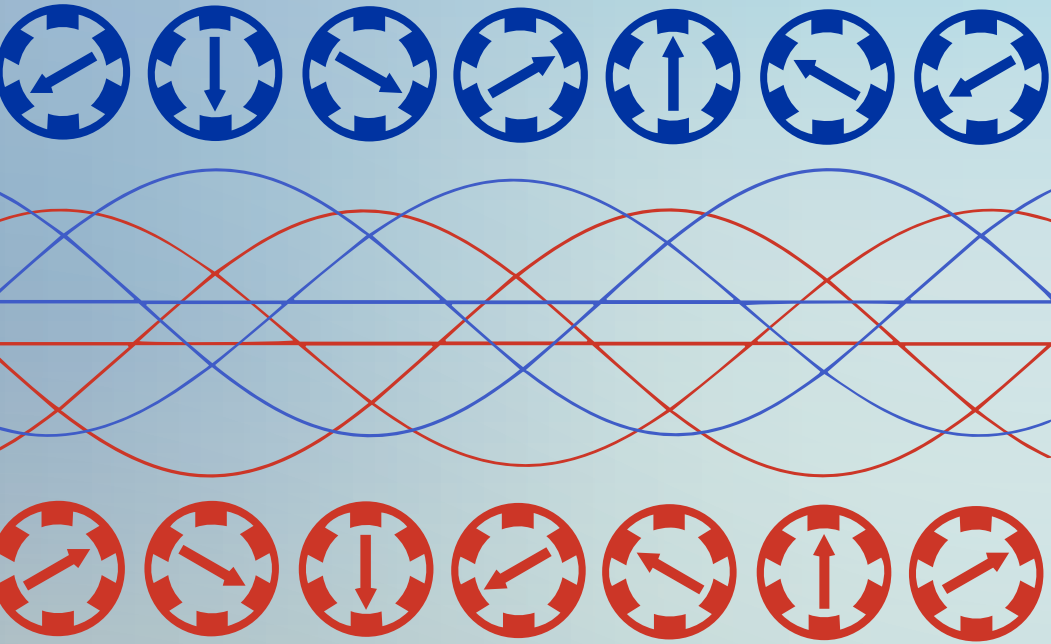




UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



Análisis

del desempeño de
motores de inducción
trifásicos

Rito Javier Rodríguez Lozoya
Rubén Vásquez León

Análisis del desempeño de motores de inducción trifásicos

C O L E C C I Ó N

HÉCTOR MERINO RODRÍGUEZ

Guías y manuales de enseñanza de ingeniería

Guillermo Narváez Osorio

Rector

Dora María Frías Márquez

*Directora de la División Académica de
Ingeniería y Arquitectura*

Análisis del desempeño de motores de inducción trifásicos

Rito Javier Rodríguez Lozoya
Rubén Vásquez León



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

♦
"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"

Primera edición, 2025

© Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

www.ujat.mx



Para su publicación esta obra ha sido dictaminada por el sistema académico de “doble ciego”. Los juicios expresados son responsabilidad del autor o autores. El contenido de esta obra no podrá utilizarse para entrenar modelos de Inteligencia Artificial sin el consentimiento expreso de sus autores (o herederos) y de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

ISBN:

Diseño de portada: Jazmín Zapata de la Cruz

Edición: Índigo Estudio Creativo

Corrección: Índigo Estudio Creativo

Hecho en Villahermosa, Tabasco, México

Prefacio

¿Por qué escribimos este libro?

Este libro es producto de la experiencia de los autores, quienes tuvimos la fortuna de ejercer profesionalmente tanto en la industria como en el ámbito académico. Al elaborarlo hemos querido ofrecer explicaciones bien sustentadas al comportamiento del motor eléctrico de inducción el cual, sin ninguna duda, es el convertidor de energía que más se utiliza en la industria moderna. Por eso, la comprensión de los principios que lo hacen funcionar y de las peculiaridades de su funcionamiento desde el punto de vista práctico es indispensable para el ingeniero mecánico electricista.

Ofrecemos aquí un recorrido teórico-práctico breve, que sin embargo no omite ninguno de los aspectos relevantes. Se analiza el comportamiento del motor de inducción y cómo cambia su desempeño ante las variaciones de voltaje, las variaciones de carga, el mejoramiento de su eficiencia y el efecto de mejorar su factor de potencia.

Los dos últimos temas rara vez son considerados en los textos clásicos y nuestro libro recopila y sintetiza las anotaciones y sugerencias que se encuentran dispersas en la literatura técnica de los principales fabricantes de motores del mundo a las que hemos accedido a través de varios años de experiencia profesional.

