

# Deslizamiento y Respuesta Térmica en un Motor Trifásico de 1 HP Bajo Carga

## Mecánica Progresiva a 220 V

### *Slip and Thermal Response in a 1 HP Three-Phase Motor Under Progressive Mechanical Load at 220 V*

**Manuel David Rodríguez Santillán<sup>1</sup>, Rubén Darío Tirira Chulde<sup>2</sup>, Alexis Geovanny Taco Cabrera<sup>3</sup>, Jefferson David Palate Limaico<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> Instituto Superior Universitario Sucre, Quito, Pichincha, Ecuador, [mrodriguez@tecnologicosucre.edu.ec](mailto:mrodriguez@tecnologicosucre.edu.ec)

<sup>2</sup> Instituto Superior Universitario Sucre, Quito, Pichincha, Ecuador, [dtirira@tecnologicosucre.edu.ec](mailto:dtirira@tecnologicosucre.edu.ec)

<sup>3</sup> Instituto Superior Universitario Sucre, Quito, Pichincha, Ecuador, [ataco@tecnologicosucre.edu.ec](mailto:ataco@tecnologicosucre.edu.ec)

<sup>4</sup> Instituto Superior Universitario Sucre, Quito, Pichincha, Ecuador, [pilacuan.karen.alegria@gmail.com](mailto:pilacuan.karen.alegria@gmail.com)

DOI: <https://doi.org/10.61236/wa0vty13>

*Recibido: 18 de septiembre de 2025 • Revisión aceptada: 27 de julio de 2026.*

## Resumen

En el presente trabajo se estudió el deslizamiento y la respuesta térmica de un motor de inducción trifásico de 1 hp, 12 derivaciones, operado a 220 V, sometido a un programa progresivo de carga mecánica. El ensayo experimental se diseñó en cinco etapas, desde la condición en vacío hasta una operación cercana a la corriente nominal, con una duración por etapa de 120 min y un registro cada 10 min de la velocidad de giro y temperatura superficial de carcasa. Con la velocidad medida se calculó el deslizamiento, y la temperatura de carcasa se usó como indicador de la evolución térmica del motor. Los resultados demostraron que, a medida que aumentaba la carga aplicada, se producía un incremento progresivo de la corriente media, una disminución de la velocidad de giro, un aumento del deslizamiento y una elevación sostenida de la temperatura. En el intervalo experimental analizado, el deslizamiento permitió diferenciar con mayor claridad las condiciones de operación que la velocidad media considerada de forma aislada, mientras que la temperatura presentó una respuesta progresiva y acumulativa dependiente del nivel de carga y del tiempo de exposición. Los resultados, en conjunto, evidenciaron una correspondencia consistente entre la modificación del estado mecánico del motor y su evolución térmica, lo que confirma la utilidad del análisis conjunto de ambas magnitudes para la caracterización operativa de motores trifásicos de inducción bajo carga progresiva.

**Palabras claves:** Máquinas eléctricas; motores de inducción trifásicos; deslizamiento; transferencia de calor; régimen térmico.

## Abstract

*This study examined the slip and thermal response of a 1 hp, 12-lead, three-phase induction motor operated at 220 V and subjected to a progressive mechanical loading program. The experimental test was designed in five stages, ranging from no-load operation to operation near the rated current, with each stage lasting 120 min and rotational speed and surface temperature of the motor housing recorded every 10 min. Slip was calculated from the measured speed, while housing temperature was used as an indicator of the motor's thermal evolution. The results showed that, as the applied load increased, the average current progressively increased, rotational speed decreased, slip increased, and temperature rose steadily. Within the experimental range analyzed, slip allowed the operating conditions to be distinguished more clearly than average speed considered in isolation, whereas temperature exhibited a progressive and cumulative response dependent on load level and exposure time. Overall, the results showed a consistent relationship between changes in the motor's mechanical operating state and its thermal evolution, confirming the usefulness of jointly analyzing both variables for the operational characterization of three-phase induction motors under progressive loading.*

**Keywords:** *Electrical machines; three-phase induction motors; slip; heat transfer; thermal regime.*

## 1. INTRODUCCIÓN

Las máquinas de inducción trifásicas constituyen uno de los sistemas de conversión electromecánica de energía más utilizados en el ámbito industrial, debido a su robustez, facilidad de mantenimiento y capacidad para accionar cargas mecánicas de distinta naturaleza [1], [2]. Su aplicación en sistemas de bombeo, ventilación, transporte, compresión y accionamiento general confirma su importancia en la operación de instalaciones industriales [3], [4], [5]. Aunque su principio de funcionamiento y sus configuraciones constructivas han sido ampliamente desarrollados, el análisis de su comportamiento en servicio sigue siendo técnicamente relevante, en especial cuando se busca establecer la relación entre las condiciones de carga y las variables que describen su estado de funcionamiento [2], [4], [6]. En este contexto, la experimentación con motores trifásicos de baja potencia resulta pertinente, ya que permite evaluar, en condiciones controladas, la progresión de su respuesta ante incrementos sucesivos de carga mecánica [7], [8], [9].

