]:

$$\dot{Q}_c = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (W), \quad (2.5)$$

para $T_s > T_\infty$ y donde:

$\dot{Q}_c$, es la velocidad de transferencia de calor por convección en watts.

h , es el coeficiente de transferencia de calor por convección en $W/m^2\text{°C}$.

A_s , es el área superficial del sólido que está en contacto con el fluido en m^2 .

T_s , es la temperatura de la superficie del sólido en °C .

T_∞ , es la temperatura del fluido en un punto lejano al sólido.

Esta ecuación se conoce como ley de Newton de enfriamiento, y nos expresa que la transferencia de calor por convección depende directamente de la diferencia de temperaturas entre el fluido y el cuerpo sólido, así como del área de la superficie sólida que está en contacto con fluido y del coeficiente de transferencia de calor por convección. El factor h solo se determina experimentalmente ya que depende de la naturaleza del fluido, de la forma de la superficie por donde pasa, de la velocidad, etc, [20].

La conducción y la convección están muy relacionadas, ya que para que exista una transferencia de calor por convección, el calor se transfiere primero de la superficie sólida a

la capa de aire por conducción y después es transportado por el fluido al medio que rodea al sólido. El fluido adyacente al cuerpo forma una delgada región de movimiento lento o de baja velocidad llamada capa de frontera [22]. El calor es transmiti-

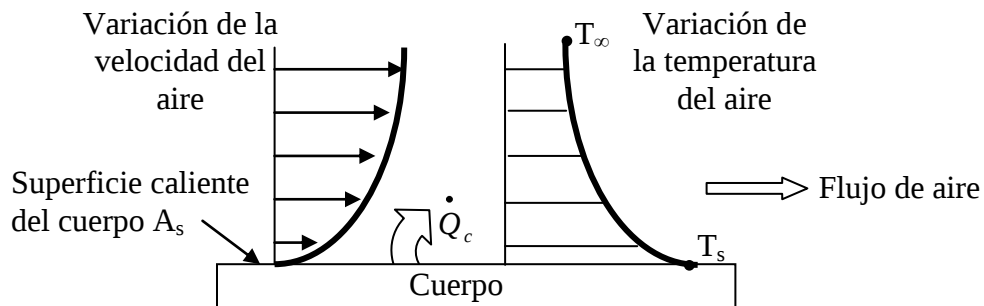


Figura 2.3 Transferencia de calor por convección. Relación de la velocidad del aire y la temperatura.

do a esta capa por conducción y transportado lejos del cuerpo donde se mezcla con la corriente de aire.

De acuerdo a la figura 2.3, al establecer un punto de medición de temperatura de la superficie del cuerpo, entre más alejado esté de la superficie del cuerpo, mayor será la velocidad del aire y menor la temperatura que rodea al cuerpo [20].

2.3.3 Radiación

El calor también puede transmitirse como ondas electromagnéticas. Todos los cuerpos a una temperatura arriba del cero absoluto emiten radiación a diferentes longitudes de onda. Este tipo de radiación es emitida como resultado de las transiciones energéticas de las moléculas, los átomos y los electrones de una sustancia. La radiación térmica es parte del espectro electromagnético que se ubica entre las longitudes de onda de 0.1 a 100 μm que incluye toda la radiación visible, la infrarroja y la ultravioleta. El rango del infrarrojo se encuentra dentro del rango de 0.76 a 100 μm . Sin embargo, el rango utilizado por los instrumentos de medición infrarroja se encuentra en una pequeña franja de 0.76 a 14 μm [23].

Es un fenómeno volumétrico y todos los sólidos, gases y líquidos absorben, emiten y transmiten radiación en diferentes grados. Sin embargo, en los sólidos solo se considera como un fenómeno superficial.

Un radiador perfecto o cuerpo negro emite radiación en una proporción directa a su temperatura absoluta. La velocidad máxima de radiación que puede ser emitida desde una superficie A_s a una temperatura T_s , en K, se expresa por la ley de Stefan-Boltzmann como [20]:

$$\dot{Q}_{rad} = \sigma A_s T_s^4 \quad (W), \quad (2.6)$$

donde:

$\dot{Q}_{rad}$, es la transferencia de calor por radiación de un cuerpo.

$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$, es la constante de Stefan-Boltzmann.

En la realidad las superficies de los cuerpos no son totalmente negras por lo que la radiación que emiten es menor. Por lo anterior, se introduce un factor de emisividad ϵ , cuyo valor es de 0 a 1, siendo este último valor la emisividad de un cuerpo perfectamente negro [20].

La absorptividad a_λ es la fracción de la energía que incide sobre la superficie del cuerpo y es absorbida por esta y, al igual que la emisividad, su valor varía de 0 a 1. Un cuerpo negro es un absorbente perfecto con $a_\lambda = 1$. La velocidad a la cual una superficie absorbe la radiación se puede determinar mediante [20]:

$$\dot{Q}_{abs} = a_\lambda \dot{Q}_{incidente} \quad (W), \quad (2.7)$$

donde $\dot{Q}_{incidente}$ es la energía que incide y es absorbida por la superficie. La diferencia de velocidades entre la energía emitida por la superficie y la energía absorbida es la transferencia total de calor emitida por el cuerpo. Si la velocidad de absorción es mayor que la emisión, se dice que el cuerpo gana energía por radiación, si por el contrario, la velocidad de absorción es menor que la energía emitida, entonces se dice que el cuerpo está perdiendo energía por radiación.

2.3.4 Mecanismos combinados

Los tres mecanismos mencionados anteriormente, no pueden existir simultáneamente en un medio. Puede existir uno o combinado con otro. Por ejemplo, en el vacío solo se transmite el calor por radiación, tal como el calor transmitido por el sol a nuestro planeta. En el caso de sólidos opacos el calor se transmite por conducción, y en los semitransparentes por conducción y radiación. Para los sólidos se puede presentar la transferencia de calor por conducción y /o radiación, pero no por convección, cuando los fluidos que lo rodean se encuentran estáticos. Se puede presentar la convección y la radiación, siempre y cuando exista el movimiento de un fluido a lo largo de su superficie, ya sea gas o líquido [20], [21].

2.4 Medición de la temperatura

La temperatura es una de las variables que influyen en la vida cotidiana de los equipos, su estudio y comprensión se remonta a las épocas de Galileo Galilei quien experimentó con un tubo de vidrio, abierto por un extremo, y que contenía agua en su interior (termoscopio) el cual utilizó para medidas relativas de la temperatura. Posteriormente el uso de tubos capilares que contenían una mezcla de agua y alcohol dieron lugar al invento del termómetro de mercurio construido por Daniel Gabriel Fahrenheit, el cual es usado hasta la fecha en la medición de temperatura. Las escalas de medición de la temperatura fueron desarrolladas por Fahrenheit, Celcius y Kelvin, cada una con sus características y que son muy utilizadas actualmente.

La invención, evolución y desarrollo de nuevos dispositivos de medición de la temperatura partió de la necesidad del hombre de investigar el comportamiento de la temperatura en los cuerpos. Esto dio lugar a nuevos instrumentos de medición los cuales se utilizan de acuerdo al equipo, cuerpo o material al que se desea medir su temperatura.

Los dispositivos de medición más comunes son: de expansión térmica, de medición por resistencia eléctrica, de medición por radiación y de efecto termoeléctrico.

2.4.1 Dispositivos basados en expansión térmica

Pueden ser de dos tipos [24]:

- a) Termómetros de líquido en vidrio.- Un termómetro de líquido en vidrio mide temperatura en virtud de la expansión térmica de un líquido. El líquido está dentro

de una estructura de vidrio que consta de un bulbo y un vástago. El bulbo sirve como depósito y tiene suficiente fluido para cambiar el volumen total del fluido y originar una elevación detectable del líquido en el vástago. El vástago contiene un tubo capilar de vidrio y el nivel del líquido en el capilar indica la temperatura. La diferencia de la expansión térmica entre el líquido y el vidrio produce de hecho un cambio en el nivel del líquido en el capilar. Las mediciones de temperatura proporcionan exactitudes de hasta $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ en condiciones muy bien controladas. Sin embargo, las variables extrañas como la presión y cambios en el volumen del bulbo con el paso del tiempo, pueden introducir errores en las lecturas.

- b) **Termómetros bimetálicos.**- Este tipo de termómetro utiliza el fenómeno de la expansión térmica diferencial entre dos metales. El sensor se construye de dos bandas pegadas de diferentes metales. Uno de los metales posee un alto coeficiente de expansión térmica y el otro un bajo coeficiente, lo que proporciona mayor sensibilidad. Al calentarse se deforman para proporcionar la deflexión deseada para determinada aplicación. Esta banda puede tener diferentes formas dependiendo de la aplicación en particular. Los termómetros de carátula que usan una banda bimetálica como elemento sensor proporcionan mediciones de temperatura con errores de $\pm 1^{\circ}\text{C}$.

2.4.2 Dispositivos de medición con resistencia eléctrica

Como resultado de la naturaleza física de los materiales, la resistencia al paso de una corriente eléctrica de un material varía con la temperatura. Si este comportamiento se utiliza para medir la temperatura su principio es sencillo y conduce a dos clases básicas de termómetros de resistencia: los detectores de temperatura por resistencia en el cual se emplean materiales conductores y los termistores que emplean materiales semiconductores [24].

- a) **Detectores de temperatura por resistencia (RTD).** Se construyen montando un alambre sobre una estructura aislante de soporte para eliminar las deformaciones mecánicas y encapsulando el alambre para evitar cambios en la resistencia debidos a influencias del ambiente en el sensor tal como la corrosión y deformaciones mecánicas por agentes externos. Este último factor es importante, ya que una

deformación mecánica por golpe o estiramiento altera la resistencia del material, tal como se muestra en la siguiente fórmula:

$$R = \rho \frac{l}{A} (\Omega), \quad (2.8)$$

donde:

R , es la resistencia del material conductor en ohms (Ω).

ρ , la resistividad del material en $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$.

l , longitud del material conductor en metros (m).

A , área de la sección transversal del conductor en mm^2 .

El funcionamiento del RTD se basa en el cambio de la resistencia eléctrica del alambre del platino para dar una medida precisa de la temperatura. El material mas comúnmente utilizado es el platino. El uso del platino presenta un cambio predecible y reproducible en la resistencia eléctrica con la temperatura. Esta relación entre la resistencia y la temperatura se expresa matemáticamente como:

$$R = R_o [1 + \alpha (T - T_o)] (\Omega), \quad (2.9)$$

R , es la resistencia final en ohms (Ω).

R_o , la resistencia inicial a la temperatura T_o .

α , es el coeficiente de resistividad por temperatura ($^{\circ}\text{C}^{-1}$).

T_o , es la temperatura inicial del material en $^{\circ}\text{C}$.

T , es la temperatura final del material.

la cual representa una aproximación lineal y es válida en un amplio rango de temperaturas donde el platino es altamente estable.

b) **Termistores.** Son dispositivos elaborados con materiales semiconductores. Tienen como característica principal que su resistencia disminuye al incrementarse la temperatura., en contraste con los RTD, en los cuales la resistencia se incrementa. La relación entre la resistencia y la temperatura para un termistor se obtiene de la forma:

$$R = R_o e^{\frac{K}{T} - \frac{K}{T_o}} (\Omega), \quad (2.10)$$

donde R_0 es la resistencia a 298 K (25°C), o bien, a otra temperatura de referencia, y T_0 es dicha temperatura expresada en Kelvin. El parámetro β es la denominada temperatura característica del material, y tiene valores de 2000 K a 5000 K, pero varía con la temperatura, aumentando al aumentar esta.

2.4.3 Dispositivos de medición por radiación

La medición de temperatura a través de la detección de radiación térmica presenta algunas ventajas únicas. El sensor por radiación no necesita estar en contacto con la superficie donde se quiere medir la temperatura, haciendo este método atractivo para una amplia variedad de aplicaciones [24].

Un termómetro infrarrojo mide la temperatura detectando la energía infrarroja emitida por todos los materiales que se encuentren a temperaturas por arriba del cero absoluto (cero Kelvin). El diseño más básico consiste de un lente que dirige la energía infrarroja hacia un detector, el cual convierte la energía en una señal eléctrica que puede ser leída en unidades de temperatura después de haber compensado las variaciones de temperatura ambiente. Esta configuración facilita la medición de la temperatura a la distancia sin estar en contacto con el objeto. Los termómetros infrarrojos permiten a los usuarios medir temperaturas en aplicaciones donde los sensores convencionales no pueden ser empleados, especialmente en casos en que se involucre maquinaria en movimiento, o donde se requiera medir la temperatura de un cuerpo sin tocarlo por razones de peligro o contaminación o donde las temperaturas son muy elevadas para los termopares u otros sensores de contacto [23].

Las consideraciones críticas para este tipo de medidores son el campo de visión (el tamaño del cuerpo y su distancia), el tipo de superficie donde se hace la medición (si es rugosa o lisa) que involucra a la emisividad, y si la medición se hace manual o fija [23].

La emisividad ε de un cuerpo es la cualidad que define la fracción de radiación emitida por un objeto en comparación con la emitida por un radiador perfecto (cuerpo negro) a la misma temperatura. La emisividad está determinada por el tipo de material y la condición de su superficie, y puede variar desde valores cercanos al cero, para un espejo de alta reflexión, y hasta casi la unidad para un cuerpo de color negro opaco. Debido a que la emisividad es utilizada para calcular la verdadera temperatura de un objeto, debe tomarse en cuenta al momento de utilizar el medidor. Algunos fabricantes recomiendan valores de

emisividad para las diferentes superficies, que involucren el color con la que está cubierta y si es opaca o brillante [23].

Los fabricantes recalcan evitar hacer mediciones cerca de superficies brillantes como paredes u otros objetos, que puedan reflejar la radiación emitida por el objeto y producir errores significativos en la medición de la temperatura, ya que los aparatos también registran esta radiación [23].

2.5 Termopares

Un termopar es un sensor termoelectrónico, y su funcionamiento se basa en dos efectos, el efecto Peltier y el efecto Seebeck.

Thomas J. Seebeck fue el primero en descubrir que al unir dos metales distintos homogéneos, A y B, a una temperatura T , se genera una corriente eléctrica, tal como se muestra en la figura 2.4 a). Es decir la energía térmica se convierte en energía eléctrica, en una fuerza electromotriz e_{AB} , tal como se muestra en la figura 2.4b).

Para pequeños cambios en la temperatura el voltaje Seebeck es directamente proporcional a la temperatura y tiene un comportamiento lineal:

$$e_{AB} = \alpha \Delta T, \quad (2.11)$$

donde α es el coeficiente de Seebeck y se considera como una constante de proporcionalidad. Este efecto depende del tipo de material de que estén compuestos los conductores [25].

El efecto Peltier consiste en el enfriamiento o calentamiento de una unión entre dos metales distintos al pasar una corriente por él. Al invertir el sentido de la corriente se

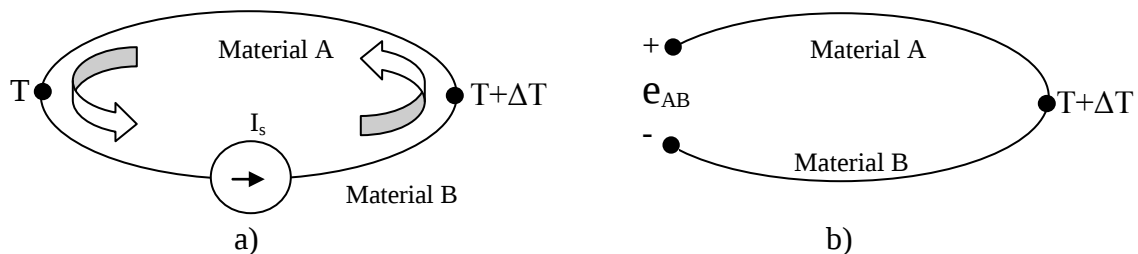


Figura 2.4 Efecto Seebeck en dos metales distintos A y B, homogéneos.

invierte también la dirección del flujo de calor. Es decir, si una unión se calienta al aplicarle una corriente, cuando se cambia el sentido de esta corriente, la unión ahora se enfría, tal como se muestra en la figura 2.5 [25].

Este efecto es reversible e independiente del contacto, es decir, de la forma y dimensiones de los conductores. Depende solo de su composición y de la temperatura de la unión. Esta dependencia resulta ser además lineal y viene descrita por el coeficiente Peltier, π_{AB} [25].

$$dQ_P = \pm \pi_{AB} Idt. \quad (2.12)$$

donde:

dQ_P , es el calor generado.

I , es la corriente que circula por el termopar.

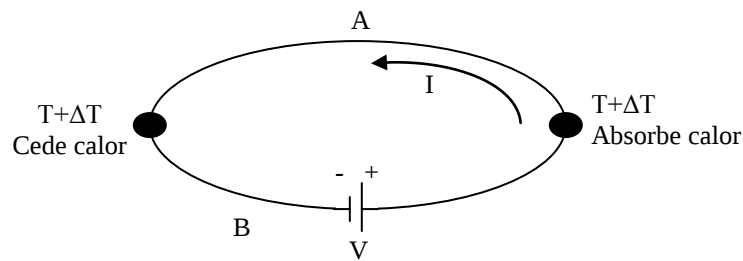


Figura 2.5 Efecto Peltier.