Como ejemplo se toma un motor de inducción de 50 HP (37.3 KW) en dos versiones de aplicación cotidiana: el motor estándar y el motor de alta eficiencia y se realiza un análisis comparativo entre las dos máquinas. Para soportar el análisis se recurre a la simulación digital, con el software MatLAB/Simulink™ de manera que se visualiza el comportamiento de ambas máquinas cuando se modifican sus principales parámetros y cuando cambian las condiciones de trabajo.



Estructura de la obra

En el primer capítulo presentamos un panorama general del motor de inducción, en el que se destacan las ventajas que el motor de inducción tiene sobre otros motores y las razones que justifican que sea motor más utilizado. Por supuesto, se describen su diseño y construcción conocimiento que, posteriormente, nos permite comprender mejor las modificaciones que los fabricantes están realizando para lograr un motor eficiente.

Después se discute la teoría del motor de inducción, es decir, los aspectos eléctricos y mecánicos que se presentan en el rotor y estator que son determinantes en su funcionamiento. Los principios fundamentales incluyen los modelos matemáticos que explican la generación del campo magnético giratorio y el recorrido lógico que nos permite modelar el motor con un circuito equivalente para cada fase del motor, conocimiento básico para profundizar en el análisis.

Una vez obtenido el circuito equivalente se pasa a la descripción de la relación entre los parámetros electromagnéticos (variables de entrada) y los parámetros mecánicos (variables de salida). Al finalizar el primer tema, con los datos generales del motor propuesto se realiza un ejercicio para determinar mediante cálculos y simulaciones sus parámetros internos y posteriormente determinar su corriente de carga, velocidad, deslizamiento, potencias de entrada y salida y su eficiencia. Esta información se toma como referencia para la interpretación de los resultados de los análisis que se realizan después, mismos que nos permiten hacer comparaciones objetivas entre un motor de diseño convencional (estándar) y otro, diseñado para alta eficiencia (premium).

En el segundo capítulo se revisa cómo los voltajes aplicados afectan al motor. Al haber una proporción directa entre el voltaje aplicado y la velocidad desarrollada, el punto de partida es determinar la regulación de velocidad. Para hacerlo, se definen la velocidad eléctrica y la velocidad mecánica y se determina así, uno de los principales parámetros que condicionan el buen funcionamiento del motor de inducción.



El tercer capítulo es una compilación ponderada de las diferentes técnicas para determinar la eficiencia. La ponderación se fundamenta tanto en el análisis de los tipos de pérdidas de energía en la máquina, como en lo que conocemos acerca de los materiales y técnicas de manufactura que han desarrollado los fabricantes de motores de inducción para mejorar su desempeño y sustentabilidad.

El cuarto capítulo está dedicado al análisis de la compensación de reactivos a un motor de inducción. Dado que el motor de inducción es una máquina con alta potencia reactiva; cuando se conecta a una fuente de energía eléctrica, los reactivos que requiere el motor son parte de la carga del sistema eléctrico y, por su naturaleza inductiva, producen un factor de potencia atrasado y, por ende, un incremento en las pérdidas de energía. Estas pérdidas de potencia se traducen eventualmente en costos de operación que se pueden reducir si se compensa la potencia reactiva mediante la instalación de dispositivos externos.

Los análisis propuestos en el texto tienen como objetivo comparar, mediante la simulación, los conceptos teóricos, tanto magnéticos como eléctricos que se relacionan con el funcionamiento y la operación del motor de inducción en la inteligencia de que debe haber buena coincidencia entre los resultados de la experimentación virtual con las predicciones de la teoría.

La mayoría de las tablas y gráficas de esta obra son originales. En los casos en que no es así, se citan las referencias y se otorgan los créditos correspondientes.

Todas las simulaciones realizadas por los autores se hicieron en el modelo implementado con el diagrama de bloques de Simulink™ que aparece en la Figura 1.19 del Capítulo 1 y con los datos de placa que allí se mencionan.



Contenido

Conceptos Básicos de los Motores trifásicos de Inducción

1.1 Introducción	1
1.2 Construcción	2
1.3 Producción del campo magnético giratorio	5
1.4 La corriente en el motor de inducción	9
1.5 El deslizamiento	12
1.5.1 Relación de la frecuencia en función del deslizamiento	13
1.6 El circuito equivalente del motor de inducción	14
1.7 Relaciones de potencia en el motor de inducción	15
1.7.1 Potencia en el entrehierro	17
1.7.2 Potencia de salida	18
1.8 Análisis de las pérdidas en el motor de inducción	18
1.8.1 Pérdidas variables	19
1.8.2 Pérdidas fijas	19
1.8.3 Pérdidas en el núcleo	20
1.8.4 Pérdidas por fricción y ventilación	22
1.8.5 Pérdidas diversas	22
1.9 El par en el motor de inducción	24
1.9.1 Par inducido	24