El deslizamiento es un parámetro de interés en los motores de inducción trifásicos, ya que representa la diferencia entre la velocidad sincrónica del campo electromagnético giratorio y la velocidad mecánica real del rotor, lo que permite interpretar cambios en la condición de operación del motor a medida que se incrementa la carga mecánica [3], [10], [11]. Sin embargo, por sí solo no permite

evaluar la eficiencia del equipo, ya que dicha evaluación requiere variables adicionales y métodos específicos para determinar las pérdidas [6], [12]. Por esta razón, el análisis del deslizamiento adquiere mayor valor cuando se considera junto con la respuesta térmica del motor, debido a que la elevación de temperatura es una manifestación del régimen de pérdidas y de las condiciones de disipación térmica durante la operación [2], [4]. De esta forma, la evaluación conjunta de ambas magnitudes permite describir con mayor consistencia la respuesta del motor ante condiciones progresivamente más exigentes de trabajo [3], [8], [12].

Se han desarrollado numerosos estudios sobre el comportamiento térmico de los motores eléctricos mediante modelos numéricos, simulaciones de transferencia de calor y otras técnicas de análisis que han permitido establecer una base teórica sólida [1], [4], [8]. No obstante, continúan siendo necesarios estudios experimentales que contrasten la respuesta real de la máquina bajo condiciones específicas de operación [6], [7], [10]. Varios trabajos han demostrado que la carga y la velocidad influyen directamente en la temperatura del motor, lo que confirma que la respuesta térmica forma parte del comportamiento global de la máquina y no de un fenómeno aislado [5], [12], [13]. En este marco, resulta pertinente desarrollar un análisis experimental centrado en el deslizamiento y la respuesta térmica, con el fin de estudiar cómo los cambios en la carga mecánica aplicada afectan

simultáneamente a la velocidad y a la temperatura [6], [12]. Desde este punto de vista, el estudio conjunto de ambas magnitudes en un motor trifásico de pequeña potencia proporciona una base técnica útil para interpretar su desempeño en condiciones reales de operación [6], [11], [14].

El presente trabajo estudia el deslizamiento y la respuesta térmica de un motor trifásico de inducción de 12 terminales, conectado en delta paralelo y sometido a un programa de carga mecánica creciente. Para ello, se estableció una condición inicial en vacío y etapas sucesivas de carga hasta alcanzar una condición cercana a la corriente nominal, registrando la velocidad de giro y la temperatura superficial de la carcasa durante cada ensayo [14], [15], [16]. El propósito del análisis es determinar cómo la variación de la carga mecánica se refleja simultáneamente en el deslizamiento y en la evolución térmica del motor. De este modo, el trabajo proporciona evidencia experimental útil para interpretar el funcionamiento de un motor trifásico de potencia reducida bajo condiciones de carga controlada y voltaje constante.

## 2. METODOLOGÍA

El estudio se realizó mediante un diseño experimental orientado a evaluar el deslizamiento y la respuesta térmica de un motor trifásico de 1 hp bajo carga mecánica progresiva. El procedimiento consideró la descripción técnica del motor utilizado, la definición de las condiciones de

alimentación, la aplicación controlada de la carga mecánica y el registro temporal de las variables de interés durante cada ensayo. Esta organización metodológica permitió establecer un esquema de análisis consistente para examinar la evolución del comportamiento mecánico y térmico del motor en condiciones controladas de operación.

### 2.1. Datos nominales del motor de ensayo

Los datos nominales del motor empleado en el estudio se obtuvieron directamente de la placa del fabricante y se utilizaron como referencia técnica para definir las condiciones de operación del equipo durante el desarrollo experimental. Debido a que los valores de tensión y corriente nominal varían según la configuración de conexión, esta información se presenta de forma independiente en la Tabla 1. Los parámetros generales del motor, que no dependen de la conexión seleccionada, se resumen en la Tabla 2.

*Tabla 1. Tensiones y corrientes nominales del motor según la configuración de conexión.*

| Configuración de conexión | Tensión nominal | Corriente nominal |
|---------------------------|-----------------|-------------------|
| $\Delta\Delta$            | 220 V           | 3,02 A            |
| YY                        | 380 V           | 1,75 A            |
| $\Delta$                  | 440 V           | 1,51 A            |

Como se observa en la Tabla 1, la placa del motor establece distintos valores nominales de tensión y corriente en función de la configuración de conexión. Esta información resulta necesaria para identificar la condición eléctrica correspondiente a la operación del equipo y, en particular, para ubicar

el punto nominal asociado al funcionamiento a 220 V considerado en el presente estudio.

La Tabla 2 resume las características nominales generales del motor de ensayo. Estos parámetros completan la descripción técnica del equipo utilizado y definen el marco de referencia para la interpretación de los resultados obtenidos en las etapas experimentales.