2.5.1 Tipos de Termopares

Existen diversas combinaciones de materiales para formar los termopares, y de acuerdo a las normas de la American National Standards Institute, ANSI, estos se identifican mediante una letra, tal como se muestra en la tabla 2.1 [25].

En cuanto a su uso, los termopares tipo K se emplean en atmósferas reductoras y, en su margen de medida son mejores que los tipos E, J y T cuando se trata de medir atmósferas oxidantes.

Los termopares T resisten la corrosión, por lo que pueden emplearse en lugares húmedos. Los E tienen mayor sensibilidad y resisten la corrosión por debajo de los 0°C.

Los termopares tipo N resisten la oxidación y ofrecen mejor estabilidad a altas temperaturas, y los J se emplean en atmósferas oxidantes y reductoras.

Tabla 2.1. Identificación de los termopares.

Tipo de termopar	Materiales del termopar	
	Positivo (+)	Negativo (-)
E	Cromel	Constantán
J	Hierro	Constantán
K	Cromel	Alumel
N	Nicrosil (Ni-Cr-Si)	Nisil (Ni-Si-Mg)
S	Platino/10% rodio	Platino
T	Cobre	Constantán

2.5.2 Unión de referencia de un termopar

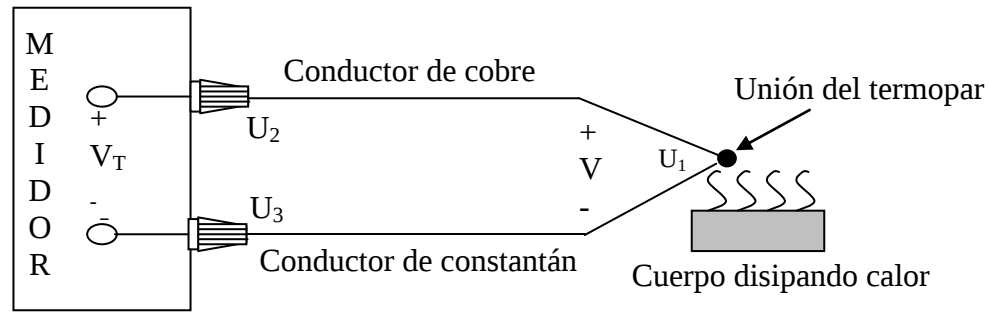
Al medir el voltaje generado en las terminales de un termopar, generado por el efecto Seebeck, nos enfrentamos con el problema de que la unión del termopar con las terminales del medidor generan otras fuerzas electromotrices F.E.M., debido a que las terminales del medidor son de cobre y las del termopar de otro material.

Por ejemplo, si se quiere medir la temperatura de un cuerpo con un termopar tipo T, de cobre (+)-constantán(-), al conectarlo al medidor tal como se muestra en la figura 2.6 a), se generan fuerzas electromotrices en las uniones tal como se muestra en la figura 2.6 b). Se puede apreciar que en la unión U_2 el voltaje generado es igual a cero ya que se trata del mismo material, pero en la unión U_1 y U_3 si se tiene un valor de voltaje ya que es la unión del conductor de constantán y el conductor de cobre de la terminal del medidor.

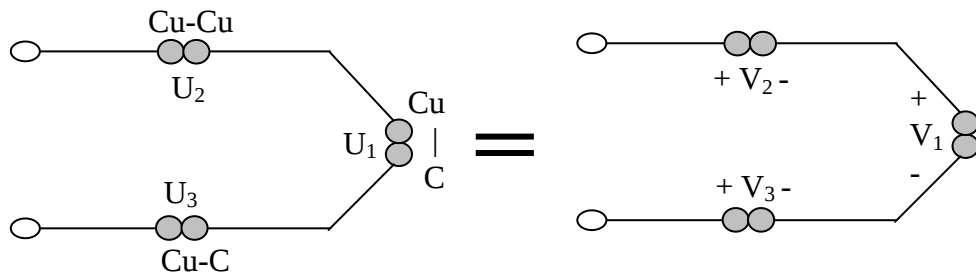
Para determinar la temperatura de la unión U_1 , que se encuentra en el cuerpo al cual queremos medir su temperatura, U_3 se coloca en un lugar a temperatura conocida, como puede ser un baño de hielo a 0°C . A esta unión U_3 se le conoce como punto de referencia [23-25].

Con lo anterior la lectura del voltímetro es proporcional a la diferencia de temperatura entre U_3 y U_1 , tal como se muestra en la figura 2.7. Por lo tanto, el efecto Seebeck que el voltímetro registra es:

$$V_T = V_1 - V_3 \cong \alpha(T_1 - T_2).$$



a)



b)

Figura 2.6 a) Termopar tipo T de cobre-constantán conectado al medidor. b) FEM generada por la unión de dos metales distintos.

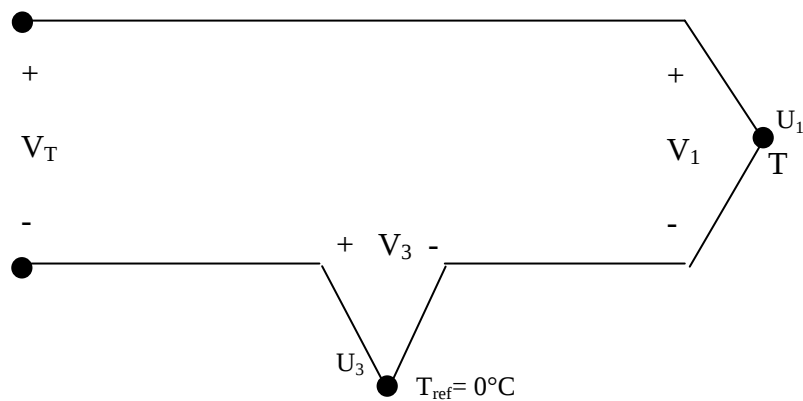


Figura 2.7 Termopar con la unión de referencia a 0°C.

Pero como $T_2=0$, entonces:

$$V_T = \alpha T_1. \quad (2.13)$$

Para eliminar el baño de hielo, se emplea un bloque isotérmico, el cual es un aislante eléctrico pero buen conductor del calor, en el cual se integra un termistor cuya resistencia R_T está en función de la temperatura y, mediante un algoritmo, se llevan a cabo los siguientes pasos para tener un registro de la temperatura a medir en un cuerpo:

- a) Mide el valor de la resistencia del termistor R_T para conocer su temperatura, y convertirla en la temperatura de referencia T_{ref} .
- b) Esta temperatura se convierte en el V_{ref} .
- c) Mide el voltaje V_T y le resta el V_{ref} para encontrar el voltaje V_1 .
- d) Convierte el voltaje V_1 en la temperatura T_1 .

De esta forma el equipo registra la temperatura del objeto donde esté colocado el termopar [23].

Capítulo 3

Motores de inducción de jaula de ardilla

En este capítulo se presentan los principios de funcionamiento del motor de inducción de jaula de ardilla, su construcción, instalación, la interpretación de los datos de placa y el efecto de la temperatura sobre la operación y eficiencia del motor.

3.1 Generalidades

Este tipo de motores se pueden encontrar en una amplia variedad de equipos como bombas hidráulicas, ventiladores, compresores, etc., en diferentes tipos de ambientes. Su amplio uso se debe a su bajo costo, fácil y casi nulo mantenimiento debido a la ausencia de colector y escobillas, a que su rotor es de construcción sólida y no se quema y a que su marcha se puede considerar casi constante. Trabajan con corriente alterna y pueden ser alimentados en forma monofásica o trifásica. Debido a que es el caballo de batalla en la mayoría de las industrias y comercios, la falla en un motor puede provocar incomodidades o pérdidas considerables, por lo que debe estar protegido en forma adecuada para tener el mejor uso del equipo o sistema donde forme parte.

Existen diversos factores que pueden dañar al equipo, y uno de estos es la temperatura. Los motores se diseñan para operar a una temperatura ambiente máxima. Si se rebasa este valor la eficiencia del motor disminuye, y el peligro de una falla por daño al aislamiento es considerable. Al fallar el aislamiento pueden

ocurrir cortocircuitos dentro del embobinado del motor, lo que puede provocar daños si la falla no es liberada rápidamente [26-30].

3.2 Construcción de un motor de jaula de ardilla

El motor de jaula de ardilla tiene una construcción sencilla, consta de dos partes, el estator y el rotor.

El estator es la parte estacionaria del motor donde se encuentra un núcleo magnético, formado por laminaciones de acero al silicio de elevada permeabilidad, el cual es un material ferromagnético que no requiere de mucha energía para magnetizarlo o

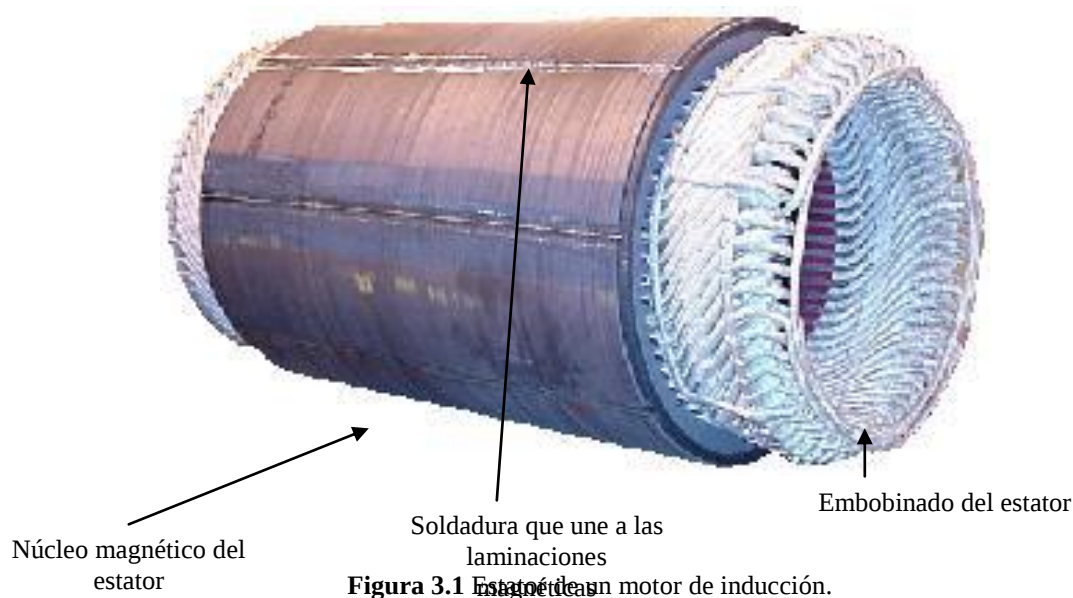


Figura 3.1 Estator de un motor de inducción.

desmagnetizarlo. Cada laminación tiene un grosor de 0.35 mm y están unidas por medio de soldadura de contacto o remaches, tal como se muestra en la figura 3.1.

Entre cada laminación se coloca una capa de barniz, o simplemente una capa de óxido, para disminuir la circulación de las corrientes parásitas a través del núcleo. En las ranuras se colocan las bobinas del estator formadas por alambre de tipo magneto, el cual está recubierto de una capa de barniz aislante, que resiste las temperaturas elevadas a las que trabaja el embobinado del motor. Para evitar que las vibraciones dañen al aislamiento de los conductores y elevar el aislamiento entre el núcleo y las bobinas, se coloca un aislante de cartón especial en las ranuras donde se alojan los conductores, cuyo tipo depende de la máxima temperatura de trabajo del motor.

El rotor es la parte móvil, donde también se tiene un núcleo magnético formado por laminaciones de acero al silicio, y donde se alojan las barras del rotor. Esta estructura está formada por barras de aluminio fundido, cortocircuitadas en los extremos por anillos del mismo material, y donde se agregan aletas para hacer circular el aire en el interior del motor.

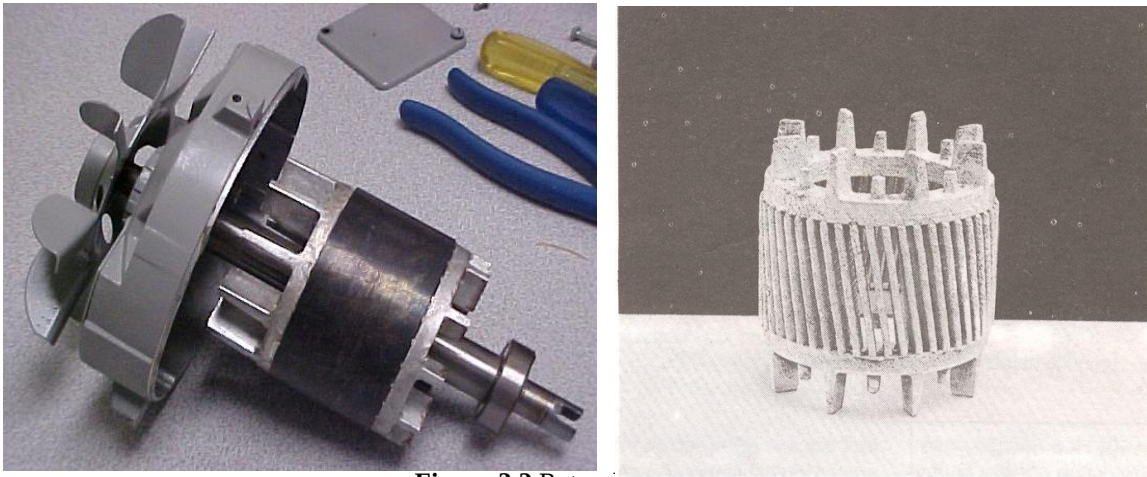


Figura 3.2 Rotor de jaula de ardilla.

Esta estructura de barras del rotor, sin el núcleo magnético, es similar a la jaula en donde corren las ardillas y ratones, de ahí proviene el nombre del motor, tal como se muestra en la figura 3.2.

El núcleo magnético y la estructura de jaula de ardilla se encuentran montados sobre la flecha, la cual gira sobre baleros o bushings. En el extremo frontal se monta la polea o el sistema que el motor impulsará, y en la parte posterior, solo en algunos motores, se monta un ventilador para enfriamiento externo del motor.

Por la construcción de su carcasa y su tipo de enfriamiento la National Electric Manufacturers Association NEMA clasifica a los motores tal como se muestra en la tabla 3.1. El lugar o medio ambiente donde el motor puede instalarse está determinado por la forma de su carcasa. Por ejemplo en un lugar donde se procesan productos químicos es recomendable instalar un motor con envoltura tipo XPFC, cuya cubierta es a prueba de explosión y el motor enfriado por un ventilador externo. En lugares húmedos se puede instalar un motor ODP, el cual es abierto pero su envoltura está diseñada para no permitir el paso de humedad. En lugares como Mexicali donde el polvo es un problema, es recomendable el uso de motores TEFC, los cuales son totalmente cerrados y enfriados por ventilador externo [30].

Tabla 3.1 Clasificación NEMA de los motores de inducción.

Clasificación NEMA de la carcasa	
OPEN	Abierto.
ODP	Abierto a prueba de goteo.
TEAO	Totalmente cerrado enfriado por aire.
TEBC	Totalmente cerrado enfriado por ventilador interno.
TEFC	Totalmente cerrado enfriado por ventilador externo

TENV	Totalmente cerrado no ventilado.
XPFC	A prueba de explosión enfriado por ventilador.
XPNV	A prueba de explosión no ventilado.

En la figura 3.3 se muestra un motor de inducción de tipo TEFC, instalado y operando en un sistema de aire acondicionado.



3.3 Principios de funcionamiento

El principio de funcionamiento puede explicarse mejor en motores trifásicos que en los monofásicos.

Un voltaje trifásico consiste en tres señales de voltaje desfasadas 120° entre sí. Al conectar el embobinado del estator a la línea trifásica, debido a la distribución de los embobinados, se genera un campo magnético giratorio. La velocidad en revoluciones por minuto a la cual gira este campo está dado por:

$$\eta = \frac{120f}{P} \text{ (rpm)}, \quad (3.1)$$

donde:

η , es la velocidad del giro del campo magnético del estator en revoluciones por minuto.

f , es la frecuencia de la línea de alimentación en hertz o ciclos por segundo.

P , es el número de polos del estator.

A esta velocidad del campo magnético del estator se le conoce como velocidad síncrona, y por lo general se expresa en revoluciones por minuto [28].

Cuando un motor de inducción se conecta a la línea de alimentación trifásica, el campo magnético del estator comienza a girar. Las líneas de flujo magnético de los polos del estator varían sobre los conductores del rotor, induciéndose un voltaje en la barra del rotor. Este efecto puede explicarse mediante la ley de inducción de Faraday, que matemáticamente se expresa por:

$$e \equiv N \frac{d}{dt} \Phi \text{ (volts),} \quad (3.2)$$

donde:

e , es f.e.m. inducida en el conductor de la bobina en volts.