1.9.2 Par de arranque.....	25
1.9.3 Par de salida	26
1.10 Característica par-velocidad del motor de inducción.....	29
1.11 Efecto de la resistencia y la reactancia del rotor en el funcionamiento del motor con rotor tipo jaula.....	31
1.12 Cálculo de los parámetros del motor de inducción.....	33
1.12.1 Cálculo de los parámetros del motor a mediante el análisis del circuito equivalente.....	34
Resumen.....	39
Referencias.....	40

Efectos del voltaje en el motor de inducción

2.1 La regulación de velocidad	43
2.2 Regulación de voltaje con sobrecarga	48
2.3 Voltajes balanceados por encima o por debajo de su voltaje nominal	49
2.4 Efecto de la variación del voltaje en el deslizamiento	61
2.5 El motor de inducción con voltajes desbalanceados	61
Resumen.....	71
Referencias.....	72

La eficiencia en el motor de inducción

3.1 Introducción.....	75
-----------------------	----

3.1 Análisis gráfico de la eficiencia en el motor de inducción	79
3.2 La eficiencia y la velocidad	80
3.3 La eficiencia y el par	81
3.4 La eficiencia en un motor con sobrecarga	82
3.5 Eficiencia y deslizamiento	83
3.6 La eficiencia y el factor de potencia	84
3.7 La corriente en el motor eficiente	85
3.8 Las pérdidas en el motor eficiente	87
Resumen	89
Referencias	90

Compensación de reactivos en el motor de inducción

4.1 Importancia de la compensación	93
4.2. Teoría de la compensación de reactivos	94
4.3 Técnicas de la compensación de reactivos	96
4.4 Simulación de la compensación de reactivos	100
Resumen	106
Referencias	1



Capítulo I

Conceptos Básicos de los Motores trifásicos de Inducción

1.1 Introducción

Como motor, la máquina de inducción o asíncrona es el dispositivo electromecánico mayormente utilizado en la industria, esto es debido a su construcción sencilla y robusta, bajo costo de operación, fácil mantenimiento y versatilidad.

Actualmente se fabrican motores de inducción capaces de operar en cualquier tipo de ambiente, es decir, a prueba de agua, a prueba de polvo, en ambientes corrosivos, etc. Sus ventajas significativas se basan en que son motores para trabajar con cualquier tipo de carga con índices de falla muy pequeños, son de velocidad prácticamente constante, en bajas potencias pueden tener arranques frecuentes y trabajar con sobrecargas ligeras.

Las desventajas más comentadas son:

- Tienen una alta corriente de arranque
- Su velocidad es difícil de controlar
- En motores convencionales, su eficiencia varía entre un 80 a 90 %

Por trabajar bajo el principio de inducción, producen una potencia reactiva que no produce trabajo útil, por esto, debido a su amplio uso en la industria, se han diseñado nuevos materiales y técnicas para diseñar motores de alta eficiencia y diferentes métodos mediante dispositivos de estado sólido para mejorar

su desempeño, variando su rango de velocidad y limitando su corriente durante el arranque.

Trabajando como generador, la máquina de inducción se ha utilizado en la generación eólica, una fuente de energía alternativa que tiene muchas áreas de oportunidad en México y el mundo. En este documento se trata de la máquina trabajando solo como motor y haciendo énfasis en su operación en estado estacionario.



Figura 1.1 Corte de un motor de inducción. [1]

1.2 Construcción

El motor de inducción tiene dos partes principales: su rotor y su estator. Existen dos tipos de rotores:

- ▶ Rotor tipo jaula de ardilla
- ▶ Rotor devanado.

El rotor jaula de ardilla es el más comúnmente utilizado, su fabricación es sencilla ya que las bobinas no están aisladas del núcleo, estas bobinas son en forma de barras de cobre o aluminio que son vaciadas en las ranuras del rotor y tienen un anillo que las cortocircuita en los extremos para formar lo que parece una

jaula de ardilla. El núcleo del rotor está compuesto de láminas de hierro apiladas y aisladas entre sí para reducir el efecto de las corrientes parásitas. Como se muestra en la Figura 1.2, las bobinas del rotor no son paralelas al eje, sino se construyen con cierta inclinación, esto se hace para reducir el ruido o zumbido que hace el rotor al girar.

Existen diferentes tipos de rotores del tipo jaula, los hay de jaula sencilla, de bobinas en ranuras superficiales, de bobinas en ranuras profundas y combinados, también conocidos como de “doble jaula”; estos diseños se hacen con el fin de tener un motor tipo jaula que pueda variar el par interno del motor.

El rotor devanado tiene como principal característica tres anillos deslizantes donde confluyen las bobinas del rotor, esta da la opción de poder conectar por medio de carbones un circuito de resistencias externas para incrementar la resistencia por fase en el rotor, con el fin de modificar las características del par producido internamente.