Tabla 2. Parámetros nominales generales del motor de ensayo.

| Parámetro                | Valor           |
|--------------------------|-----------------|
| Potencia nominal         | 0,75 kW / 1 hp  |
| Frecuencia nominal       | 60 Hz           |
| Velocidad nominal        | 1751 rpm        |
| Factor de potencia       | 0,81            |
| Factor de servicio       | 1,15            |
| Carcasa                  | 90S             |
| Clase de aislamiento     | F               |
| Elevación de temperatura | 80 K            |
| Grado de protección      | IP55            |
| Temperatura ambiente     | 40 °C           |
| Altitud máxima           | 1000 m s. n. m. |
| Régimen de servicio      | S1              |
| Eficiencia               | IE2 80,5 %      |
| Número de terminales     | 12              |

## 2.2. Condiciones de alimentación y conexión del motor

Los ensayos se realizaron en un laboratorio con alimentación de 127 V fase-neutro y frecuencia de 60 Hz. Bajo estas condiciones, el motor operó a 220 V de línea, de acuerdo con la condición nominal

definida para el desarrollo experimental. Para esta tensión de trabajo, el motor fue conectado en delta paralelo, conforme a la disposición correspondiente a baja tensión. Con el propósito de mantener condiciones comparables entre las distintas pruebas, todas las mediciones se efectuaron en un horario similar durante el desarrollo de los ensayos.

## 2.3. Aplicación de la carga mecánica progresiva

La carga mecánica se aplicó mediante un sistema de acople por fricción dispuesto sobre el eje del motor. A través de este mecanismo, la fuerza de contacto se incrementó gradualmente hasta alcanzar una condición de corriente objetivo para cada etapa de ensayo. Bajo este criterio, la carga no se determinó a partir de una medición directa de par mecánico, sino mediante el ajuste progresivo del sistema de fricción en función de la respuesta eléctrica del motor durante la operación.

A partir de este esquema, se definieron cinco etapas de operación. La primera correspondió a la condición en vacío, mientras que las cuatro restantes se establecieron como niveles sucesivos de carga mecánica, tomando como referencias corrientes medias objetivo crecientes hasta aproximarse a la corriente nominal del motor. Esta organización permitió disponer de una secuencia experimental ordenada para analizar la evolución del comportamiento del equipo desde una condición sin carga externa hasta un régimen cercano al nominal.

Como se muestra en la Tabla 3, la progresión de las condiciones de ensayo se estableció a partir de corrientes medias objetivo de 2,18 A, 2,46 A, 2,74 A y 2,97 A, manteniendo como referencia final una condición próxima al valor nominal de 3,02 A a 220 V. Esta organización permitió diferenciar los niveles de carga aplicados y establecer una base comparativa para el desarrollo de las etapas experimentales.

Tabla 3. Etapas de aplicación de la carga mecánica progresiva.

| Etapas | Condición de operación | Corriente media objetivo |
|--------|------------------------|--------------------------|
| 1      | Vacío                  | Sin carga externa        |
| 2      | Nivel de carga 1       | 2,18 A                   |
| 3      | Nivel de carga 2       | 2,46 A                   |
| 4      | Nivel de carga 3       | 2,74 A                   |
| 5      | Nivel de carga 4       | 2,97 A                   |

#### 2.4. Procedimiento de medición y registro de datos

En cada etapa de ensayo, el motor operó durante 120 min bajo la condición de carga correspondiente. Durante este intervalo se registraron, cada 10 min, la velocidad de giro del eje y la temperatura superficial de la carcasa. La velocidad se utilizó para calcular el deslizamiento en cada punto de medición, mientras que la temperatura de carcasa se empleó como indicador de la evolución térmica del motor durante el tiempo de exposición.

El registro temporal de ambas variables permitió comparar la respuesta del motor entre etapas y

observar la progresión del comportamiento mecánico y térmico bajo carga creciente. Para el análisis posterior se consideraron los valores medios, los rangos de variación y los indicadores de dispersión de las variables medidas, con el fin de describir la respuesta del motor durante cada condición experimental.

#### 2.5. Cálculo del deslizamiento

El deslizamiento se calculó a partir de la velocidad sincrónica del motor y de la velocidad mecánica medida en el eje durante cada intervalo de ensayo, como se indica en la Ecuación (1).

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (1)$$

La velocidad sincrónica se determinó en función de la frecuencia de alimentación y del número de polos, de acuerdo con la Ecuación (2).

$$n_s = \frac{120f}{p} \quad (2)$$

Para las condiciones de estudio se adoptó una velocidad sincrónica de 1800 rpm, correspondiente a un motor de 4 polos operando a 60 Hz. Con la velocidad registrada en cada medición se obtuvo el deslizamiento correspondiente a cada etapa de operación.

### 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 3.1. Comportamiento eléctrico y mecánico del motor

Para sintetizar el comportamiento eléctrico y mecánico del motor se consideraron el voltaje de línea (VL), la corriente trifásica media (Im), la

desviación estándar de la corriente ( $\sigma_I$ ), la velocidad media de giro ( $n_m$ ), el rango de velocidad ( $R_n$ ) y el deslizamiento medio ( $s_m$ ). La Tabla 4 presenta los estadísticos descriptivos de estas variables para las cinco etapas de ensayo. Los valores medios se obtuvieron a partir de los registros temporales de cada etapa, mientras que las medidas de dispersión se incorporaron para describir la amplitud de variación del régimen operativo bajo cada nivel de carga. Aunque la progresión experimental se definió a partir de corrientes objetivo, los valores consignados en la tabla corresponden a las corrientes medias efectivamente registradas durante cada ensayo. La condición nominal de referencia para 220 V se mantuvo en 3,02 A, y el deslizamiento se calculó respecto de una velocidad sincrónica de 1800 rpm.