N , el número de vueltas de la bobina.

Φ , es el flujo magnético que enlaza a la bobina, variable en el tiempo, en webers.

Debido a que estas barras se encuentran cortocircuitadas en sus extremos por un anillo de aluminio, comienzan a circular corrientes muy elevadas por estas barras. Estas corrientes forma a su vez su propio campo magnético, el cual al enlazarse con el flujo de los polos del estator se acumulan por un lado del conductor del rotor, y por la propiedad elástica de las líneas magnéticas, estas tienden a empujar a los conductores del rotor, generando un par que lo mueve.

Lo anterior puede apreciarse en la figura 3.4.

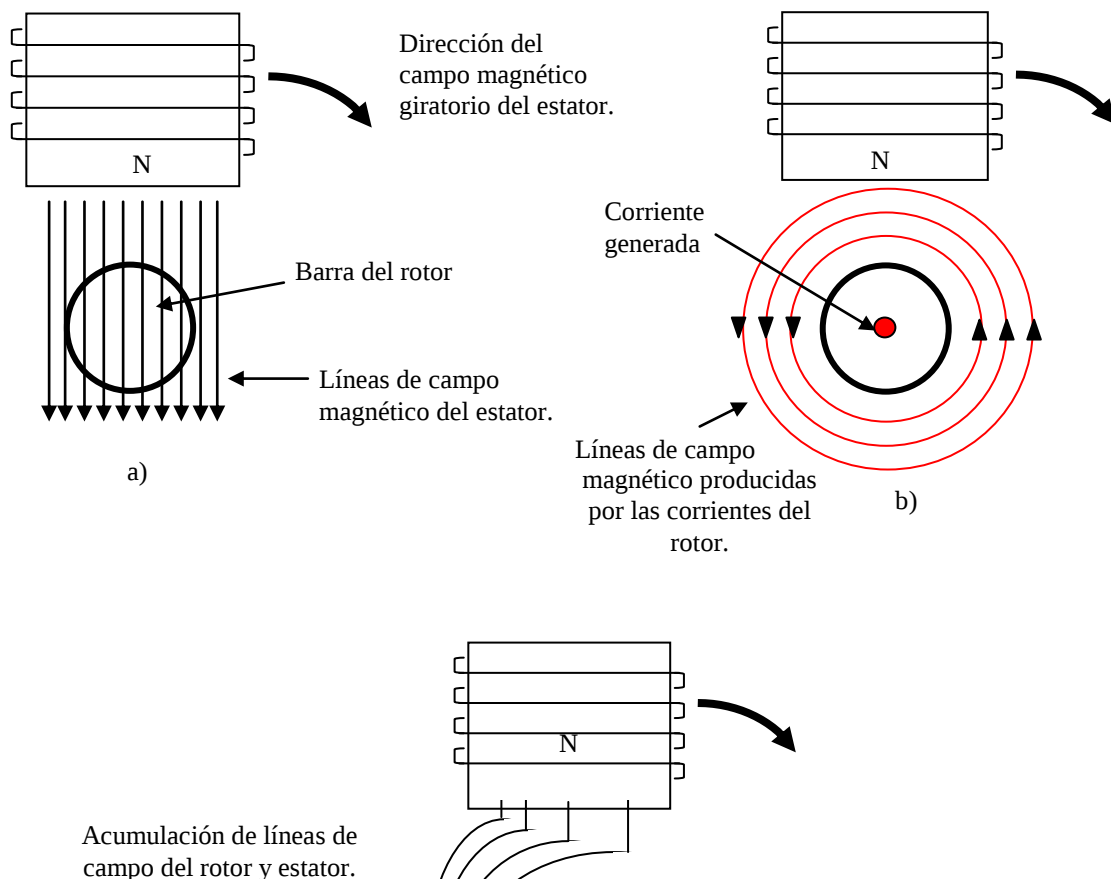


Figura 3.4 Interacción de las líneas magnéticas del rotor y del estator.

Por la inducción de voltajes y corrientes en rotor, la velocidad con la que gira el rotor nunca será igual a la velocidad síncrona, ya que de suceder, el flujo magnético sobre los conductores sería constante, y por lo tanto, el voltaje inducido sería cero.

A la diferencia de velocidades entre el campo giratorio del estator y la velocidad del rotor se le conoce como deslizamiento y se denota por s , y por lo general, se expresa en porcentaje [28].

$$s = \frac{\eta_{\text{síncrona}} - \eta_{\text{rotor}}}{\eta_{\text{síncrona}}} \times 100, \quad (3.3)$$

donde:

η , es la velocidad en revoluciones por minuto.

s , es el deslizamiento en porcentaje.

La frecuencia de la corriente inducida en el rotor depende del deslizamiento. De esta forma, la frecuencia de la corriente del rotor puede calcularse mediante:

$$f_{\text{rotor}} = s f_{\text{estator}}, \quad (3.4)$$

donde:

f , es la frecuencia en hertz.

De la ecuación anterior puede apreciarse que cuando el motor se encuentra conectado a la línea de alimentación y el rotor se encuentra detenido, la frecuencia de la corriente inducida en el rotor es igual a la de la fuente de alimentación. Y cuando el rotor acelera y se acerca a la velocidad de sincronismo, la frecuencia es muy cercana a cero.

Físicamente no existe conexión eléctrica entre rotor y estator, su funcionamiento es mediante inducción de voltajes y corrientes, y la interacción de sus campos magnéticos. Una desventaja de este tipo de motores es que el espacio entre el rotor y el estator, llamado entrehierro, debe ser lo menor posible para disminuir la reluctancia del circuito magnético. Por esto, cuando los baleros que soportan el eje se dañan, el rotor roza a la estructura magnética del estator provocando vibraciones, calentamiento, o bien, que el rotor se atasque.

3.4 Circuito equivalente

Las máquinas eléctricas pueden modelarse mediante un circuito eléctrico para su análisis. En el caso del motor de inducción, como los embobinados del estator y rotor están acoplados inductivamente, el motor se asemeja a un transformador trifásico con el devanado secundario girando. La similitud es mayor cuando el rotor se encuentra bloqueado y el estator conectado a la línea de alimentación, en el cual el deslizamiento $s=1$, y la frecuencia en el rotor es igual a la de la línea de alimentación. Por lo tanto, el motor se puede representar tal como se ilustra en la figura 3.5. En este diagrama se muestra el circuito simplificado de motor de inducción en el que los valores del lado primario, se encuentran referenciados al lado secundario, y el término $\frac{R_2}{s}$ representa el par desarrollado por el rotor. Este circuito nos sirve para conocer la eficiencia, el máximo par desarrollado, la máxima potencia desarrollada, las pérdidas en el estator, las pérdidas en el rotor, etc. [28].

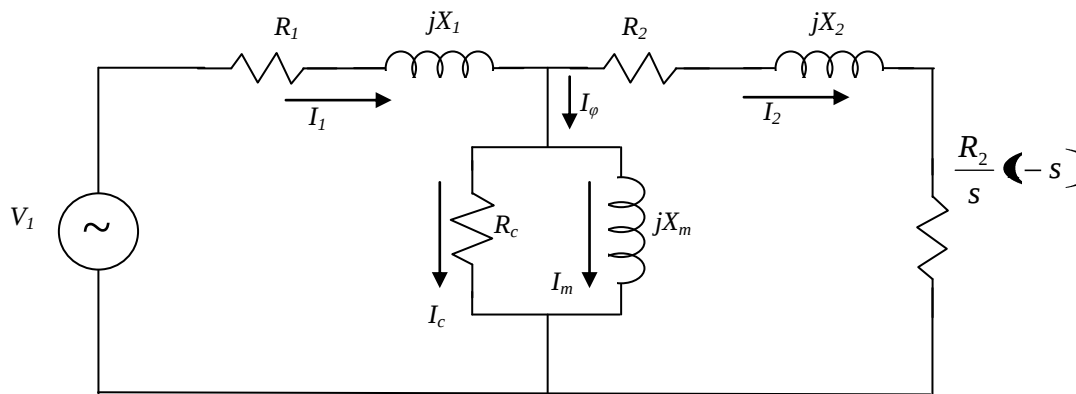


Figura 3.5 Circuito equivalente por fase de un motor de inducción trifásico.

Donde los parámetros representados en el circuito son:

V_1 , es el voltaje aplicado por fase.

I_1 , es la corriente por fase alimentada por la fuente.

I_2 , es la corriente por fase del rotor referida al lado primario.

I_c , es la corriente por fase de pérdidas en el núcleo magnético del estator.

I_m , es la corriente por fase de magnetización en el núcleo magnético del estator.

I_ϕ , es la corriente de excitación por fase en el estator.

R_1 , es la resistencia del embobinado del estator por fase.

R_2 , es la resistencia del rotor referida al lado primario.

X_1 , es la reactancia inductiva del embobinado del estator.

X_2 , es la reactancia inductiva del rotor referida al lado primario.

$\frac{R_2}{s}$ es la resistencia dinámica o resistencia de carga.

R_c , representa las pérdidas en núcleo por histéresis y corrientes parásitas.

X_m , es la reactancia de magnetización en el núcleo del estator.

La resistencia de carga depende de la velocidad del rotor y se dice que representa la carga que impulsa el motor, es decir, es la potencia eléctrica convertida en potencia mecánica en la flecha del motor.

Los parámetros de resistencia y reactancia inductiva de las bobinas, así como las características del núcleo magnético, se pueden calcular mediante las pruebas en vacío, de rotor bloqueado y a plena carga.

3.5 Diseño NEMA de los motores de inducción de jaula de ardilla

Los motores de inducción se fabrican con características diversas para proporcionar una variedad en el comportamiento par-velocidad. Este comportamiento está clasificado por la National Electric Manufacturers Association NEMA con una letra la cual se especifica en los datos de placa del motor. En la tabla 3.2 se muestra de forma resumida las características de operación de los motores de acuerdo a su clasificación [1].

Tabla 3.2 Características de diseño NEMA de los motores comerciales de inducción de jaula de ardilla.

Diseño NEMA	Par de arranque (No. de veces del nominal)	Corriente de arranque (No. de veces del nominal)	Regulación de velocidad en porciento	Nombre de la clase del motor	Usos
A	1.5-1.75	5-7	2-4	Normal	Ventiladores, sopladores, bombas, tornos, máquinas herramientas.
B	1.4-1.6	4.5-5	3-5	Propósito General	Los mismos que el diseño A
C	2-2.5	3.5-5	4-5	De doble jaula, alto par	Cargas con alto par de arranque
D	2.5-3.0	3-8	5-8/ 8-13	De alto par/ alta resistencia	Cargas con inercias muy altas como troqueladoras o cortadoras

3.6 Pérdidas en los motores de inducción de jaula de ardilla.

La conversión de energía, de eléctrica a mecánica en el motor y de mecánica a eléctrica en el generador, está relacionada con las pérdidas. Estas pérdidas de energía son originadas por el flujo magnético, las corrientes en los conductores del estator y del rotor y por la rotación mecánica. Debido a estas pérdidas, la potencia de entrada de la máquina debe, por necesidad, ser mayor que la salida. El rendimiento de la máquina eléctrica está definido como [28]:

$$\eta = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}} = \frac{P_{entrada} - P_{pérdidas}}{P_{entrada}} = 1 - \frac{P_{pérdidas}}{P_{entrada}}. \quad (3.5)$$

Las diferentes clases de pérdidas que aparecen en la máquina eléctrica especialmente en el motor de inducción, son las siguientes:

- a) Pérdidas debidas al flujo principal.
- b) Pérdidas debidas a las aberturas de las ranuras.
- c) Pérdidas debidas a la corriente de carga.
- d) Pérdidas debido a flujos armónicos.
- e) Pérdidas por fricción y ventilación.

Las pérdidas tratadas anteriormente son de diferentes clases, pero todas ellas aparecen en la máquina eléctrica en forma de calor, ya que las pérdidas están producidas principalmente en las partes activas de la máquina, esto es, en el hierro que conduce el flujo y los conductores que conducen la corriente. El calor aparece principalmente en el núcleo, cobre y en los baleros del motor, manifestándose con un incremento de temperatura por arriba de la temperatura ambiente en dichas partes del motor.

3.7 Causas de sobrecalentamiento

Las diversas causas de sobrecalentamiento de un motor de inducción son [28]:

- a) *Alimentación de energía eléctrica.* Para salida de potencia constante, la operación a voltaje inferior al nominal produce menores pérdidas en el hierro, velocidad y ventilación reducidas (motores no síncronos), corriente y pérdidas en los devanados más altas, así como pérdidas mayores por cargas parásitas. El voltaje excesivo produce efectos opuestos. En general, los motores que tienen capacidades de temperatura superiores a plena carga, los que tienen especificaciones de tiempo corto y los que están diseñados para un alto par son más sensibles a las variaciones en la alimentación de energía.
- b) *Sobrecarga sostenida.* La operación con carga superior a la nominal y mayor factor de servicio produce corrientes más altas y mayores pérdidas en los devanados. Si la sobrecarga es lo suficientemente grande, el motor puede bloquearse, no arrancar o no acelerar hasta la velocidad nominal. Estas condiciones son bastante severas y si la capacidad térmica de los devanados es limitada, puede ocurrir un calentamiento destructivo en cuestión de segundos. El calentamiento es crítico en la jaula y los devanados en estas condiciones.

- c) *Ciclo de trabajo sostenido y excesivo.* Los ciclos de trabajo que comprenden el arranque rápido y repetitivo, la inversión de rotación, los jalones y reversas, pueden producir un calentamiento acumulativo que exceda la capacidad térmica de los devanados. Si la ventilación, que se proporcione externamente al motor o esté integrada al mismo, es inadecuada, puede producir daño al motor. Debe proporcionarse tiempo de recuperación de velocidad a los motores de corriente alterna de alto deslizamiento, que impulsan cargas de inercia elevada. Las corrientes altas durante intervalos cortos pueden ser peligrosas si se repiten con rapidez.
- d) *Pérdida de ventilación.* Cualquier cosa que contribuya a reducir la velocidad con la que se elimina el calor del motor puede contribuir al calentamiento peligroso. La pérdida o reducción de ventilación reduce la velocidad a la que se elimina el calor. La causa más común de pérdida de ventilación es la obstrucción, o taponamiento de los pasos de aire de ventilación hacia el motor o en el interior del mismo. La pérdida de enfriamiento en la sección de la eliminación de calor de un intercambiador de calor puede ocurrir si la temperatura del medio refrigerante aumenta, o si el volumen del medio disminuye. El sobrecalentamiento debido a la pérdida o reducción de la ventilación puede ocasionar sobrecalentamientos sin que haya corrientes excesivamente altas. El calentamiento puede ser acumulativo debido a que las pérdidas en el cobre aumentarán con la mayor resistencia de los devanados, ocasionada por las altas temperaturas.
- e) *Temperaturas ambientes elevadas.* El sobrecalentamiento se puede producir si se hace trabajar el motor a una temperatura ambiente más alta de lo especificado. La elevación de la temperatura del motor en las condiciones nominales de operación es una constante independiente de la temperatura ambiente. Los alojamientos o locales en los que es difícil disipar el calor pueden producir temperaturas ambiente mayores a las especificadas. Estas condiciones pueden producir sobrecalentamiento sin corrientes excesivas en el motor.
- f) *Falla de elementos eléctricos.-* El sobrecalentamiento puede provenir del deterioro de algún elemento eléctrico dentro del motor. La falla del sistema de aislamiento entre vueltas en el embobinado, la falla a tierra o entre fases pueden producir calentamiento excesivo, aunque en la mayoría de los casos este tipo de falla produce el paro y desconexión. Trabajar sin una fase en los motores trifásicos, puede producir severos sobrecalentamientos en las fases restantes, por el desbalanceo e incremento de las corrientes. Los cortocircuitos entre espiras, la unión defectuosa en los contactos, las barras rotas en los devanados de jaula, pueden producir sobrecalentamientos en los elementos del motor.
- g) *Falla de componentes mecánicos.-* La pérdida de lubricación, las bandas y coples defectuosos o rotos, el calentamiento del motor y la carga que mueve, pueden producir una carga extra de calentamiento del motor. Estos elementos a veces causan el roce mecánico de las partes rotatorias con las partes estacionarias, originando sobrecalentamiento local. La falla mecánica, ya sea del motor o de su carga accionada, podría producir un motor atascado con un rápido sobrecalentamiento.

3.8 Temperatura límite de los materiales aislantes

La función principal de la protección del aislamiento de los devanados es evitar el degradamiento excesivo del sistema de aislamientos eléctricos ocasionados por la excesiva temperatura. El degradamiento varía con el tiempo y la temperatura para un sistema dado de aislamiento. Suponiendo que se hayan previsto diseño, materiales, procesos, mano de obra y otros tipos de protección apropiados, y si el aislamiento no es dañado físicamente por fuerzas externas, el degradamiento de los sistemas de aislamientos dependerá de las características tiempo-temperatura del aislamiento. El sobrecalentamiento severo puede producir que el motor se queme de inmediato. Además, el sobrecalentamiento produce peligro de incendio y riesgo de choque eléctrico al personal de operación [26-28].