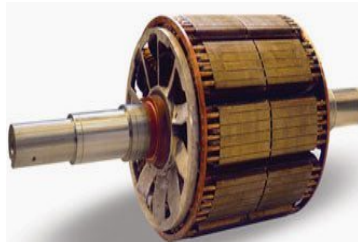


Figura 1.2 Rotor tipo jaula de ardilla. [2]



Figura 1.3 Rotor devanado de un motor de inducción. [1]

La función del rotor es recibir el flujo magnético (inducción electromagnética), y girar a la velocidad del campo magnético giratorio que se produce en el estator.

Al devanado del rotor se le llama inducido, porque en él se inducen corrientes que luego propician el campo magnético en el rotor el cual se confronta con el campo magnético del estator, propiciando que el rotor gire siguiendo al campo del estator.

El estator, la parte del motor que no gira, contiene tres bobinas que se alimenta con voltajes trifásicos alternos. Cuando circula la corriente por las bobinas, se induce un campo magnético giratorio en el entrehierro que hace girar al rotor. La velocidad de sincronismo del campo magnético rotatorio depende de la frecuencia de las corrientes inducidas y del número de polos en el estator. Al igual que el rotor, el núcleo del estator está construido de delgadas láminas de acero eléctrico apiladas y aisladas entre sí para reducir la circulación de corrientes parásitas. Las bobinas se instalan en las ranuras del cuerpo del estator.

El espacio libre entre el rotor y el estator se llama entrehierro de aire o entrehierro, que es el lugar donde se realiza la conversión electromagnética y electromecánica. Por ejemplo, las corrientes que circulan en las bobinas del rotor crean una fuerza electromotriz que se opone al campo magnético producido en el estator, creándose un campo magnético resultante en el entrehierro de la máquina.

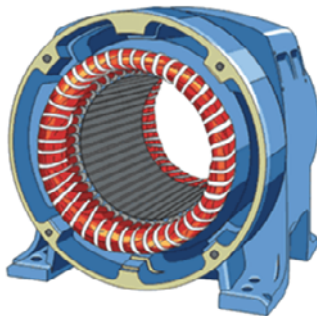


Figura 1.4 Estator de un motor de inducción. [3]

1.3 Producción del campo magnético giratorio

En términos coloquiales, el teorema de Ferrari para un motor de inducción se puede enunciar como:

“Cuando un devanado polifásico, formado por tres fases idénticas, tales que entre dos fases consecutivas hay una separación en el espacio de $2\pi/3$ radianes eléctricos, es alimentado por un sistema polifásico de tres corrientes equilibradas desfasadas en el tiempo $2\pi/3$ radianes, se genera en el entrehierro una fuerza magnetomotriz que gira a velocidad constante y cuyo valor máximo es $3/2$ veces el valor máximo en el espacio y en el tiempo de la fuerza magnetomotriz generada por una actuando aisladamente”. [4]

Para esto, el estator de un motor de inducción tiene sus tres bobinas A , B y C con devanados distribuidos separadas 120° entre sí que son alimentadas por una fuente trifásica con voltajes de fase constantes, tal como se muestra en la Figura 1.5.

En cada posición debe haber un flujo magnético resultante de la suma de los tres flujos de fase, tomando ϕ_m la magnitud de cada fase, y analizando los flujos en los puntos 1, 2 y 3 de la Figura 1.5, se obtiene:

Punto 1. $\phi_A = 0$, $\phi_B = -0.866\phi_m$, $\phi_C = 0.866\phi_m$, ángulo entre ϕ_B y $\phi_C = 60^\circ$.

Punto 2. $\phi_A = 0.866\phi_m$, $\phi_B = 0$, $\phi_C = -0.866\phi_m$, ángulo entre ϕ_A y $\phi_C = 60^\circ$.

Punto 3. $\phi_A = -0.866\phi_m$, $\phi_B = 0.866\phi_m$, $\phi_C = 0$, ángulo entre ϕ_A y $\phi_B = 60^\circ$.

Aplicando la ley de los cosenos para encontrar el flujo resultante en el punto 1:

$$\begin{aligned}\phi_R &= \sqrt{\phi_B^2 + \phi_C^2 - 2\phi_B\phi_C \cos\theta} = \sqrt{\left(-\frac{\sqrt{3}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)^2 - 2\left(-\frac{\sqrt{3}}{2}\right)\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)\cos 60^\circ} \\ \phi_R &= \sqrt{\frac{3}{4} + \frac{3}{4} + \frac{3}{2} \cdot \frac{2}{4}} = \sqrt{\frac{9}{4}} = \frac{3}{2}\end{aligned}$$

Es decir, $\phi_R = 1.5 \phi_m$, en cualquier punto.