Tabla 4. Estadísticos descriptivos de las variables eléctricas y mecánicas por etapa.

| Etapas | $V_L$ (V) | $I_m$ (A) | $\sigma_I$ (A) | $n_m$ (rpm) | $R_n$ (rpm) | $s_m$ (%) |
|--------|-----------|-----------|----------------|-------------|-------------|-----------|
| 1      | 221,08    | 1,93      | 0,019          | 1791,80     | 4           | 0,46      |
| 2      | 221,11    | 2,22      | 0,031          | 1777,90     | 9           | 1,23      |
| 3      | 221,10    | 2,51      | 0,039          | 1767,50     | 10          | 1,81      |
| 4      | 221,12    | 2,79      | 0,045          | 1755,20     | 11          | 2,49      |
| 5      | 221,09    | 3,01      | 0,041          | 1736,70     | 14          | 3,52      |

Los resultados de la Tabla 4 muestran que  $V_L$  permaneció prácticamente constante durante todo el programa experimental, con valores medios comprendidos entre 221,08 V y 221,12 V. En contraste,  $I_m$  aumentó progresivamente desde 1,93 A en la etapa 1 hasta 3,01 A en la etapa 5, lo que

confirma la transición desde una condición inicial de baja exigencia mecánica hacia una operación próxima a la corriente nominal. De manera simultánea,  $n_m$  disminuyó de 1791,8 rpm a 1736,7 rpm y, en consecuencia,  $s_m$  aumentó de 0,46 % a 3,52 %. En conjunto, esta evolución indica que el incremento de carga produjo una modificación mecánica consistente del régimen de operación, expresada en la reducción progresiva de la velocidad y en el aumento sostenido del deslizamiento.

Además,  $R_n$  aumentó de forma constante entre la primera y la quinta fase, pasando de 4 rpm a 14 rpm. Este resultado indica que la amplitud de variación de velocidad también creció a medida que se incrementó la carga aplicada. En términos relativos, la corriente trifásica media entre la etapa 1 y la etapa 5 se incrementó aproximadamente un 55,90 %, mientras que la velocidad media descendió alrededor de un 3,1 %. La reducción absoluta de  $n_m$  fue moderada, pero su efecto sobre  $s_m$  resultó más sensible debido a la cercanía entre la velocidad mecánica y la velocidad sincrónica considerada en el análisis. En consecuencia, el deslizamiento permitió diferenciar con mayor claridad las condiciones de carga que la velocidad media considerada de forma aislada, dentro del intervalo experimental evaluado.

Para complementar la Tabla 4, la Figura 1 muestra una comparación normalizada de la corriente trifásica media ( $I_m$ ), la velocidad media de giro ( $n_m$ ) y el deslizamiento medio ( $s_m$ ) a través de las cinco

etapas de ensayo. Esta representación se escogió con el fin de comparar en una base común, la magnitud relativa del cambio sufrido por cada variable cuando el motor pasa desde la condición inicial a una operación cercana a la corriente nominal.

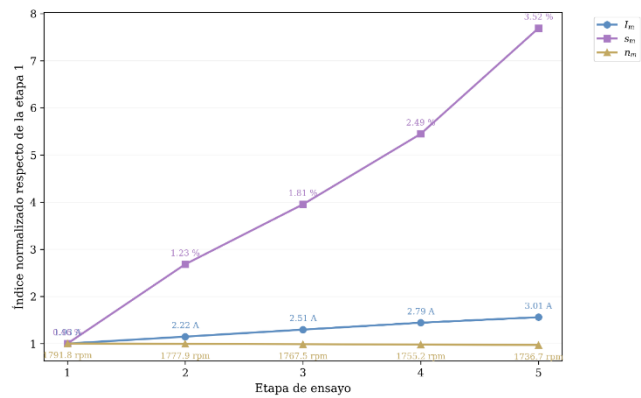


Figura 1. Comparación normalizada de  $I_m$ ,  $n_m$  y  $s_m$  por etapa de ensayo.

En la Figura 1 puede observarse que  $I_m$  y  $s_m$  fueron aumentando progresivamente de una etapa a otra, mientras que  $n_m$  mostró una disminución más moderada en términos relativos. Al expresarlas sobre una misma base de comparación se advierte con mayor claridad que el deslizamiento fue la variable más sensible al cambio de régimen dentro del intervalo experimental evaluado, mientras que la velocidad media, aunque disminuyó de forma sostenida, presentó una variación proporcional menor. En este sentido la figura refuerza que la evolución del estado mecánico del motor se manifestó con mayor nitidez a través de  $s_m$  que mediante  $n_m$  considerada de manera aislada.

3.2. Respuesta térmica del motor bajo carga progresiva

Las Para examinar la respuesta térmica del motor se consideraron la temperatura inicial de carcasa ( $T_i$ ), la temperatura final de carcasa ( $T_f$ ), la temperatura media ( $T_m$ ), la desviación estándar de la temperatura ( $\sigma_T$ ), el coeficiente de variación de la temperatura ( $CV_T$ ) y el incremento térmico ( $\Delta T$ ). La Tabla 5 presenta los estadísticos descriptivos de estas variables en las cinco etapas de ensayo. En este conjunto,  $T_m$  se empleó como medida representativa del nivel térmico alcanzado en cada condición, mientras que  $T_f$  y  $\Delta T$  permitieron identificar tanto la magnitud térmica al cierre del ensayo como el aumento acumulado de temperatura durante los 120 min de operación.