Los materiales utilizados como aislantes en devanados y partes energizadas de los motores de inducción se clasifican de acuerdo con su durabilidad térmica para objetos de clasificación de temperaturas. Se pueden utilizar cuatro clases en los motores polifásicos de inducción: clases A, B, F y H. Esta clasificación y el tipo de material se muestran en la tabla 3.3 [28].

Tabla 3.3 Temperatura límite de materiales aislantes.

Descripción del material	Clase de aislamiento	Aumento permisible de temperatura para una temperatura ambiente de 40°C	Temperatura máxima del lugar más caliente
Algodón, seda, papel u otros materiales orgánicos, que no estén impregnados ni sumergidos en un líquido aislante.	O	50°C	90°C
Cualquiera de los materiales orgánicos anteriores impregnados o cubiertos con dieléctricos líquidos, barnices o esmaltes, o películas de acetato de celulosa orgánico o de resinas semejantes.	A	65°C	105°C
Mica, asbesto, fibra de vidrio y otros materiales inorgánicos con baja proporción de materiales de clase A, como aglomerantes y compuestos.	B	90°C	130°C
Materiales como mica, fibra de vidrio o asbesto, o combinaciones de los mismos, con sustancias aglomerantes adecuadas que demuestren tener una vida térmica	F	115°C	155°C

comparable a temperaturas hasta 155°C.			
Combinaciones de materiales inorgánicos tales como elastómeros de silicona, mica, fibra de vidrio, asbesto, etc., con aglomerantes tales como resina de silicona y otros materiales con vida térmica semejante hasta 180°C.	H	140°C	180°C
Materiales o sus combinaciones que mediante pruebas aceptadas demuestren tener una vida térmica comparable hasta 200°C.	N	160°C	200°C
Materiales o sus combinaciones que demuestren tener una vida térmica hasta de 220°C	R	180°C	220°C
Materiales o sus combinaciones que demuestren tener una vida térmica hasta de 240°C	S	200°C	240°C

Capítulo 4

Desarrollo experimental

En este capítulo se hace la descripción de la forma en que se llevó a cabo la medición del comportamiento térmico de motor, el equipo que se empleó y el lugar donde se instalaron los termopares para la medición de la temperatura, así como los resultados que se obtuvieron. También se muestran las curvas que resultaron de las mediciones de temperatura llevadas a cabo con la cámara térmica y los termopares, en las partes vitales del motor, así como un listado de los resultados del análisis de las gráficas.

4.1 Procedimiento experimental

Desde el punto de vista térmico, debido a la elaborada geometría, diferentes materiales y fuentes de calor, la máquina eléctrica es un dispositivo complejo. Por lo tanto, la consideración del proceso térmico en ésta es muy complicado [7].

El desarrollo experimental para la medición del comportamiento térmico del motor se ilustra en la figura 4.1, donde el equipo utilizado para llevar a cabo las mediciones consta de:

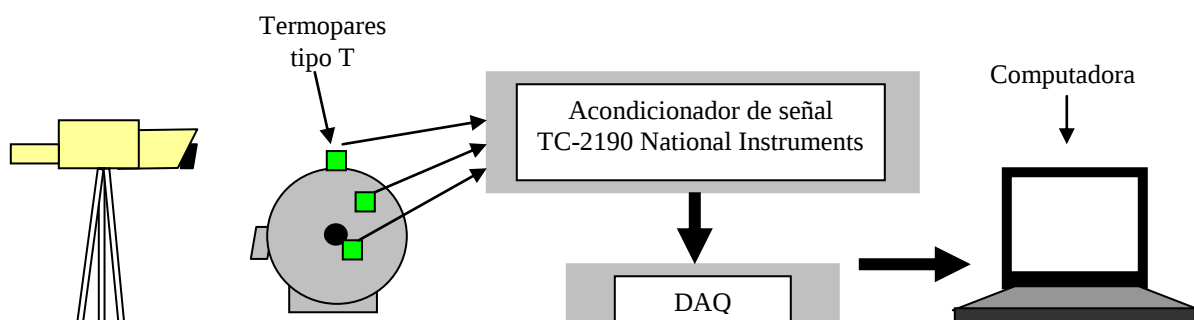


Figura 4.1 Proceso de experimentación y equipo utilizado

- a) Un motor de inducción de Jaula de Ardilla de $\frac{1}{4}$ hp (0.185 Kw), 230/460V, tipo TEFC, 60 hz, 4 polos, 1725 rpm.
- b) 9 termopares tipo T (cobre-constantán), con un rango de temperatura de -184°C a 400°C .
- c) Un acondicionador de señal TC-2190 National Instruments
- d) Una tarjeta de adquisición de datos NI 435X de alta precisión, con conexión USB, con 14 canales de entrada para termopares.
- e) Un software VI DATA LOGGER, versión 2.0, Nacional Instruments, para definir y ejecutar tareas de adquisición de datos, compatible con Labview.
- f) Una laptop pentium III donde se instaló el software y se procesaron las señales de temperatura.
- g) Un generador de corriente continua marca LabVolt de $\frac{1}{4}$ hp que actuó como carga del motor, acoplado mediante una banda.
- h) Dos focos incandescentes de 60 watts conectados como la carga del generador.
- i) Un termómetro infrarrojo digital marca EXTECH con medición de -58°C a 538°C .
- j) Un termómetro ambiental marca Oregon Instruments
- k) Un multímetro de gancho marca Steren.
- l) Un tacómetro digital marca Kleton K4010
- m) Una cámara térmica ThermaCam E25, marca FLIR

4.2 Desarrollo del experimento

4.2.1 Medición de la temperatura con la cámara térmica

Se inició el experimento utilizando una cámara térmica con la que se hicieron mediciones de temperatura en la superficie del motor durante 3 minutos en un lapso de una hora y quince minutos para conocer el comportamiento térmico.

Esta prueba se llevó a cabo a inicio del periodo invernal con una temperatura ambiente de 19°C en el lugar del experimento.

En la figura 4.2 se muestra al motor acoplado a la carga y la cámara térmica colocada a un lado del motor. En la primera prueba se acopló al motor un electrodinamómetro para operarlo a plena carga. Sin embargo, cuando el motor alcanzó su



Figura 4.2 Prueba experimental con la cámara térmica.

estabilidad térmica al cabo de una hora, se notó un excesivo calentamiento del electro dinamómetro. Este calentamiento quedó registrado en la fotografía mostrada en la figura 4.3, en el punto marcado por el puntero Sp1 que registró el lugar de mayor temperatura en el electro dinamómetro. Debido a lo anterior, y considerando que en el futuro varias de las

pruebas se llevarían a cabo a temperaturas ambiente elevadas, se decidió cambiar al electro dinamómetro por un generador de corriente directa tipo shunt, para evitar que se dañara por el excesivo incremento de temperatura. Un par de lámparas incandescentes de 60 watts cada una, se conectaron a la salida del generador. Esto permitió que el motor trabajara sin problemas a plena carga durante las pruebas.

En la figura 4.4 se muestra la imagen térmica del motor operando a plena carga, acoplado al generador de corriente directa. El punto Sp1 muestra el lugar de mayor temperatura en la superficie del motor.

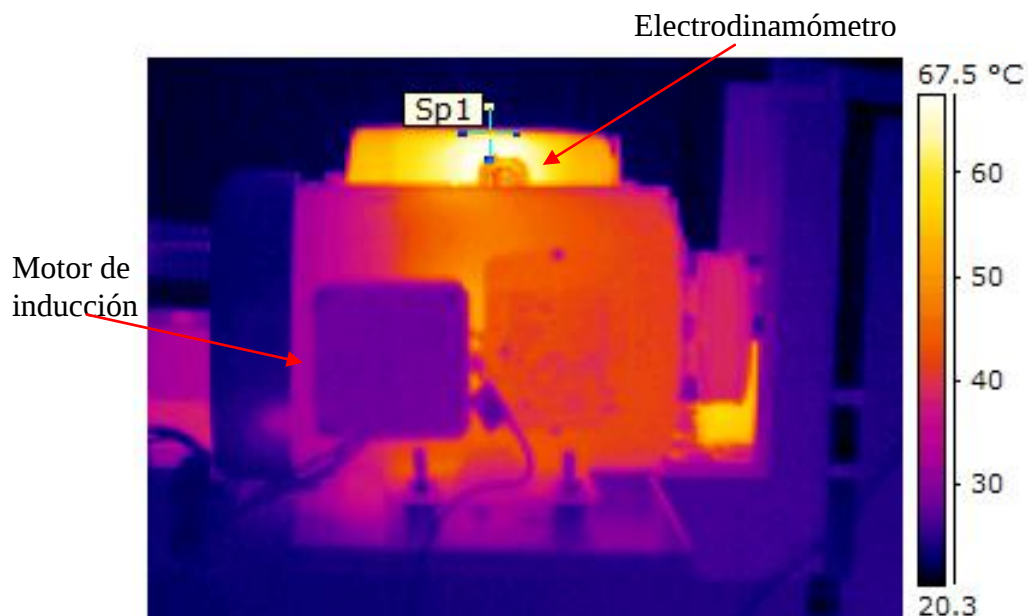


Figura 4.3 Primera prueba, motor acoplado a un electro dinamómetro.

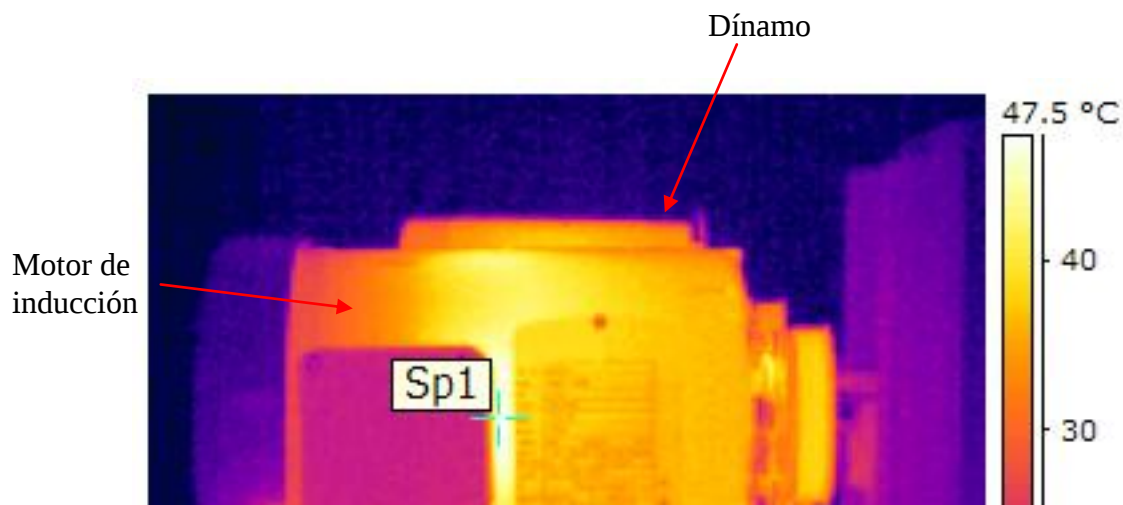


Figura 4.4 Imagen térmica del motor impulsando a un generador de corriente directa que alimenta a cargas resistivas.

4.2.2 Medición de la temperatura con termopares

Debido a que la temperatura medida con la cámara térmica reflejaba el comportamiento en la superficie del motor, se adquirió equipo y material para conocer el comportamiento térmico en el interior de la máquina.

Se adquirieron termopares tipo T por lo económico, precisos y debido a que el rango de temperatura en el motor no excede los 130°C.

En la colocación de los termopares dentro del motor, se consideró que los puntos de generación y transmisión del calor más importantes se encuentran en:

- a) Los devanados del estator. Aquí se considera la generación de calor por la corriente que circula por el embobinado.
- b) En los baleros del motor debido a la fricción y la transmisión del calor generado por la corriente que circula por las barras del rotor.
- c) En el núcleo magnético del estator debido a las pérdidas por histéresis y por corrientes parásitas.
- d) En las tapas, superficie y ductos internos de ventilación del motor.

En la figura 4.5 se muestra la fotografía del motor con los termopares colocados.

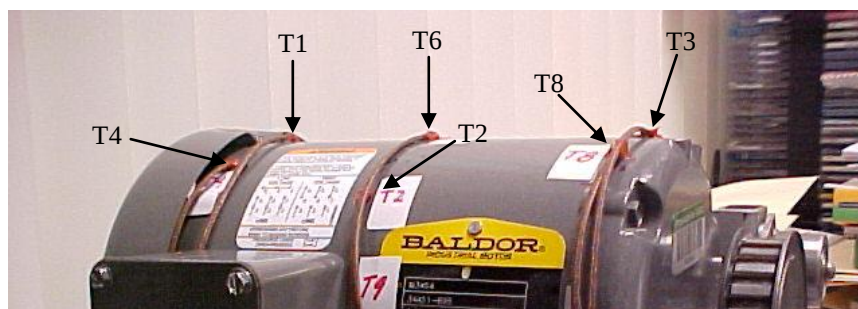


Figura 4.5 Fotografía del motor con los termopares instalados.

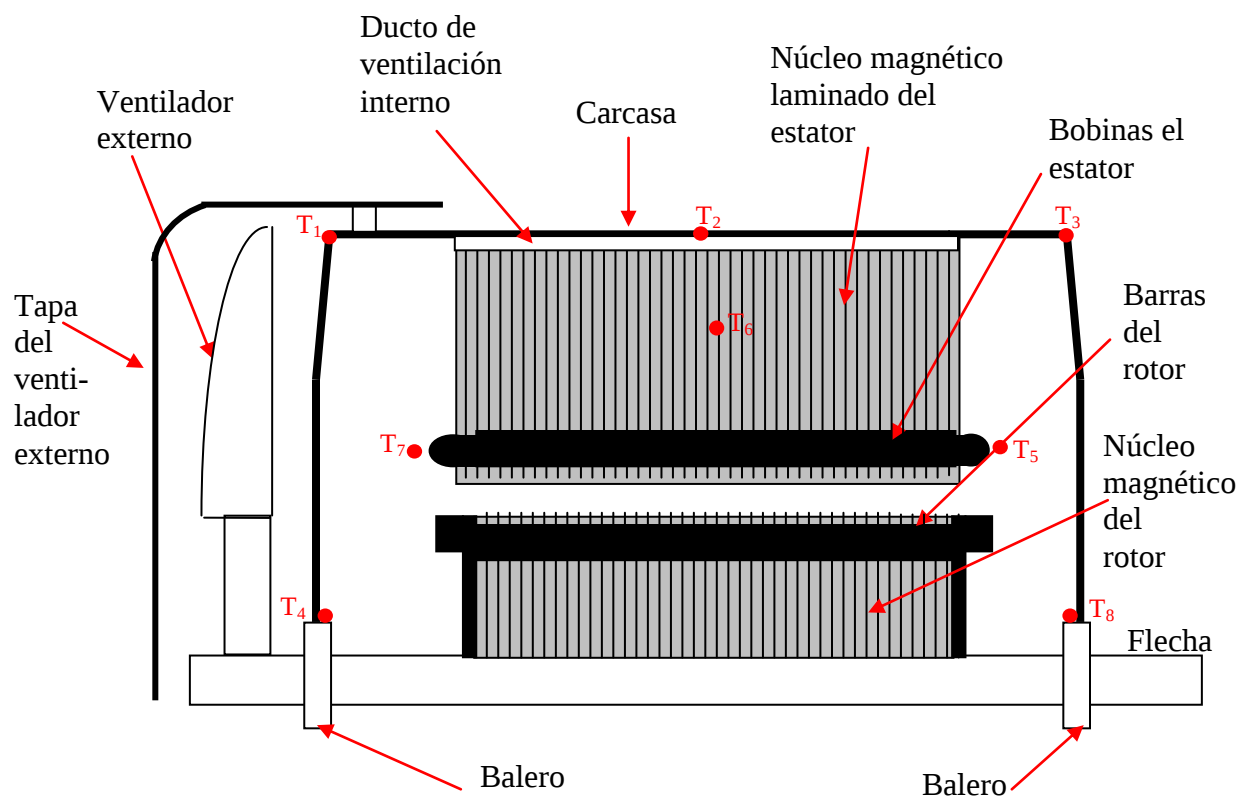


Figura 4.6 Corte axial del motor mostrando los lugares donde se instalaron los termopares.

En el corte axial de la figura 4.6 se muestra la colocación de cada uno de los termopares en los lugares de mayor generación de calor de la máquina, para poder detectar el punto más caliente del motor.

El motor se operó bajo diferentes temperaturas y condiciones ambientales, llevándose a cabo las pruebas de la siguiente forma:

1. Iniciando con el programa de adquisición de datos, VI Data Logger, registrando la temperatura de las partes del motor antes de arrancarlo.
2. Estando el motor acoplado al generador, se arrancó a voltaje pleno de 220 V y se conectaron las lámparas al generador, verificando que la corriente de línea y la velocidad correspondieran a las condiciones de plena carga que son: corriente de 1.3 amperes y velocidad de 1725 revoluciones por minuto.
3. El programa de adquisición de datos registró las temperaturas cada 1.7 segundos, almacenando los datos y formando una gráfica en tiempo real.
4. Cuando se alcanzó la estabilidad térmica después de 80 minutos de haber arrancado el motor, se desconectó de la línea de alimentación.