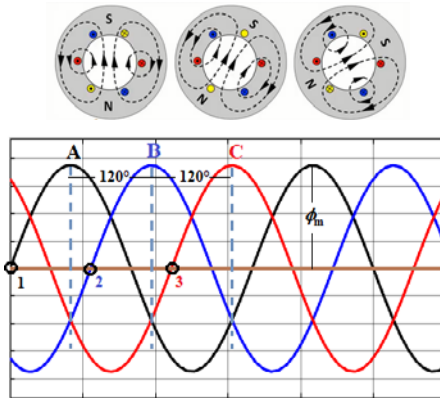


Figura 1.5 Flujos magnéticos generados en el estator por efecto del voltaje aplicado. [5]

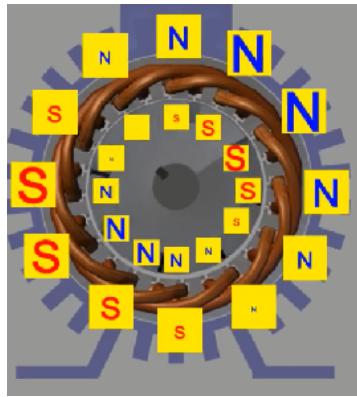


Figura 1.6 Campos magnéticos del estator y del rotor, opuestos en todo momento por efecto del voltaje trifásico aplicado al estator. [6]

Otra forma de concluir este resultado es observando las densidades de flujo en cada fase, para encontrar la densidad de flujo resultante, tomando como referencia la Figura 1.6. En el estator se producen tres corrientes balanceadas que se suponen en secuencia positiva, determinadas por (en amperes, A):

$$\begin{aligned} i_a &= I_{\max} \cos \omega t \text{ A} \\ i_b &= I_{\max} \cos (\omega t - 120^\circ - \theta) \text{ A} \\ i_c &= I_{\max} \cos (\omega t + 120^\circ - \theta) \text{ A} \end{aligned} \quad (1.1)$$

Estas tres corrientes producen una fuerza magnetomotriz (FMM) en el entrehierro de la máquina que gira con una velocidad angular ω , este vector de magnetización se produce 90° desfasado de cada una de las corrientes fluyendo en cada bobina, tal como se muestra en la Figura 1.7. De tal modo que el campo magnético resultante es la suma fasorial de los tres campos individuales, es decir:

$$B_{\text{total}} = B_{aa'} + B_{bb'} + B_{cc'} \quad (1.2)$$

Donde, en unidades de campo magnético (teslas, T):

$$B_{aa'} = B_m \sin \omega t \angle 0^\circ \text{ T}$$

$$B_{bb'} = B_m \sin (\omega t - 120^\circ) \angle 120^\circ \text{ T}$$

$$B_{cc'} = B_m \sin (\omega t + 120^\circ) \angle -120^\circ \text{ T}$$

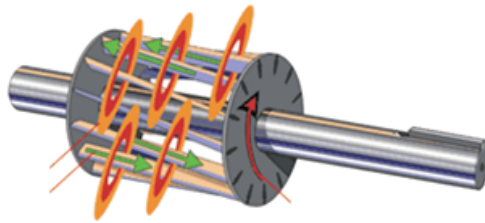


Figura 1.7 Fuerzas generadas en barras del rotor por campo magnético producido en el estator. [3]

Si evaluamos el flujo en un tiempo $t = 0$, por ejemplo, se obtiene:

$$B_{\text{total}} = B_{aa'} + B_{bb'} + B_{cc'} = 0 - \frac{\sqrt{3}}{2} \angle 120^\circ B_m + 32 \angle -120^\circ B_m$$

$$B_{\text{total}} = \left[-\frac{\sqrt{3}}{2} \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) + \frac{\sqrt{3}}{2} \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \right] B_m = \left(\frac{\sqrt{3}}{4} - j\frac{3}{4} - \frac{\sqrt{3}}{4} - j\frac{3}{4} \right) B_m$$

$$B_{\text{total}} = 1.5 B_m \angle -90^\circ \text{ T}$$

Esto demuestra la aseveración hecha anteriormente con el Teorema de Ferrari.

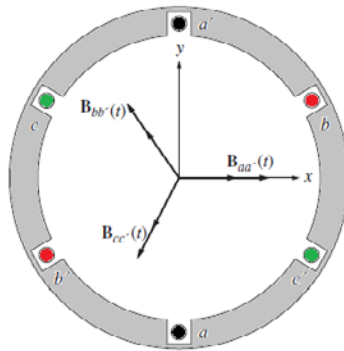


Figura 1.8 Flujos presentes en un devanado trifásico.