Tabla 5. Estadísticos descriptivos de la temperatura de carcasa por etapa de ensayo.

| Etapas | $T_i$ (°C) | $T_f$ (°C) | $T_m$ (°C) | $\sigma_T$ (°C) | $CV_T$ (%) | $\Delta T$ (°C) |
|--------|------------|------------|------------|-----------------|------------|-----------------|
| 1      | 20,10      | 31,80      | 27,70      | 3,89            | 14,06      | 11,70           |
| 2      | 20,00      | 38,00      | 30,80      | 5,86            | 19,01      | 18,00           |
| 3      | 20,30      | 43,90      | 33,60      | 7,60            | 22,64      | 23,60           |
| 4      | 20,40      | 49,50      | 36,50      | 9,55            | 26,18      | 29,10           |
| 5      | 20,60      | 54,40      | 39,10      | 11,20           | 28,65      | 33,80           |

Fuente. Elaboración propia a partir de los registros de temperatura de carcasa en cada etapa de ensayo.

La Tabla 5 muestra una evolución térmica creciente entre etapas.  $T_f$  aumentó desde 31,80 °C en la etapa 1 hasta 54,40 °C en la etapa 5, mientras que  $T_m$  se incrementó de 27,70 °C a 39,10 °C. Del mismo modo,  $\Delta T$  pasó de 11,70 °C a 33,80 °C, lo que indica que la elevación térmica del motor fue progresivamente mayor conforme la operación se

aproximó a la condición nominal. La dispersión térmica también presentó una tendencia ascendente, ya que  $\sigma_T$  aumentó de 3,89 °C a 11,20 °C y  $CV_T$  de 14,06 % a 28,65 %. Estos resultados, tomados en conjunto, indican que los períodos de mayor carga no sólo alcanzaron temperaturas más elevadas, sino que además presentaron un comportamiento térmico más disperso a lo largo del tiempo de ensayo.

Tf se incrementó 22,6 °C entre la etapa inicial y la etapa final, y  $\Delta T$  fue aproximadamente 2,89 veces mayor en la etapa 5 que en la etapa 1. Esta progresión confirma que la respuesta térmica del motor no se mantuvo homogénea entre condiciones de ensayo, sino que se incrementó de forma sistemática con el incremento de carga. A diferencia de una variable instantáneamente sensible al cambio de régimen, la temperatura describió una respuesta de carácter acumulativo, propia de un fenómeno dependiente tanto del nivel de carga como del tiempo de exposición en cada etapa.

En la Figura 2 se muestra la evolución de la temperatura de carcasa con el tiempo en las cinco etapas de ensayo. A diferencia de la síntesis estadística que se muestra en la Tabla 5, esta representación permite ver directamente la trayectoria de calentamiento seguida por el motor durante los 120 min de operación en cada condición de carga.

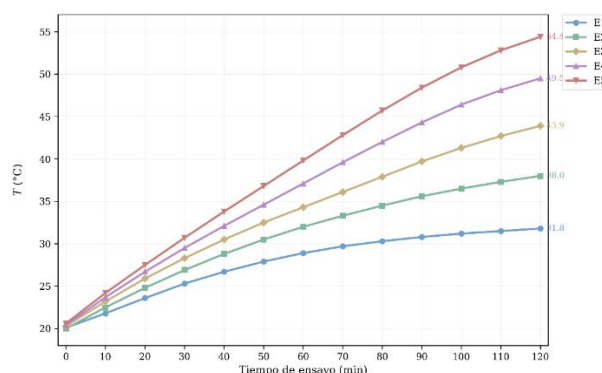


Figura 2. Evolución temporal de la temperatura de carcasa por etapa de ensayo.

En la Figura 2 puede observarse que en todos los estadios la respuesta térmica mantuvo una tendencia ascendente, con unas trayectorias que se van separando progresivamente a medida que va aumentando la carga aplicada. Esta disposición indica que la diferencia entre condiciones no se presentó solamente en la temperatura final alcanzada, sino también en la rapidez y magnitud con que el calentamiento se acumuló durante el ensayo. Así, la figura confirma que la intensificación térmica estuvo asociada de forma conjunta al nivel de carga y al tiempo de exposición bajo cada condición de operación. Con el fin de integrar los registros térmicos obtenidos en las cinco etapas, se construyó un mapa de calor con la temperatura de carcasa medida en cada intervalo de tiempo.

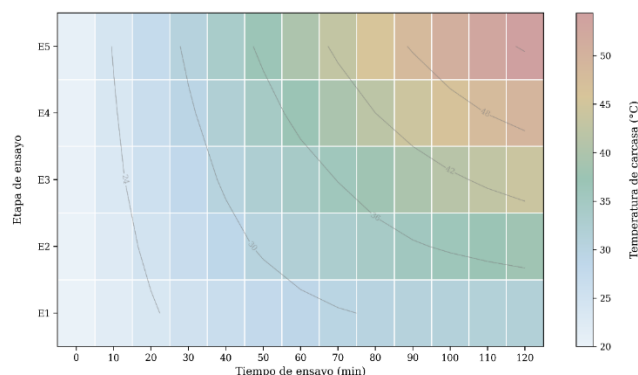


Figura 3. Mapa de calor de la temperatura de carcasa por tiempo y etapa de ensayo.