En la figura 4.7 se muestra una fotografía del motor con su carga y los dispositivos de medición. En esta fotografía aparecen numerados los siguientes equipos y dispositivos:

1. Motor de inducción de jaula de ardilla, trifásico, de $\frac{1}{4}$ hp, tipo totalmente cerrado, enfriado por ventilador, TEFC.
2. Generador de corriente directa acoplado al motor mediante una banda.
3. Termopares tipo T.
4. Acondicionador de señal TC-2190 NI.
5. Tarjeta de adquisición de datos NI 435X.
6. Laptop con el software de adquisición de datos VI DATA LOGGER.
7. Lámparas incandescentes de 60 watts cada una.

Las figuras 4.8 y 4.9 muestran al motor trabajando a la intemperie, con una temperatura ambiente de más de 40°C. El equipo de medición se mantuvo dentro del laboratorio para evitar que se dañara debido a las altas temperaturas.

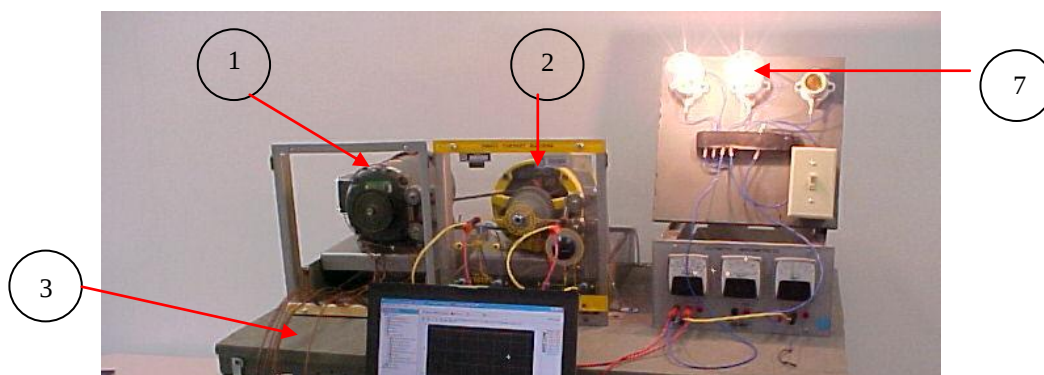


Figura 4.7 Disposición física del equipo de medición.

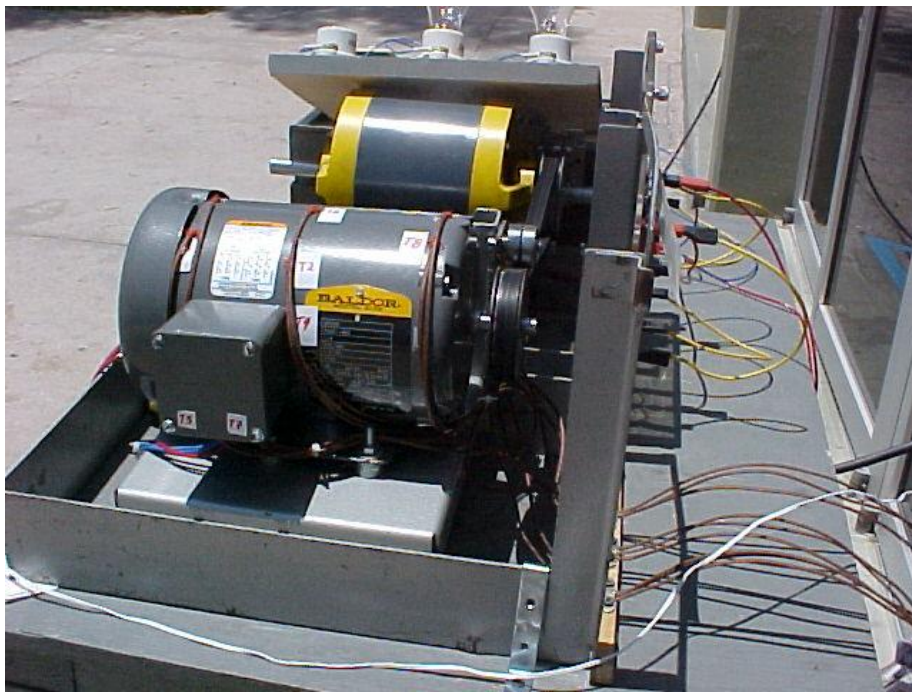


Figura 4.8 Motor operando a la intemperie con una temperatura ambiente de más de 40°C.



Figura 4.9 En la fotografía se muestra al equipo de computo registrando las temperaturas del motor.

4.3 Mediciones obtenidas con la cámara térmica

Los resultados arrojados por la prueba experimental con la cámara térmica son los siguientes:

- a) La estabilidad térmica se alcanzó aproximadamente a los 75 minutos después de haber iniciado la operación del motor con carga.
- b) Estando la temperatura inicial de la carcasa a 19 grados centígrados, la temperatura final en la superficie del motor, en el punto más caliente, fue de 48.1°C.
- c) Este punto de mayor temperatura se encontró en la parte media del estator, lugar que también se tomó en cuenta al momento de hacer la medición de temperatura con los termopares.
- d) La gráfica del comportamiento térmico es de tipo exponencial.

En la figura 4.10 se muestra una gráfica del comportamiento térmico en el punto de mayor temperatura del motor, registrado con la cámara térmica.

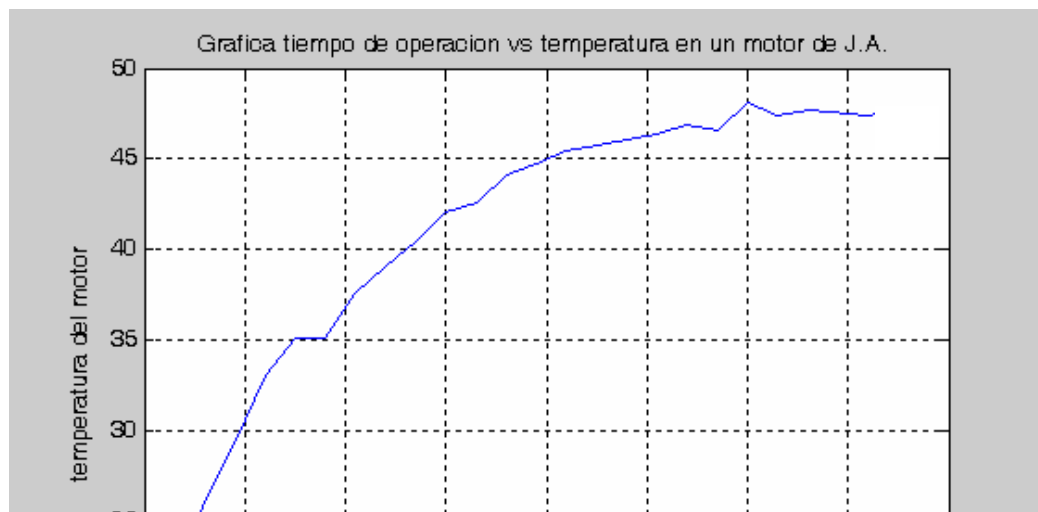


Figura 4.10 Gráfica del comportamiento térmico del punto de mayor temperatura registrado por la cámara térmica.

4.4 Mediciones obtenidas con los termopares

Con la colocación de los termopares en los embobinados, baleros, núcleo y carcasa del motor, se midió la temperatura en la parte externa e interna de la máquina. Los resultados que obtuvieron con los termopares son:

- a) La estabilidad térmica se alcanzó a los 80 minutos de operación del motor, tal como se muestra en la figura 4.11.
- b) El punto de mayor temperatura se encontró en los devanados del estator, registrada por los termopares T5 y T7, tal como se alcanza a apreciar en las figuras 4.11 y 4.12, y en las tablas 4.1 y 4.2.
- c) En algunos textos [2], [30] recomiendan que para conocer la temperatura final en los devanados del motor, a la temperatura superficial se le sumen 30°C , sin embargo, en la tabla 4.1 se pudo apreciar que la diferencia de temperaturas entre el punto más caliente en los devanados, registrada por el termopar T5, y el punto menor temperatura superficial, registrado por el termopar T1, es de más de 37°C , valor mayor a 30°C recomendado por los textos.
- d) En condiciones ambientales sin variaciones de más de un grado centígrado en el ambiente, las curvas del comportamiento térmico en las diferentes partes del motor muestran un incremento exponencial uniforme, tal como se aprecia en la figura 4.11.

- e) Operando el motor a la intemperie con condiciones de temperatura ambiente elevadas el comportamiento térmico en las diferentes partes del motor no es una curva exponencial uniforme ya que presenta variaciones de temperatura, tal como se muestra en la figura 4.12, excepto en los devanados donde se registró un crecimiento exponencial uniforme.
- f) Si se comparan los comportamientos térmicos entre la curva graficada en la prueba de laboratorio con una temperatura inicial de 23°C, figura 4.11, y la curva registrada a más de 40°C, figura 4.12, se nota un considerable incremento en la temperatura del núcleo magnético, así como variaciones en la curva térmica cuando el motor opera a una temperatura ambiente de más de 40°C.
- g) Operando el motor a la intemperie las rachas de viento influyeron en la disipación de calor, ya que las temperaturas registradas dentro y fuera del motor fueron menores, comparadas con condiciones de temperatura ambiente sin viento.

Tabla 4.1 Valores máximos de temperatura registrados en el motor, correspondiente a la gráfica de la figura 4.11.

Termopar	Localización en el motor	Temperatura °C
T1	Tapa trasera a un lado del ventilador externo	33.78
T2	Conducto de ventilación interno	44.14
T3	Tapa delantera junto a la polea	42.88
T4	Balero trasero junto al ventilador externo	41.66
T5	Embobinado del estator parte delantera	71.53
T6	Núcleo magnético del estator	44.92
T7	Embobinado del estator parte posterior	71.12
T8	Balero delantero	50.37
T9	En la carcasa a un lado de la caja de conexiones del motor.	48.44

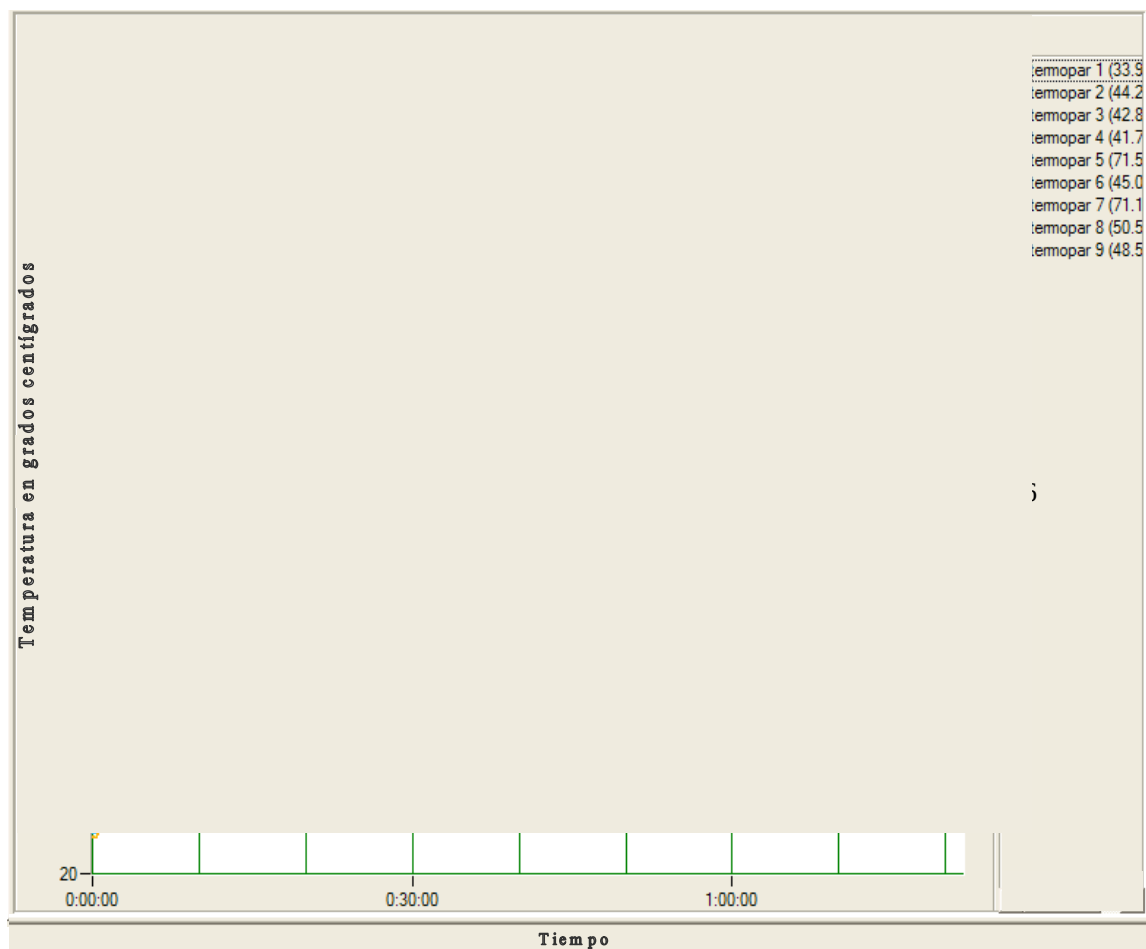


Figura 4.11 Medición llevada a cabo en el laboratorio. La mayor temperatura fue registrada por los termopares T5 y T7 , la menor temperatura por el termopar T1.

Termopar	Localización en el motor
T1	Tapa trasera a un lado del ventilador externo
T2	Conducto de ventilación interno
T3	Tapa delantera junto a la polea
T4	Balero trasero junto al ventilador externo
T5	Embobinado del estator parte delantera
T6	Núcleo magnético del estator
T7	Embobinado del estator parte posterior
T8	Balero delantero
T9	En la carcasa a un lado de la caja de conexiones del motor.

Tabla 4.2 Valores máximos de temperatura registrados en el motor, correspondientes a la gráfica de la figura 4.12.

Termopar	Localización en el motor	Temperatura °C
T1	Tapa trasera a un lado del ventilador externo	53.14
T2	Conducto de ventilación interno	67.26
T3	Tapa delantera junto a la polea	63.81
T4	Balero trasero junto al ventilador externo	58.49
T5	Embobinado del estator parte delantera	86.43
T6	Núcleo magnético del estator	71.86
T7	Embobinado del estator parte posterior	85.73
T8	Balero delantero	67.82
T9	En la carcasa a un lado de la caja de conexiones del motor.	64.27

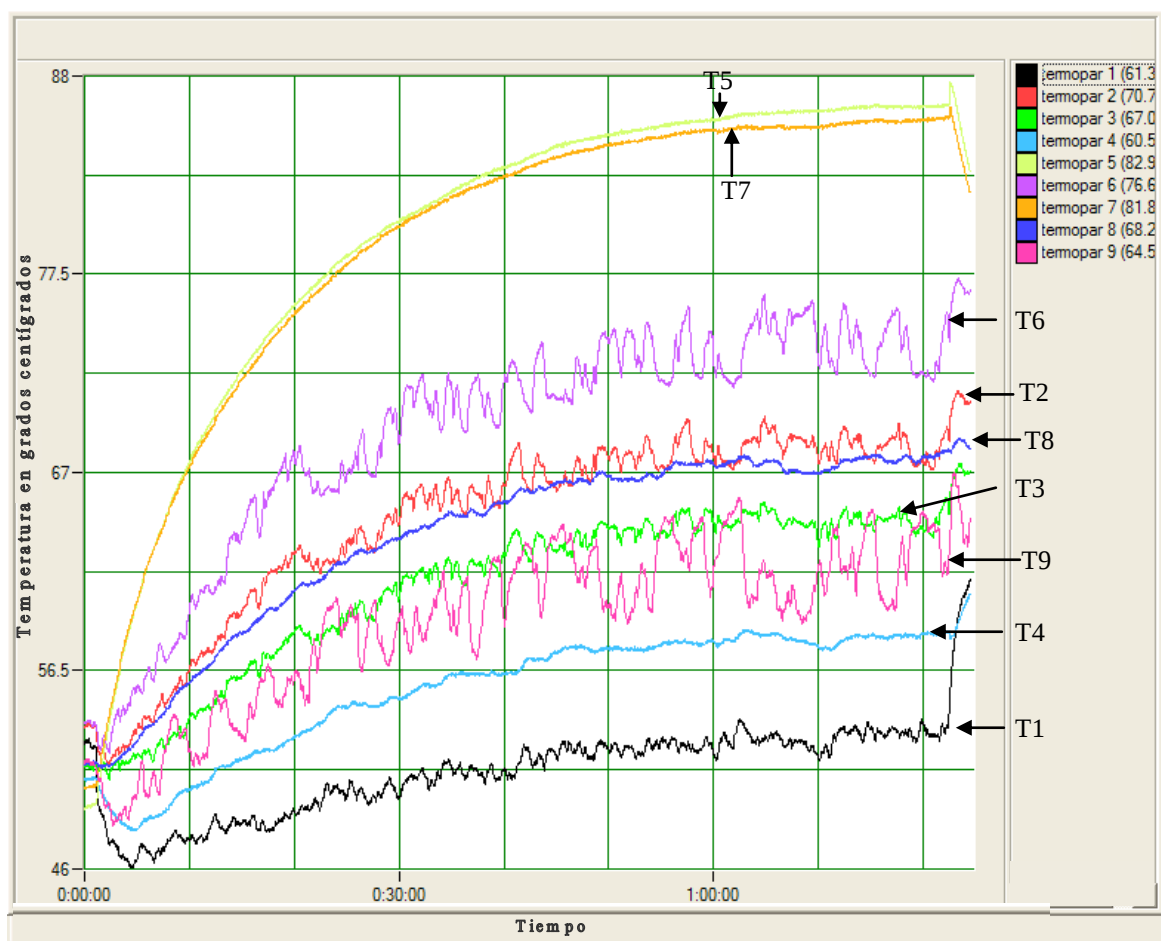


Figura 4.12 Prueba llevada a cabo con una temperatura ambiente de más de 40°C. Nótese que la transferencia de calor en el núcleo magnético (T6) no es uniforme.