El resultado de la densidad de flujo total, indica que en el estator hay un campo magnético sinusoidal resultante que es de valor constante y que se mueve con velocidad angular ω constante.

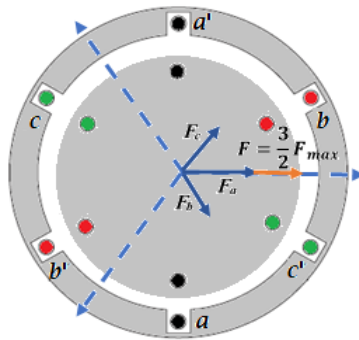


Figura 1.9 Flujo magnético resultante de la suma de tres FMM en el motor de inducción.

La velocidad del campo magnético giratorio producido por el estator depende de la cantidad de polos de la máquina, se denomina velocidad de *sincronismo* y se representa matemáticamente por

$$\eta = \frac{120 f}{P} \quad (1.3)$$

O por

$$\omega = \frac{4\pi f}{P} \quad (1.4)$$

Donde:

η = Velocidad de *sincronismo* en revoluciones por minuto (rpm).

f = Frecuencia eléctrica en Hertz.

p = Número de polos del estator.

ω = Velocidad de sincronismo en radianes/segundo (r/s).

Número de polos	Velocidad en rpm		Velocidad en r/s	
	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz
2	3000	3600	314.0	377.0
4	1500	1800	157.0	188.5
6	1000	1200	104.7	125.7
8	1200	900	78.5	94.2

Fuente: Referencia [1]

Tabla 1.1 Velocidades de motores de inducción más comunes.

NOTA: (Para ver el funcionamiento del campo magnético giratorio se sugiere visitar la siguiente URL:
<https://www.youtube.com/watch?v=8XF-11MQGQ0>)

1.4 La corriente en el motor de inducción

En un motor de inducción circulan corrientes eléctricas en el circuito del estator y en el circuito del rotor.

La corriente del estator depende directamente del voltaje aplicado y es inversamente proporcional a la magnitud de la impedancia por fase de la bobina del estator. Durante el arranque, en un motor convencional, esta corriente alcanza de 5 a 7 veces el valor de la corriente nominal. Esto representa ciertos inconvenientes, sobre todo en motores de gran potencia pues los altos niveles de corriente pueden ser peligrosos y si no se toman las debidas precauciones, produce disparos inconvenientes de las

protecciones eléctricas asignadas al motor, llegando inclusive a disparar el interruptor principal del tablero que alimenta al motor.

Una precaución que se toma en cualquier industria es que no se deben arrancar dos motores de manera simultánea, pues la alta corriente requerida para esta acción provocaría una caída en el voltaje de alimentación del sistema y podría llegar inclusive a disparar el interruptor principal del tablero que alimenta a los motores.

Otro inconveniente que origina la alta corriente de arranque en los motores de gran potencia es que limita el número de arranques durante un periodo de tiempo determinado, ya que en el momento del arranque la alta corriente produce esfuerzos térmicos y mecánicos sobre las bobinas del estator. Un motor de gran potencia mientras más frecuentemente se arranque, reduce su vida útil considerablemente.

Cuando el arranque se hace a voltaje pleno o arranque directo de la línea, la corriente de arranque en el motor de inducción tiene el mismo valor independientemente de que el motor se arranque en vacío, a plena carga o con cualquier porcentaje de la carga. En las Figuras 1.5 y 1.6 se muestran gráficas de la corriente en vacío y corriente de plena carga de un motor de 50 HP a 460 V, nótese qué en ambas gráficas la corriente de arranque tiene el mismo valor, aunque la corriente tarda más tiempo en establecerse cuando la carga es mayor.

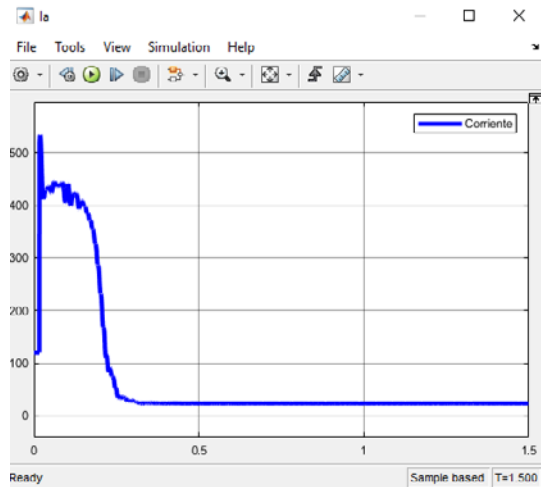


Figura 1.10 Comportamiento de la corriente en vacío.