En la Figura 3 puede observarse una intensificación progresiva de la temperatura tanto en el eje temporal como en el eje de etapas, con una concentración de valores más elevados en las condiciones de mayor carga y en los intervalos finales del ensayo. Esta distribución confirma que el calentamiento del motor no sólo dependió del transcurso del tiempo sino también del nivel de exigencia mecánica aplicada en cada condición. En este sentido, la figura completa la lectura secuencial de la Figura 2 al proporcionar una síntesis visual inmediata del comportamiento térmico acumulado.

### 3.3. Relación entre deslizamiento y temperatura

La comparación entre las Tablas 4 y 5 permite identificar una evolución concurrente entre el comportamiento mecánico y la respuesta térmica del motor. A medida que  $I_m$  aumentó entre etapas,  $n_m$  disminuyó y  $s_m$  se elevó de 0,46 % a 3,52 %. En paralelo,  $T_f$  pasó de 31,80 °C a 54,40 °C, mientras que  $T_m$  aumentó de 27,70 °C a 39,10 °C. En conjunto, esta progresión indica que el aumento de

carga estuvo acompañado simultáneamente por una mayor separación respecto de la velocidad sincrónica y por una elevación sostenida de la temperatura superficial del motor.

En términos relativos el deslizamiento medio de la etapa 5 fue aproximadamente 7,65 veces mayor que el de la etapa 1, mientras que el incremento térmico fue 2,89 veces mayor. Esa diferencia demuestra que, en el rango experimental estudiado, el deslizamiento reaccionó con mayor sensibilidad relativa al cambio entre etapas, en tanto que la temperatura presentó una respuesta más gradual y acumulativa. Ambas variables, sin embargo, compartieron una tendencia ascendente común durante el programa de carga creciente, lo cual confirma una relación constante entre la variación del estado mecánico del motor y su comportamiento térmico.

Para expresar directamente la relación entre la respuesta mecánica y el comportamiento térmico del motor, se construyó una dispersión con los registros instantáneos de deslizamiento y temperatura de carcasa obtenidos en las cinco etapas de ensayo. Esta representación permite ver la trayectoria seguida por cada condición de operación a medida que el calentamiento del motor va avanzando bajo distintos niveles de carga.

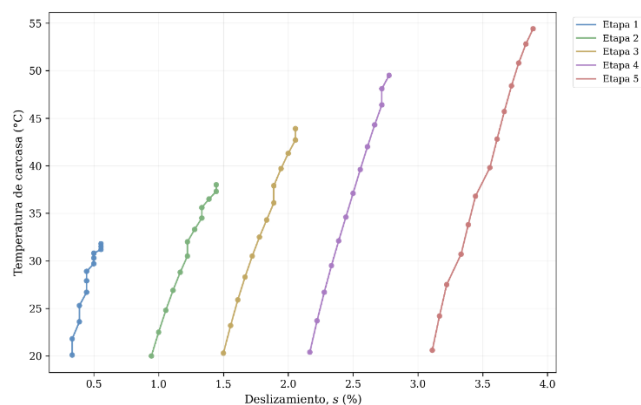


Figura 4. Relación entre el deslizamiento y la temperatura de carcasa.

En todas las etapas evaluadas, la Figura 4 muestra una tendencia ascendente entre el deslizamiento y la temperatura de carcasa. Conforme el motor fue avanzando a condiciones de mayor carga las trayectorias se fueron desplazando a zonas de mayor deslizamiento y temperatura manteniendo un orden entre etapas. Esta distribución muestra que la alteración del estado mecánico del motor se acompañó de un incremento progresivo en su respuesta térmica, no sólo al comparar valores medios entre condiciones, sino también al considerar la evolución temporal de los registros dentro de cada ensayo.

## 4. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos muestran que el incremento progresivo de la carga mecánica modificó de forma simultánea el comportamiento eléctrico, mecánico y térmico del motor ensayado. En términos generales, la operación bajo condiciones de mayor exigencia estuvo acompañada por una reducción de la velocidad de giro, un aumento del deslizamiento y una elevación

sostenida de la temperatura de carcasa, mientras la alimentación se mantuvo prácticamente constante entre etapas. A partir de estos hallazgos, esta sección interpreta el significado de dichas variaciones y la relación que conservan entre sí dentro del intervalo experimental evaluado.

### 4.1. Comportamiento del deslizamiento frente al incremento de carga

El deslizamiento aumentó de forma progresiva entre etapas, lo cual es una respuesta esperable en un motor de inducción sometido a mayor exigencia mecánica, ya que la producción de par requiere una diferencia más amplia entre la velocidad del campo giratorio y la velocidad real del rotor. Desde este punto de vista, la caída de la velocidad media observada en los ensayos no debe entenderse únicamente como una disminución absoluta de rpm, sino como la expresión de un cambio en el equilibrio electromecánico del motor. En este sentido, el deslizamiento permitió captar de forma más sensible el cambio de régimen que la velocidad considerada de forma aislada, ya que pequeñas variaciones de rpm adquieren mayor significado cuando se expresan en relación con la velocidad sincrónica.