Termopar	Localización en el motor
----------	--------------------------

T1	Tapa trasera a un lado del ventilador externo
T2	Conducto de ventilación interno
T3	Tapa delantera junto a la polea
T4	Balero trasero junto al ventilador externo
T5	Embobinado del estator parte delantera
T6	Núcleo magnético del estator
T7	Embobinado del estator parte posterior
T8	Balero delantero
T9	En la carcasa a un lado de la caja de conexiones del motor.

De las gráficas y análisis anteriores se puede apreciar que la medición con los termopares arrojó mayor información que las mediciones llevadas a cabo con la cámara térmica. Es por esto que las curvas de las mediciones llevadas a cabo por los termopares, son las que se utilizarán para el análisis del lugar de mayor temperatura en el motor, en el siguiente capítulo.

Capítulo 5

Análisis de los resultados experimentales

En este capítulo se analizan con detalle las mediciones llevadas a cabo en los devanados del motor. Se muestra la ecuación que modela el comportamiento térmico del punto de mayor temperatura. Se hace un análisis de las curvas generadas en este punto y de la relación que existe entre las pendientes de las curvas, y con esta relación, se pronostica de manera sencilla el comportamiento térmico de los devanados del motor conociendo la temperatura inicial del devanado.

5.1 Análisis del embobinado como un elemento concentrado

En el análisis de la transferencia de calor, se observa que algunos cuerpos se comportan como un “bulto” cuya temperatura interior permanece uniforme en todo momento durante un proceso de transferencia de calor. La temperatura de esos cuerpos se puede tomar solo como una función del tiempo $T(t)$. El análisis de transferencia de calor que utiliza esta idealización se conoce como análisis de sistemas concentrados, el cual proporciona una gran simplificación en ciertas clases de problemas de transferencia de calor sin mucho sacrificio de la exactitud [20].

Con las mediciones llevadas a cabo y descritas en el capítulo anterior se tiene la ventaja de conocer el comportamiento térmico de la máquina eléctrica y considerarla como cuerpo homogéneo, un elemento

concentrado. En el estudio del comportamiento térmico de este cuerpo interesa conocer el máximo calentamiento en el embobinado, partiendo de que únicamente se conoce la temperatura ambiente. Por lo tanto, si se considera que es una sola pieza la cual se encuentra a una temperatura T_o y es sometida a un medio con una temperatura uniforme T_∞ , siendo $T_\infty > T_o$. Debido a la diferencia de temperaturas entre el medio y el cuerpo, y a que el medio se encuentra a mayor temperatura, se producirá una transferencia de calor hacia el cuerpo lo cual incrementa su temperatura.

Supondremos que la temperatura dentro del cuerpo es uniforme y solo se incrementa durante el tiempo del análisis t , es decir $T(t)$.

El proceso de transferencia de calor se puede modelar como un elemento concentrado considerando un balance de energía, de acuerdo a la primera ley de la termodinámica, entre el calor transferido y el incremento de temperatura en el cuerpo.

La primera ley de la Termodinámica para sistemas cerrados toma la siguiente forma básica [22]:

$$\dot{Q} = Wk + \frac{dU}{dt} \quad (W), \quad (5.1)$$

donde:

$\dot{Q}$, es la transferencia de calor hacia el sistema.

Wk , es el trabajo que realiza el sistema.

$\frac{dU}{dt}$, es la razón de cambio de la energía interna del sistema.

El análisis de transferencia de calor generalmente puede hacerse sin hacer referencia a ningún proceso de trabajo, aunque la transferencia de calor puede subsecuentemente combinarse con trabajo en el análisis de un sistema real. Si pdV es el único trabajo que ocurre, entonces la ecuación 5.1, es [22]:

$$\dot{Q} = p \frac{dV}{dt} + \frac{dU}{dt} \quad (W), \quad (5.2)$$

donde:

p , es la presión sobre el sistema.

dV , la variación del volumen con respecto al tiempo.

Considerando que sistema es un motor eléctrico, y que el motor es un cuerpo sólido e incomprensible, el proceso de transferencia de calor ocurre a presión y volumen constante. Por lo que la ecuación 5.2, toma la forma [22]:

$$\dot{Q} = \frac{dU}{dt} = mC_v \frac{dT}{dt} \quad (W), \quad (5.3)$$

donde:

m , es la masa del cuerpo.

$C_v=C_p=C$, es el calor específico del cuerpo a presión y volumen constante.

El balance de energía en el cuerpo se puede expresar como:

(Transferencia de calor del exterior hacia el cuerpo por convección)=(Incremento en la energía del cuerpo en función de dT/dt).

Esto es [22]:

$$\dot{Q} = -hA_s (T - T_{\infty}) = mC_v \frac{dT}{dt}, \quad (5.4)$$

donde:

h , es el coeficiente de transferencia de calor por convección en $W/m^2 \text{ } ^\circ C$.

A_s , es el área superficial del cuerpo en m^2 .

T , es la temperatura del cuerpo en $^\circ C$.

T_{∞} , es la temperatura del medio ambiente en $^\circ C$.

Por conveniencia se puede considerar a $T_{\infty}=T_{max}$ y reescribir la ecuación 5.4 como:

$$-hA_s (T - T_{max}) dt = mC_v dT. \quad (5.5)$$

Arreglando términos y considerando que la masa m es igual a:

$$m = \rho V,$$

donde:

ρ , es la densidad del cuerpo en kg/m^3 .

V , es el volumen del cuerpo en m^3 .

Se tiene:

$$\frac{dT}{T - T_{max}} = -\frac{hA_s}{\rho VC_v} dt,$$

Al integrar ambos lados de la ecuación, desde $t=0$, en el cual $T= T_i$, hasta cualquier instante de tiempo t en el cual $T= T(t)$, y T_{max} es constante, se tiene:

$$\ln \frac{T - T_{max}}{T_i - T_{max}} = -\frac{hA_s}{\rho VC_v} t$$

Si hacemos que:

$$b = -\frac{hA_s}{\rho V C_v} \text{ en s}^{-1}$$

Entonces se tiene:

$$\frac{T(t) - T_{\max}}{T_i - T_{\max}} = e^{-bt}.$$

Quedando la ecuación:

$$T(t) = (T_i - T_{\max}) e^{-bt} + T_{\max}, \quad (5.6)$$

donde:

$T(t)$, es la temperatura del devanado en el instante de tiempo t , en °C.

T_i , es la temperatura inicial en el devanado, en °C.

$T_{\max}$, es la temperatura máxima en la que se estabiliza el comportamiento térmico del motor, en °C.

t , es el tiempo en segundos, siendo más práctico en minutos.

b , es la constante de tiempo en s^{-1} , sin embargo es más práctico utilizarlo en min^{-1} .

La obtención de esta constante de tiempo b a partir de las mediciones, es un punto importante, ya que de este valor depende una buena caracterización de las curvas térmicas del motor. Para aplicaciones en ingeniería, el criterio más popular utilizado para evaluar la capacidad térmica de un motor operando con ciclos de trabajos constantes o intermitentes, está basado en un modelo térmico simple de primer orden para un motor con un cuerpo homogéneo. En el uso de este método, si la constante de tiempo térmica no se selecciona apropiadamente, no se tendrán buenas predicciones de temperatura, y el calentamiento efectivo de los motores será mayor o menor que la máxima temperatura pronosticada [12].

El valor de la constante de tiempo b encontrado a partir de las mediciones llevadas a cabo y mostradas en el capítulo anterior, es $b=0.064 \text{ min}^{-1}$. Este valor se obtuvo graficando la ecuación 5.6 en matlab y considerando por observación que el valor de la constante de tiempo se hallaba dentro de un rango de 0.055 a 0.075, con una temperatura inicial $T_o=22.56^\circ\text{C}$ y una temperatura máxima de $T_{\max}=71.53^\circ\text{C}$. La curva generada en matlab se ajustó a las curvas de mediciones dándole diferentes valores a b dentro del rango mencionado, encontrando que el valor de 0.064 generaba una curva que se ajustaba bien a los resultados de las mediciones. Con este valor de la constante de tiempo la ecuación 5.6 del comportamiento térmico del embobinado del motor se puede expresar como:

$$T(t) = (T_i - T_{\max}) e^{-0.064t} + T_{\max}. \quad (5.7)$$

Para mostrar lo anterior, en la tabla 5.1 se muestran los valores medidos por el termopar T5, mostrados en la figura 4.11, y los generados en matlab por la ecuación 5.7. En la figura 5.1 se muestran ambas gráficas.

Tabla 5.1 Valores medidos y generados.

Tiempo (minutos)	Valores medidos	Valores generados
0	22.56	22.5600
5	38.06	35.9705
10	46.97	45.7085
15	52.89	52.7797
20	57.77	57.9145
25	61.15	61.6431
30	63.69	64.3507
35	65.50	66.3167
40	67.07	67.7444
45	68.24	68.7811
50	69.07	69.5339
55	69.75	70.0805
60	70.32	70.4775
65	70.72	70.7656
70	71.08	70.9750
75	71.30	71.1270
80	71.53	71.2374

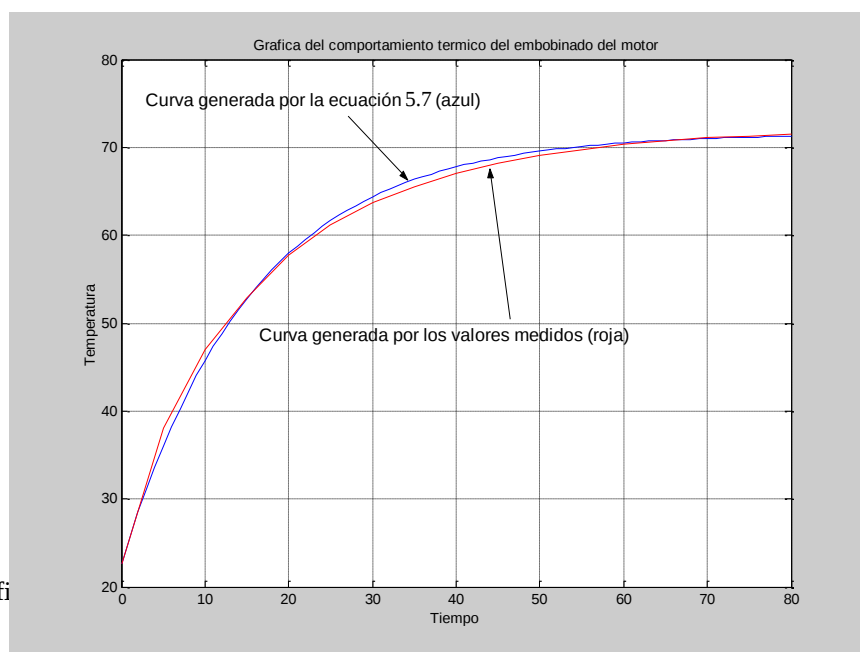


Figura 5.1 Gráfi
5.7.

er la ecuación

5.2 Relación entre las pendientes de las curvas térmicas

Las curvas térmicas generadas por el devanado a diferentes temperaturas ambiente se analizaron de diversas formas para saber si existía alguna relación entre la temperatura inicial y el valor final de temperatura alcanzado por el embobinado del motor.

Se encontró que existe una relación entre las pendientes de las curvas generadas por el comportamiento térmico del motor a diferentes temperaturas ambiente. Lo anterior se obtuvo de la siguiente forma:

La derivada de la ecuación 5.7 queda de la siguiente forma:

$$\frac{dT}{dt} = -0.064(T - T_{\max})e^{-0.064t} \quad (5.8)$$

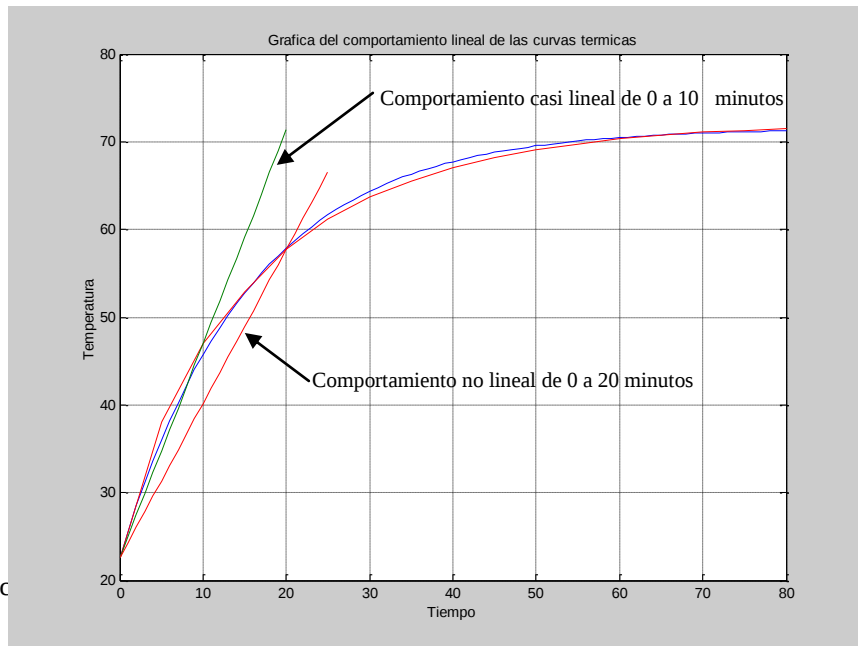


Figura 5.2. Gráfico

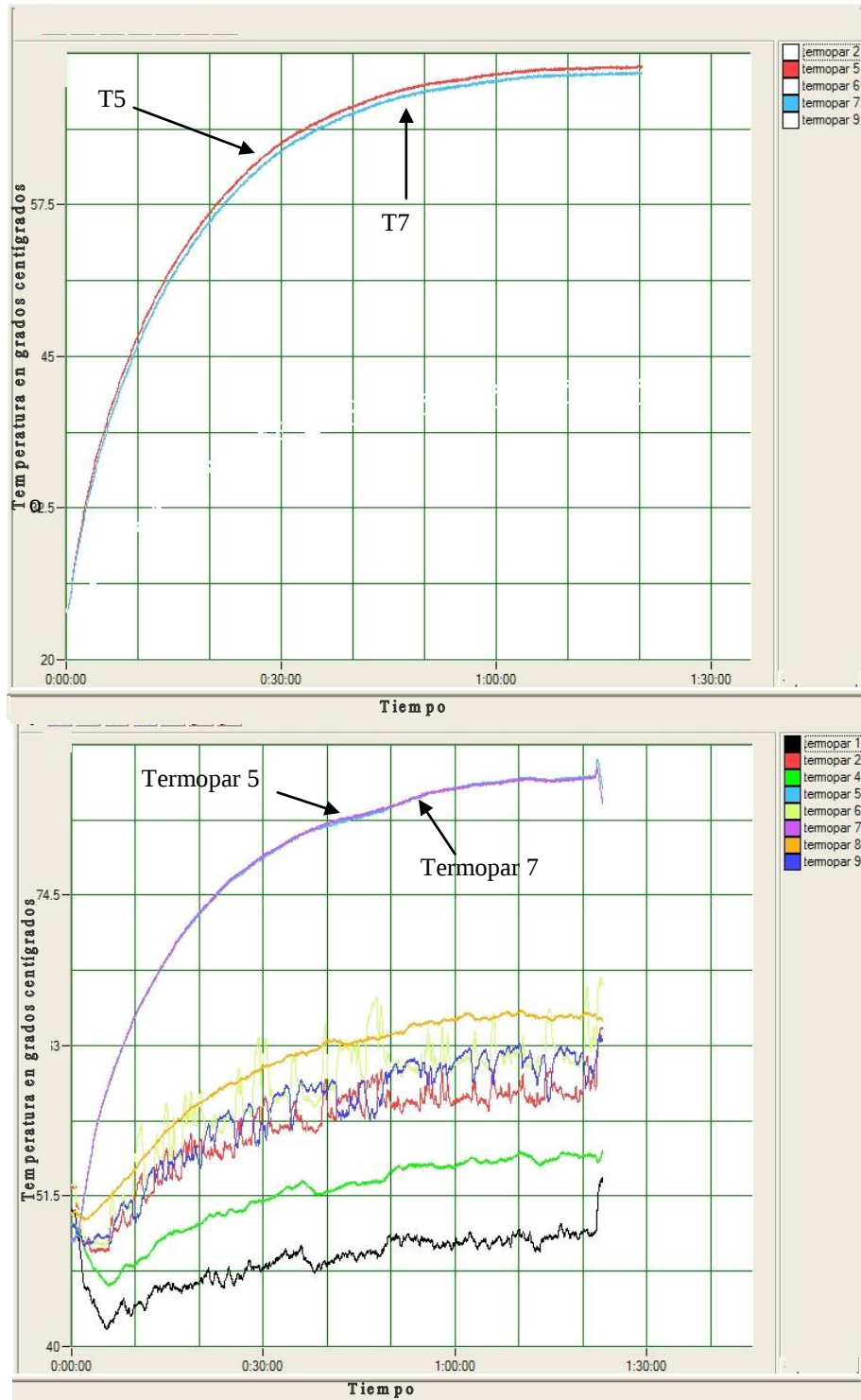
Tomando en cuenta las lecturas de temperaturas inicial y final de dos de los experimentos llevados a cabo en condiciones ambientales que casi no variaron, y considerando, de que las pendientes a los 10 minutos de operación representan un comportamiento casi lineal, tal como se muestra en la figura 5.2, al sustituir los valores en la ecuación 5.8 se obtiene:

Experimento No.1, mostrado en la gráfica de la figura 5.3.