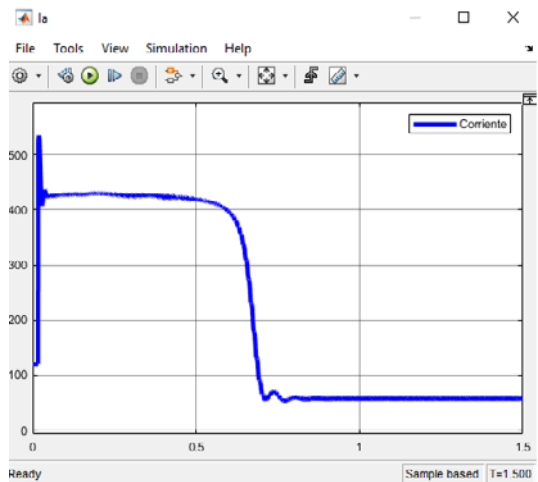


Figura 1.11 Comportamiento de la corriente a plena carga.

1.5 El deslizamiento

Al aplicársele un voltaje trifásico al grupo de bobina del motor de inducción, se produce un campo magnético rotatorio de magnitud constante en el entrehierro, donde el campo magnético producido enlaza tanto a las bobinas del estator como a las bobinas del rotor. Esta interacción genera por acción de inducción electromagnética una fuerza en las bobinas del rotor que, al tener bobinas cortocircuitadas generan corrientes eléctricas; las cuáles producen un campo magnético en el rotor, qué al interactuar con el campo producido en el estator, generan un par que hará girar al rotor en el sentido del campo magnético rotatorio. Entonces el par producido internamente en el motor existe debido a una diferencia entre la velocidad del campo magnético rotatorio producido en el estator o velocidad de sincronismo y la velocidad mecánica desarrollada por el rotor, por lo que el rotor gira a una velocidad menor de la de sincronismo.

Si la máquina gira a la misma velocidad del campo magnético rotatorio, no existirán en el rotor

- ▶ Par y voltajes inducidos.
- ▶ Corrientes inducidas.
- ▶ Frecuencia eléctrica.

Esta diferencia de velocidades se llama *deslizamiento*, y es un concepto importante que determina las características de funcionamiento del motor de inducción o asíncrono.

En forma de ecuación, el deslizamiento se define como

$$s = \frac{\omega_d}{\omega_s} = 1 - \frac{\omega_M}{\omega_s} = \frac{\omega_s - \omega_M}{\omega_s} \quad (1.5)$$

O por

$$s = \frac{\eta_d}{\eta_s} = 1 - \frac{\eta_M}{\eta_s} = \frac{\eta_s - \eta_m}{\eta_s} \quad (1.6)$$

Donde:

s = Deslizamiento.

ω_s = Velocidad síncrona en r/s.

η_s = Velocidad síncrona en rpm.

ω_d = Velocidad de deslizamiento en r/s.

η_d = Velocidad de deslizamiento en rpm.

ω_m = Velocidad mecánica del rotor en r/s.

η_m = Velocidad mecánica del rotor en rpm.

El rango del deslizamiento es un número comprendido entre 0 y 1 aunque también suele expresarse en términos porcentuales: cuando el rotor gira a la velocidad de sincronismo, el deslizamiento será del 0% y cuando el rotor este bloqueado o en reposo y la velocidad sea cero, el deslizamiento vale 100%.

El deslizamiento es importante en el desempeño de un motor de inducción, porque su valor determina la eficiencia del motor. La fracción $(1 - s)$ se relaciona con la potencia mecánica del motor y la fracción s se disipa como pérdidas en los conductores del rotor.

Las máquinas de eficiencia estándar manejan deslizamientos del 4% o mayores, mientras que los motores de alta eficiencia tienen deslizamientos máximos del 2%.

1.5.1 Relación de la frecuencia en función del deslizamiento

Como sabemos la frecuencia en el estator depende de la frecuencia de la fuente de voltaje aplicado, en cambio la frecuencia en el rotor varía con la velocidad del rotor. Si el rotor está bloqueado (velocidad del rotor igual a cero), la frecuencia del rotor será igual a la frecuencia del estator. En cambio, si el rotor gira a la velocidad del campo magnético giratorio, su frecuencia es cero. Por tanto, podemos decir que la frecuencia que se establece en el rotor varía inversamente con la velocidad del rotor y toma valores desde un máximo estando el rotor bloqueado, a valor cero en velocidad de sincronismo, por lo que se puede establecer una relación entre frecuencias de estator y rotor mediante la expresión

$$f_r = s * f_e \quad (1.7)$$

Donde:

f_r = Frecuencia del rotor, en Hertz.

s = Deslizamiento del motor.

f_e = Frecuencia del estator, en Hertz.