Esta sensibilidad relativa permitió distinguir con mayor claridad la transición desde la condición inicial hasta una operación cercana a la corriente nominal dentro del intervalo evaluado. Esto es relevante porque, en motores de baja potencia cuya velocidad nominal se encuentra próxima a la sincrónica, observar solo la velocidad puede hacer

que las diferencias entre etapas parezcan moderadas, mientras que el deslizamiento muestra con mayor nitidez el ajuste mecánico requerido para sostener la carga aplicada. Por tanto, su empleo en este estudio permitió describir la variación del régimen operativo y disponer de un indicador adecuado para relacionar el comportamiento mecánico con la respuesta térmica posterior.

#### **4.2. Evolución térmica del motor bajo carga mecánica progresiva**

La respuesta térmica observada a lo largo de los ensayos es consistente con un régimen de operación en el que la mayor exigencia mecánica se asocia con un incremento sostenido de las pérdidas propias del funcionamiento del motor y, por tanto, con una mayor acumulación de calor en la carcasa. En este contexto, el incremento de temperatura no debe interpretarse como una variación instantánea, sino como la manifestación progresiva de un fenómeno que depende del tiempo de exposición bajo cada condición de carga. Esta característica explica que la separación térmica, aunque las diferencias mecánicas entre etapas se expresaron desde el inicio de cada ensayo, haya tendido a hacerse más evidente conforme transcurrió el tiempo de operación.

La temperatura de carcasa mostró un comportamiento más acumulativo que el deslizamiento, lo que resulta coherente con la inercia térmica propia de una máquina rotativa en operación. De allí que el incremento térmico

registrado entre etapas no solo evidencie que la carga aplicada fue mayor, sino también que el efecto de esa carga se mantuvo durante un intervalo suficiente para modificar de manera apreciable el estado térmico del motor. De este modo, la temperatura superficial puede considerarse una variable útil para valorar la evolución del régimen de operación, siempre que su lectura se interprete en función del tiempo de ensayo y no únicamente como un valor puntual aislado.

Asimismo, la separación progresiva de las trayectorias térmicas sugiere que el aumento de carga no produjo solamente una elevación final de temperatura, sino también una modificación en la forma en que el calentamiento se desarrolló durante cada etapa. Este aspecto es relevante dentro de la discusión, ya que indica que la respuesta térmica del motor no dependió únicamente de la condición final alcanzada, sino también del modo en que se acumuló la energía térmica bajo cada nivel de exigencia. Sin embargo, esta interpretación debe mantenerse dentro del marco experimental adoptado, ya que el análisis se basó en la temperatura superficial de la carcasa y no en una determinación directa de la temperatura interna de los devanados.

#### **4.3. Relación entre respuesta mecánica y respuesta térmica**

La relación observada entre el deslizamiento y la temperatura de carcasa permite interpretar que ambas variables respondieron de forma concurrente al incremento progresivo de la carga

mecánica, aunque con distinta sensibilidad temporal. Mientras el deslizamiento reflejó de manera más inmediata la modificación del régimen de operación, la temperatura expresó una respuesta más gradual, condicionada por la acumulación de calor durante el ensayo. Esta diferencia no implica una desvinculación entre ambas magnitudes, sino que evidencia que describen dimensiones distintas de un mismo proceso de funcionamiento bajo carga.

Bajo esta perspectiva, el aumento del deslizamiento puede entenderse como una manifestación del ajuste electromecánico requerido para sostener niveles crecientes de carga, mientras que la elevación térmica representa el efecto acumulado de operar bajo esas condiciones durante un tiempo determinado. Por ello, la correspondencia identificada entre ambas variables no debe leerse únicamente como una coincidencia de tendencias, sino como una relación operativa en la que el estado mecánico del motor y su respuesta térmica evolucionan de forma asociada dentro del intervalo experimental evaluado.

Al mismo tiempo, la diferencia en la forma de respuesta de ambas magnitudes ayuda a explicar por qué el deslizamiento resultó más sensible para discriminar el cambio entre etapas, mientras que la temperatura ofreció una lectura más adecuada del efecto acumulado de la carga sobre el motor. En ese sentido, el análisis conjunto de ambas variables aporta una interpretación más completa que la obtenida mediante cada una por separado, ya que

permite reconocer tanto la modificación inmediata del régimen de operación como la evolución térmica que acompaña dicho cambio.

## 5. CONCLUSIONES

- Bajo las condiciones experimentales estudiadas, el incremento progresivo de la carga mecánica generó una modificación simultánea del estado operativo del motor, expresada en el aumento de la corriente de operación, la reducción de la velocidad de giro, el incremento del deslizamiento y la elevación de la temperatura de carcasa. Esta respuesta integrada confirma que, en motores trifásicos de baja potencia, la transición hacia condiciones próximas al régimen nominal puede identificarse con mayor claridad cuando el análisis combina variables mecánicas y térmicas.
- El deslizamiento fue la magnitud más sensible para discriminar el cambio de régimen entre etapas de carga, por encima de la velocidad media considerada de forma aislada. Este resultado tiene valor metodológico, pues muestra que pequeñas reducciones de velocidad adquieren mayor significado técnico cuando se interpretan respecto de la velocidad sincrónica, lo que hace del deslizamiento un indicador adecuado para el análisis operativo de motores de inducción sometidos a carga mecánica creciente.