$T_{\text{inicial}} = 23.97^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{max}} = 70.88^{\circ}\text{C}$, para $t=10$ minutos la pendiente de la tangente es $m=1.5830$ y el ángulo de la tangente $\alpha = 57.72^{\circ}$.

Experimento No.2, mostrado en la gráfica de la figura 5.4:

$T_{inicial} = 49.24^{\circ}\text{C}$, $T_{max} = 88.43^{\circ}\text{C}$, para $t=10$ minutos la pendiente de la tangente es $m=1.3225$ y el ángulo de la tangente $\alpha = 52.90^{\circ}$.



Después de que se obtuvieron los valores de las pendientes de las dos curvas a los 10 minutos, se aplicó una sencilla regla de tres para encontrar el incremento del ángulo por cada grado centígrado que se incrementa la temperatura.

$$\Delta T_{inicial} = 49.24 - 23.97 = 25.27$$

$$\Delta \text{ángulo} = 52.90 - 57.72 = -4.82$$

Entonces, para un incremento de un grado centígrado en la temperatura inicial, corresponde un incremento del ángulo de la pendiente de -0.1907 grados. El signo negativo nos indica que entre más se incrementa la temperatura ambiente el ángulo de la pendiente de la curva térmica tiende a disminuir.

5.3 Pronóstico de la temperatura final en el devanado del motor utilizando las pendientes de las curvas térmicas

El valor encontrado de -0.1907 grados se aplicó de la siguiente forma para pronosticar la temperatura final que se alcanzaría en el devanado a diferentes temperaturas iniciales, tomando como referencia las temperaturas registradas en el experimento número 1.

Pronóstico del comportamiento térmico del devanado del motor con una temperatura inicial de 26.21°C. Medición llevada a cabo el 28 de septiembre de 2006:

Los valores de referencia para los pronósticos de las temperaturas son:

Temperatura de referencia = Tref = 23.97°C.

Ángulo de la pendiente a los 10 minutos = 57.72 grados.

Factor de incremento en el ángulo de la pendiente = -0.1907 grados.

Tinicial = Ti = 26.21°C, en el devanado antes de arrancar el motor.

$$\Delta T = Ti - Tref = 26.21 - 23.97 = 2.24^\circ\text{C}$$

Si por cada grado centígrado de incremento en la temperatura inicial se incrementa -0.1907 grados en la pendiente, para 2.31°C se tiene un incremento de la pendiente de:

$$\Delta \alpha = (2.24)(-0.1907) = -0.4271 \text{ grados}$$

El ángulo de la pendiente de la nueva curva será:

Ángulo nuevo = ángulo de referencia + incremento $\Delta \alpha = 57.72 + (-0.4271) = 57.2929$ grados.

La nueva pendiente es:

$$\text{Nueva pendiente} = \tan 57.2929^\circ = 1.5572$$

Si de la ecuación 5.4 despejamos el valor de la T_{final} se tiene:

$$T_{\max} = T_i + \frac{\frac{dT}{dt}}{0.064e^{-0.064t}} \quad (5.9)$$

Sustituyendo los valores de:

$T_{inicial} = 26.21^\circ\text{C}$

$dT/dt = 1.5572$

$t = 10$ minutos

$$T_{\max} = 26.21 + \frac{1.5572}{0.064e^{-0.064(10)}}$$

el resultado es igual a :

$$T_{\max} = 72.35^{\circ}\text{C}$$



La
experimento de
temperatura me

En la
termopar 5, re
procedimiento

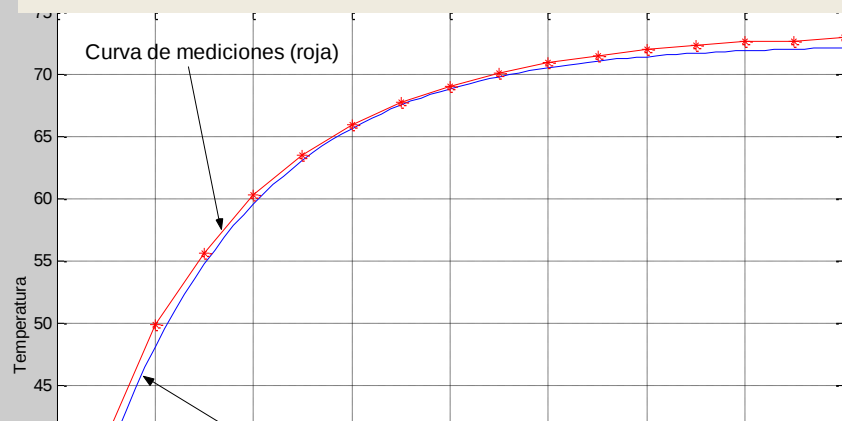


Figura 5.6 Comparación de las curvas medida y pronosticada del comportamiento térmico del devanado del motor.

Pronóstico del comportamiento térmico del devanado del motor con una temperatura inicial de 43.92°C. Medición llevada a cabo el 31 de mayo de 2006:

Temperatura inicial en el devanado = 43.92 °C.

Temperatura máxima **pronosticada** en el devanado = 84.57 °C.

Temperatura máxima **medida** en el devanado, termopar T5 = 84.71 °C.

Diferencia entre la temperatura medida y pronosticada = 0.14 °C.

En la figura 5.7 se muestran las mediciones registradas por los termopares colocados en el motor. La curva registrada por el termopar T5 se muestra en color verde claro, y alcanza a apreciarse algunas variaciones en las curvas debido a que el experimento se llevó a cabo en el exterior. Las pequeñas variaciones se debieron a ligeras y esporádicas rachas de viento que aumentaron la disipación del calor en la carcasa del motor.

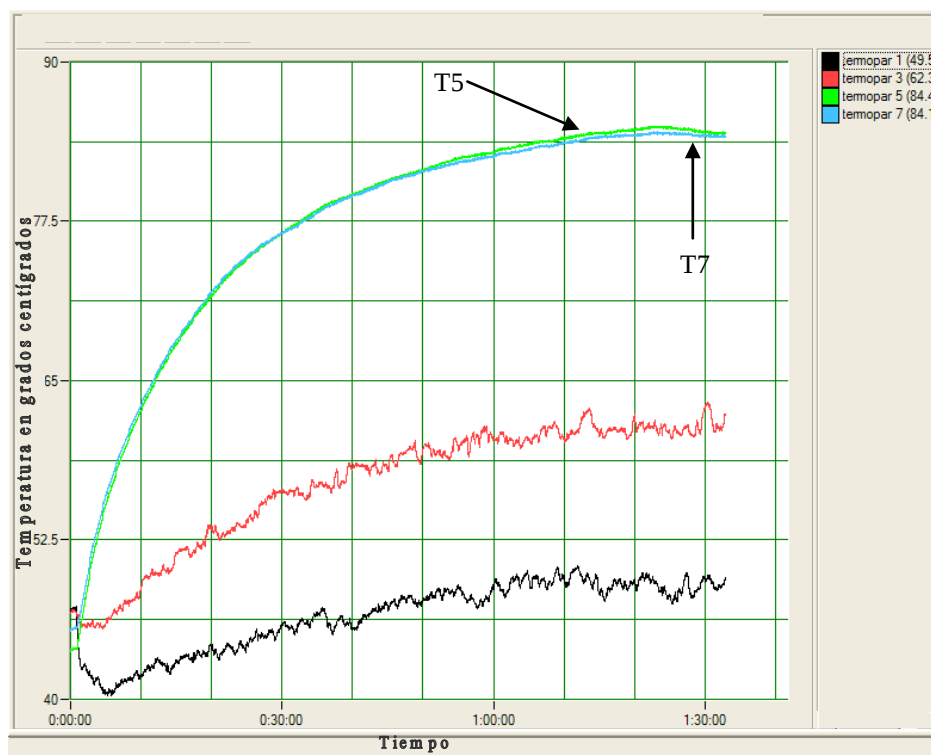


Figura 5.7 Gráfica de las mediciones llevadas a cabo el 31 de mayo de 2006 a la intemperie.

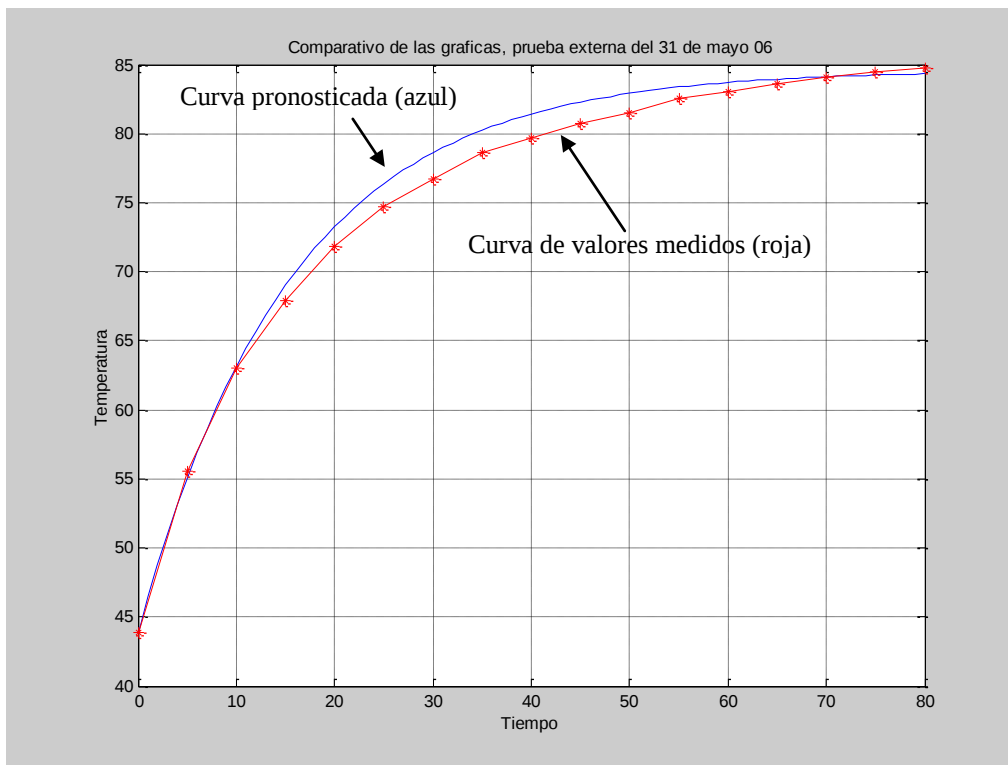


Figura
mayo

131 de

En la figura 5.8 se pueden apreciar las dos curvas. La separación entre las dos curvas desde los 20 a los 60 minutos, se debe a las esporádicas rachas de viento que aumentaron la disipación de calor en el motor, disminuyendo la temperatura registrada por el termopar T5 en el devanado del motor.

Prueba llevada a cabo en el laboratorio el 1° de noviembre de 2006:

Tinicial en el devanado = 21.75 °C.

Temperatura máxima **pronosticada** en el devanado = 69.45 °C.

Temperatura máxima **medida** en el devanado, termopar T5 = 69.94 °C.

Diferencia entre la temperatura medida y pronosticada = 0.49°C.

En la figura 5.9 se aprecian los comportamientos térmicos registrados por los termopares T5 y T7.

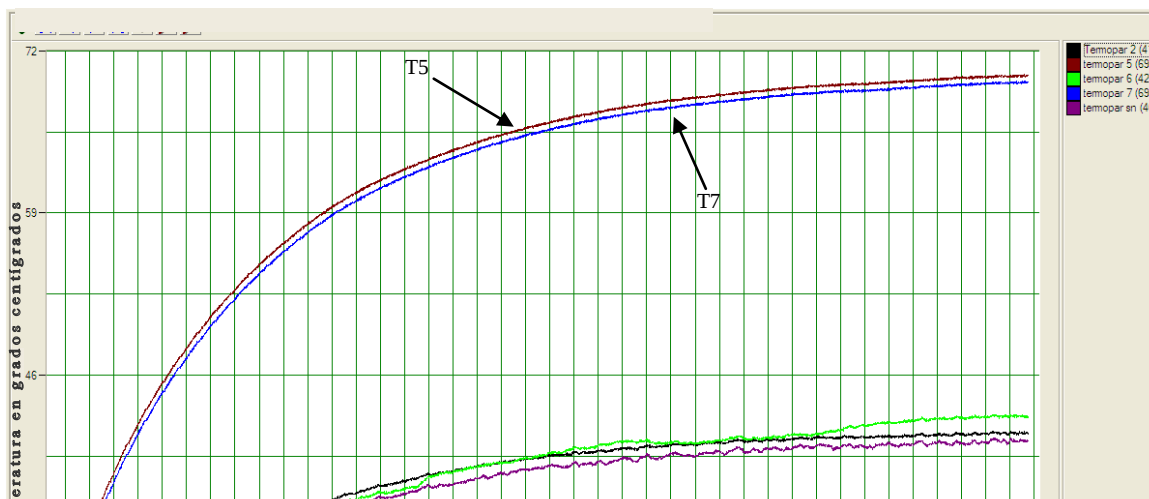


Figura 5.9 Gráfica de las temperaturas medidas en el devanado y la carcasa del motor el 1º. de noviembre de 2006.

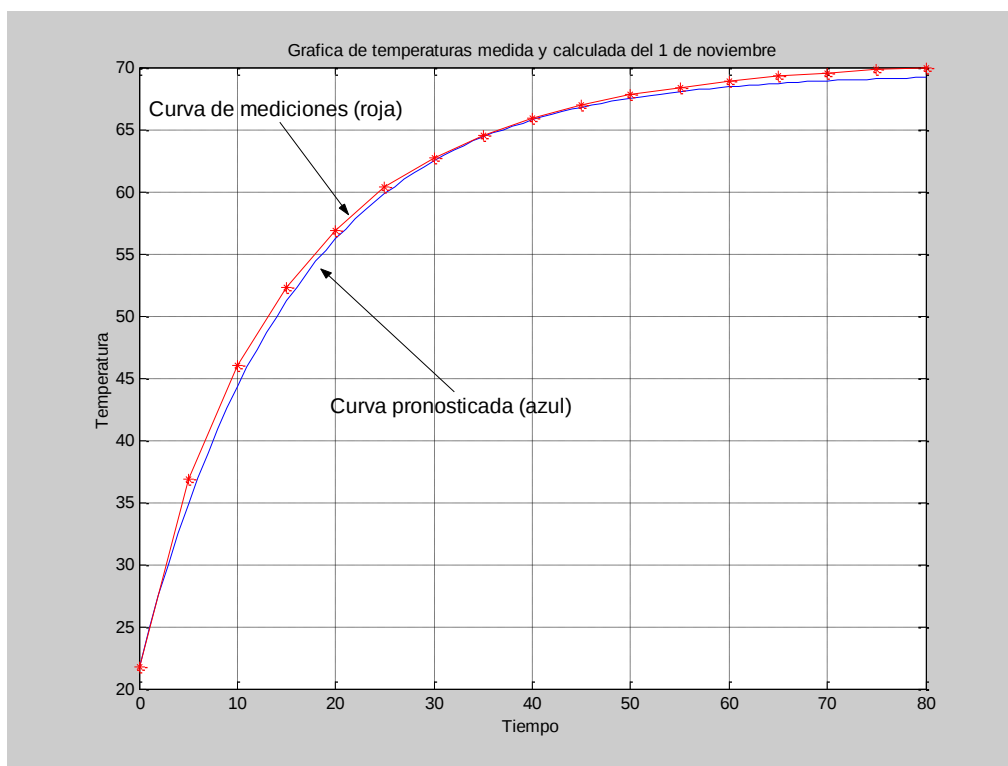


Fig
Pr
Tin

2006.