- La respuesta térmica del motor fue progresiva y acumulativa, y dependió no solo del nivel de carga aplicado, sino también del tiempo de exposición bajo cada condición de ensayo. La temperatura de carcasa permitió identificar la intensificación del régimen térmico conforme aumentó la exigencia mecánica, evidenciando que la evaluación temporal del calentamiento aporta información complementaria para interpretar el comportamiento real del motor en servicio.
- El análisis conjunto del deslizamiento y de la temperatura de carcasa permitió establecer una relación experimental consistente entre la modificación del estado mecánico y la evolución térmica del motor. El aporte principal del estudio es mostrar, a partir de ensayos controlados y registros temporales directos, que ambas magnitudes pueden evaluarse como variables complementarias para caracterizar el comportamiento de motores trifásicos de inducción bajo carga progresiva.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Stephen J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals*, 5th ed. McGraw-Hill, 2012.
- [2] A. S. Maliuk, Z. Ahmad, and J. M. Kim, "A Technique for Bearing Fault Diagnosis Using Novel Wavelet Packet Transform-Based Signal Representation and Informative Factor LDA," *Machines*, vol. 11, no. 12, Dec. 2023, doi: 10.3390/machines11121080.
- [3] A. E. . Fitzgerald, Charles. Kingsley, and S. D. . Umans, *Electric machinery*. McGraw-Hill, 2003.
- [4] G. K. Balakrishnan et al., "A Review of Infrared Thermography for Condition-Based Monitoring in Electrical Energy: Applications and Recommendations," Aug. 01, 2022, MDPI. doi: 10.3390/en15166000.
- [5] A. K. Goel and V. N. A. Naikan, "Exploring the Diagnostic Potential of Infrared Thermography for Experimental Assessment of Cavitation and Air Entrainment-induced Faults in Centrifugal Pumps," *Journal of Applied Fluid Mechanics*, vol. 17, no. 2, pp. 352–369, 2024, doi: 10.47176/jafm.17.02.2118.
- [6] S. Roldan, D. Sanchez-Londono, and G. Barbieri, "Thermographic indicators for the state assessment of rolling bearings," in *IFAC-PapersOnLine*, Elsevier B.V., 2021, pp. 1218–1223. doi: 10.1016/j.ifacol.2021.08.208.
- [7] V. I. Vlachou et al., "Intelligent Fault Diagnosis of Ball Bearing Induction Motors for Predictive Maintenance Industrial Applications," *Machines*, vol. 13, no. 10, Oct. 2025, doi: 10.3390/machines13100902.
- [8] J. I. Z. Chen and C. S. Pi, "Assessment for Different Neural Networks with FeatureSelection in Classification Issue," *Sensors*, vol. 22, no. 8, Apr. 2022, doi: 10.3390/s22083099.
- [9] C. Yang, S. Zhang, Y. Wang, H. Qiu, and H. Zhao, "Inter-turn short-circuit fault diagnosis of high-voltage line-start permanent magnet synchronous motor based on improved wavelet packet energy analysis," *Archives of Electrical Engineering*, vol. 74, no. 4, pp. 885–898, 2025, doi: 10.24425/ae.2025.155961.
- [10] T. Raj Chelliah, N. Kumar, and S. Srivastava, *Dynamic Performance Improvement of Induction Motor Under Energy Optimal Control*.
- [11] I. Ghlib, Y. Messlem, and Z. Chedjara, "An Improved Sensorless Control of Induction

- Motor Using ADALINE: Theory and Experiment,” *Journal Europeen des Systemes Automatises*, vol. 55, no. 2, pp. 221–227, Apr. 2022, doi: 10.18280/jesa.550209.
- [12] J. A. Malagoli, J. H. I. Ferreira, J. R. Camacho, and M. V. Ferreira da Luz, “Optimal volume and slip of a three phase induction motor using differential evolution,” *Renewable Energy and Power Quality Journal*, vol. 1, no. 13, pp. 391–395, Apr. 2015, doi: 10.24084/repqj13.336.
- [13] R. N. Toma and J. M. Kim, “Article bearing fault classification of induction motors using discrete wavelet transform and ensemble machine learning algorithms,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 10, no. 15, Aug. 2020, doi: 10.3390/APP10155251.
- [14] H. Ashfaq, M. Saood, and M. S. J. Asghar, “A new formulation for minimum input volt-ampere (VA)-slip relationship of three-phase induction motors,” *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, vol. 29, no. 3, pp. 253–256, Jul. 2017, doi: 10.1016/j.jksues.2015.10.002.
- [15] Austin Hughes, *Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications*, 3th ed. Newnes, 2006.
- [16] T. Wildi, “Instructor’s Manual to accompany Electrical Machines, Drives and Power Systems Sixth Edition.”