Temperatura máxima **pronosticada** en el devanado = 69.84 °C.

Temperatura máxima **medida** en el devanado, termopar T5 = 69.79 °C.

Diferencia entre la temperatura medida y pronosticada = 0.05 °C.

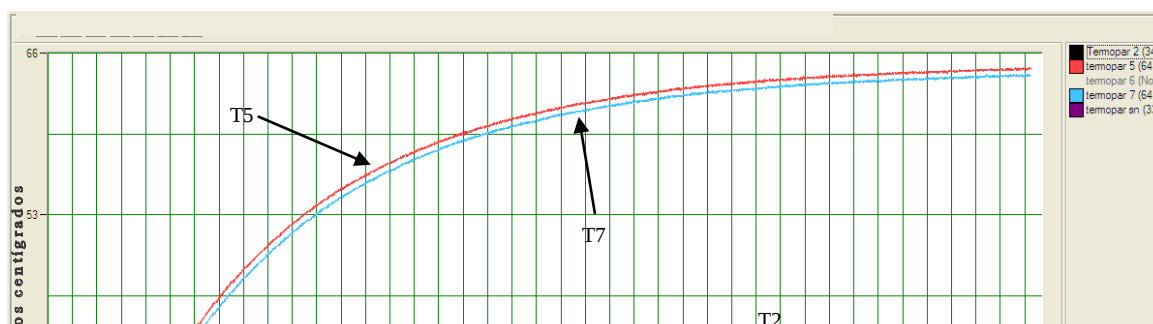
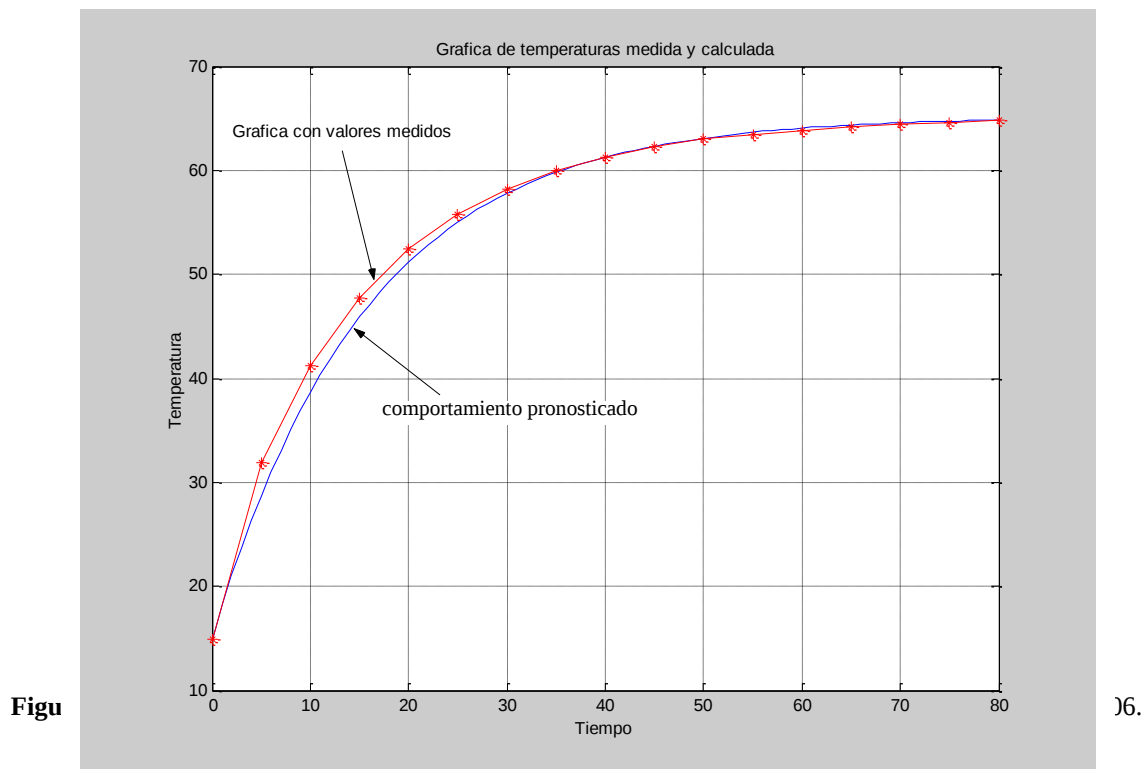


Figura 5.11 Gráfica de las mediciones llevadas a cabo el 5 de diciembre de 2006.

En la figura 5.11 se aprecian las mediciones llevadas a cabo en los embobinados y en la superficie del motor. Y en la figura 5.12 se muestra la comparación entre el comportamiento registrado por el termopar T5 y el comportamiento pronosticado.



Conclusiones y trabajos futuros

Uno de los factores importantes al operar de un motor eléctrico en condiciones temperatura ambiente elevada, es conocer la parte de la máquina donde más se eleva la temperatura. Para determinar el lugar donde más se eleva la temperatura en un motor eléctrico se puede utilizar una cámara infrarroja, pero este equipo solo muestra la temperatura superficial que se refleja en la parte exterior del motor, mas no proporciona una información de lo que está sucediendo en la parte interna de la máquina. Para tener una mejor información de lo que sucede internamente, es necesario colocar dispositivos que nos proporcionen una información más exacta de la elevación de la temperatura en las partes vitales del motor tal como los baleros, embobinados y núcleo magnético. Estos dispositivos pueden ser termopares, RTD's o termistores.

En el experimento descrito en la presente investigación se seleccionaron los termopares tipo T por ser elementos de bajo costo y que pueden registrar la temperatura con poco margen de error. Este tipo de termopar acoplado a un acondicionador de señal y una tarjeta de adquisición de datos registraron el comportamiento térmico del motor a distintas temperaturas ambiente, en condiciones ambientales con variaciones mínimas dentro del laboratorio y a la intemperie bajo condiciones ambientales variables.

Con el registro del comportamiento térmico de cada una de las partes se encontró que el punto donde más se elevó la temperatura fue en los devanados del motor. El correcto funcionamiento de estos embobinados depende del buen estado de los aislamientos, cuya vida depende de que el motor no rebase el nivel máximo de temperatura para el cual fue diseñado.

Al analizar las curvas del comportamiento térmico en el punto de mayor temperatura se demostró que estas curvas pueden modelarse con una sencilla ecuación, y que, además existe una relación entre las pendientes y la temperatura inicial en el devanado del motor. Con esta relación de pendientes y siguiendo el procedimiento mostrado en el capítulo 5 se pudo pronosticar el comportamiento térmico del embobinado del motor conociendo, únicamente, su temperatura inicial. Esta temperatura se puede conocer colocando un termómetro infrarrojo en la carcasa del motor, o mediante un termopar con montaje magnético o de goma, que se adhieren fácilmente a la superficie metálica del motor.

En el capítulo 5 donde se muestran los resultados de las mediciones llevadas a cabo. Se hace la observación del comportamiento térmico del núcleo cuando el motor opera en condiciones ambientales con variaciones mínimas y a la intemperie. Se nota claramente que la transferencia de calor, cuando el motor opera en el exterior, no es uniforme y la curva exponencial de su comportamiento térmico contiene variaciones de hasta 4°C en un minuto. Al no ser uniforme la transferencia de calor en el núcleo, la temperatura en el motor se incrementa considerablemente, ya que el calor no es transmitido en forma rápida hacia la superficie para ser disipado. .

Conocer la temperatura a la cual estará operando el motor al desarrollar su máxima potencia es importante, ya que si se rebasan los valores permitidos, los devanados pueden deteriorarse rápidamente, con el peligro de que las partes energizadas del motor hagan contacto con la carcasa provocando cortocircuitos que pueden dañar a la máquina eléctrica. Una forma de evitar lo anterior, es instalando los motores en lugares ventilados con sombra, y estar monitoreando en forma regular la temperatura ambiente del lugar, así como mantener limpia la superficie de la máquina y sus ductos de ventilación.

En trabajos futuros se investigará que tanto afecta a la eficiencia del motor el comportamiento variable de la temperatura en el núcleo magnético, y de que forma pueden disminuirse estas variaciones.

RESUMEN de la Tesis de Víctor Mata Brauer, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA. Mexicali, Baja California, México. Octubre de 2007.

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN DE JAULA DE
ARDILLA, TRIFÁSICO, TIPO TEFC, OPERANDO EN CONDICIONES DE TEMPERATURA
AMBIENTE ELEVADAS

Resumen aprobado por:

M.I. César Amaro Hernández
Director de Tesis

En este trabajo se presenta un motor de inducción de jaula de ardilla, tipo TEFC totalmente cerrado enfriado por ventilador, de $\frac{1}{4}$ de Hp, con voltaje de alimentación 220V a 60 Hz, al cual se le colocaron termopares tipo T en diversas partes tales como la carcasa, devanados, baleros y núcleo magnético, con el objeto de medir y graficar el comportamiento térmico a plena carga a temperaturas ambientes elevadas. La señal de los termopares se registró a través de un acondicionador de señal, una tarjeta y un programa de adquisición de datos. En las gráficas registradas del comportamiento térmico se encontró que el punto de mayor temperatura se encuentra en los embobinados del motor, y con esta información se procedió a analizar y modelar el comportamiento térmico en este punto. La ecuación que modela al comportamiento térmico incluye una constante de tiempo, cuyo valor se ajusta a los comportamientos registrados a diferentes temperaturas ambiente. Se determinó que existe una relación entre las pendientes del comportamiento térmico a los 10 minutos de operación y la temperatura inicial, lo que permitió conocer de antemano cual será la temperatura máxima que alcanzará el embobinado del motor cuando este opera a una temperatura ambiente de más de 40°C a plena carga, y con esto determinar si la elevación de temperatura puede dañar el embobinado del motor. De ser esto último se recomienda aumentar la ventilación en el lugar donde está instalado el motor o disminuir su carga.

Palabras clave: Motor de inducción de jaula de ardilla, comportamiento térmico, embobinado del motor, temperatura ambiente elevada, embobinado del motor.

ABSTRACT of the thesis, presented by Víctor Mata Brauer, in order to obtain the MASTER of ENGINEERING DEGREE in ELECTRIC ENGINEERING. Mexicali, Baja California, México. October 2007.

ANALYSIS OF THE THERMAL BEHAVIOR OF A SQUIRREL CAGE INDUCTION MOTOR,
TRIFASIC, TEFC TYPE, OPERATING ON HIGH ENVIRONMENTAL TEMPERATURE CONDITIONS

Approved by:

M.I. César Amaro Hernández
Thesis Advisor

In this thesis presents a squirrel cage induction motor, TEFC, Totally Enclosed Fan Cooled, of $\frac{1}{4}$ Hp, connected to 220V, 60 Hz, with thermocouples T type connected in several parts such as the cover, windings, bearings and the magnetic core, with the purpose of measure and graphic the thermal behaviour at full load on high environmental temperature. The signal of the thermocouples was captured through a signal conditioner, data acquisition card and software. In the diagrams of the thermal behaviour was establish that the point of higher temperature is in the motor windings, and with this information it was preceded to analyze and modelling the thermal behaviour in this point. The modelling equation of the thermal behaviour includes a time constant, which valour fits the thermal behaviour registered at different ambient temperatures. It was found that exist a connection between the slopes of the thermal behaviour at 10 minutes of operation and the initial temperature of the windings, this fact allow to know how would be the higher temperature in the motor windings when is operating at ambient temperature above 40 Celsius degrees at full load, and to establish if this high temperature could damage the motor windings. If the windings are in danger, it is good to increase the ventilation of the place where the motor is or to decrease the load in the motor shaft.

Keywords: squirrel cage induction motor, thermal behaviour, motor winding, high ambient temperature.

Referencias

- [1] NEMA Standards Publication. Information Guide for General Industrial AC Small and Medium Squirrel Cage Induction Motor Standards (MG1).
- [2] G. Enríquez Harper, "Pruebas y Mantenimiento a Equipos Eléctricos", Editorial Limusa.
- [3] D.Staton, A. Boglietti and A. Cavagnino, "Solving the More Difficult Aspects of Electric Motor Thermal Analysis in Small and Medium Size Industrial Induction Motors", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 20, No. 3, September 2005.
- [4] J. Trigeol, Y. Bertin & P. Lagonotte, "Thermal Modeling of an Induction Machine Through the Association of Two Numerical Approaches", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 21, No.2, June 2006.
- [5] S. Mezani, N. Takorabet and B. Laporte, "A Combined Electromagnetic and Thermal Analysis of Induction Motors", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 41, No.5, May 2005.
- [6] M. S. Rajagopal, K. N. Seetharamu and P. A.Ashwathanarayana, "Transient Thermal Analysis of Induction Motors", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.13, No.1, March 1998.

- [7] Z. Lazarevic, R. Radosavljevic and P. Osmokrovic, "A Novel Approach for Temperature Estimation in Squirrel-Cage Induction Motor Without Sensors", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 48, No. 3, June 1999.
- [8] R. Beguenane, M.E.H. Benbouzid, "Induction Motors Thermal Monitoring by Means of Rotor Resistance Identification", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 3, Sep. 1999.
- [9] M. Anibal Valenzuela, J. A. Tapia, J. A. Rooks, "Thermal Evaluation of TEFC Induction Motors Operating on Frequency-Controlled Variable-Speed Drives", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 40, No.2, March-April 2004.
- [10] A. L. Shenkman and M. Chertkov, "Experimental Method for Synthesis of Generalized Thermal Circuit of Polyphase Induction Motors", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 15, No. 3, September 2000.
- [11] A. Boglietti, A. Cavagnino, M. Lazzari and M. Pastorelli, "A Simplified Thermal Model for Variable Speed Self-Cooled Industrial Induction Motor", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 39, No. 4, July/August 2003.
- [12] M. A. Valenzuela, P.V. Verbakel, and J. A. Rooks "Thermal Evaluation for Applying TEFC Induction Motors on Short-Time and Intermittent Duty Cycles", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 39, No.1, January/February 2003.
- [13] M. J. Durán and J. Fernández, "Lumped Parameter Thermal Model for Induction Machines", Power Engineering Letters, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 19, No. 4, December 2004.
- [14] A. Boglietti, A. Cavagnino and D. A. Staton, "TEFC Induction Motors Thermal Analysis: A Parameter Sensitivity Analysis", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 41, No. 3, May/June 2005.
- [15] A. Siddique, G. S. Yadava and B. Singh, "A Review of Stator Fault Monitoring Techniques of Induction Motors", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 20, No. 1, March 2005.
- [16] S. Mezani, R. Ibtiouen, R. Kechroud and O. Touhami, "Finite Element Thermal Modeling of an Induction Motor", Electric Power Components and Systems, Algeria, October 2000.
- [17] A. Bousbaine, "Thermal Modelling of Induction Motors Based on Accurate Loss Distribution", Electric Machines and Power Systems, Feb. 1998.
- [18] D. Stanton, S. Pickering, D. Lampard, "Recent Advancement in the Thermal Design of Electric Motors, paper of SMMA 2001 Fall Technical Conference, October 2001.
- [19] E. R. Filho, "Automatic Three Phase Squirrel-Cage Induction Motor Test Assembly for Motor Thermal Behavior Studies". <http://www.ineer.org/Events/ICEE/Proceedings/paper334.htm>.
- [20] Y. A. Cengel, Transferencia de Calor, Editorial McGraw Hill, segunda edición.
- [21] J. A. Manrique Valadez, Transferencia de Calor, Editorial Oxford, segunda edición.
- [22] Leinhard IV J. H., Leinhard V J.H., "A Heat Transfer Text Book", Third Edition.
- [23] Omega, "The Temperature Handbook", volumen MM.
- [24] Figliola & Beasley, "Mediciones Mecánicas", Editorial Alfaomega, 3ª. Edición.
- [25] R. P. Areny, "Sensores y Acondicionadores de Señal", Editorial Alfaomega- Marcombo, 3ª. Edición.
- [26] A. V. Ivanov-Smolenski, Máquinas Eléctricas, Tomo I, Editorial Mir Moscu.

- [27] Motores Eléctricos, selección, mantenimiento y reparación, Tomo I, Editorial McGraw Hill.
- [28] I. L. Kosow, Máquinas Eléctricas y Transformadores, Editorial Prentice-Hall.
- [29] M. Liwshitz-Garik , C. C.Whipple, Máquinas de Corriente Alterna, Editorial CECSA.
- [30] D. G. Fink, H. W. Beaty, Manual de Ing. Eléctrica, Tomo II, Editorial McGraw-Hill.
- [31] Baldor Corporate, Manuales Técnicos.
- [32] DAQ NI 435x User Manual, National Instruments.