1.6 El circuito equivalente del motor de inducción

Una de las mejores formas de analizar un motor de inducción, es caracterizar los parámetros de su circuito equivalente, estos parámetros que permiten determinar un modelo matemático de los efectos eléctricos y magnéticos que ocurren dentro del motor de inducción.

Tal como ocurre en el caso de los transformadores, estos motores operan bajo el mismo principio de inducción electromagnética, por lo que sus similitudes son evidentes, aunque también sus diferencias. Se hace un breve repaso de estas diferencias:

- ▶ El motor de inducción tiene un secundario que gira y que además está en cortocircuito.
- ▶ Al ser el rotor de tipo jaula, con bobinas en corto, es difícil obtener una relación de transformación, por lo que todos los valores de resistencias e inductancias se refieren de manera automática al lado del estator.
- ▶ Es posible incluir en el circuito equivalente el concepto del deslizamiento, un aspecto fundamental en el análisis del motor de inducción.
- ▶ En algunas ocasiones no se contempla el valor de la resistencia del núcleo, cuando ocurre esto, entonces su efecto se integra en las pérdidas en el núcleo.
- ▶ La frecuencia de la fuente se aplica solo a los elementos del estator, no así a los elementos del rotor, los cuales están en función del deslizamiento, tal como se muestra en la ecuación (1.7).

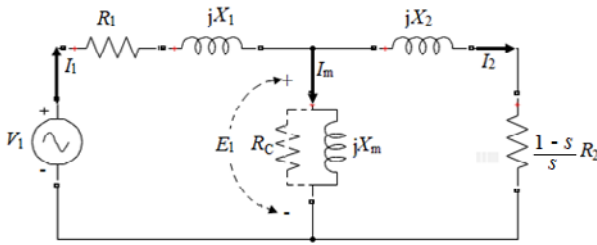


Figura 1.12 Circuito equivalente por fase del motor de inducción.

El circuito equivalente de un motor de inducción tiene una representación monofásica, ya que la máquina trifásica es un circuito balanceado de voltajes y corrientes, por lo que ocurre en una fase ocurre en las otras dos.

En la figura 1.12, se muestra el diagrama del circuito equivalente por fase de un motor de inducción, simbólicamente:

V_1 Voltaje de la fuente por fase.

E_1 Voltaje inducido en el núcleo.

I_1 Corriente en el circuito del estator.

I_2 Corriente en el circuito del rotor.

I_m Corriente circulante en el núcleo.

R_1 Resistencia de devanados del circuito del estator.

R_2 Resistencia de devanados del circuito del rotor.

X_1 Reactancia de fuga del circuito del estator.

X_2 Reactancia de fuga del circuito del rotor.

X_m Reactancia de magnetización del núcleo.

Todos los valores en ohms.

1.7 Relaciones de potencia en el motor de inducción

Derivado del análisis del circuito equivalente por fase, se pueden obtener una serie de ecuaciones que van a ayudar a un conocimiento más completo del motor de inducción.

Iniciando con la impedancia resultante (Z_{eq}) del circuito equivalente del motor

$$Z_{eq} = R_1 + jX_1 + \frac{\left(\frac{R_2}{s} + jX_2\right) * jX_m}{\frac{R_2}{s} + j(X_2 + X_m)} \quad (1.8)$$

La corriente del estator por fase se obtiene mediante la relación del voltaje de fase (V_1) y la impedancia resultante por fase

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_{eq}} \angle -\theta \quad (1.9)$$

Donde θ es el ángulo del factor de potencia en el estator.

Para entender con mayor claridad las diferentes etapas de la variación de potencia que ocurren en un motor de inducción desde su arranque hasta su condición de estado estable, así como de las pérdidas de potencia que ocurren en este intervalo, es conveniente elaborar un diagrama de flujo de potencias, recordando que un motor de inducción es una máquina que convierte la energía eléctrica en energía mecánica. Este diagrama se muestra en la Figura 1.13.

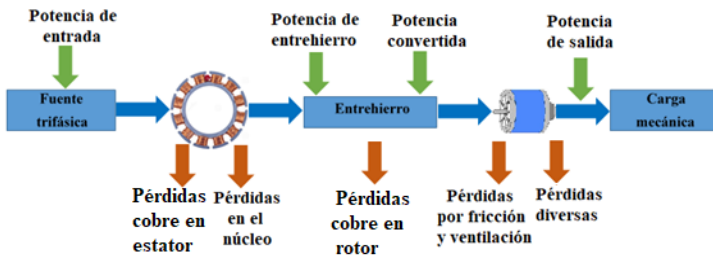


Figura 1.13 Diagrama de flujo de potencias de un motor de inducción.

La potencia trifásica de entrada del motor es

$$P_{ent} = \sqrt{3} * V_L * I_L * \cos\theta \quad (1.10)$$

Donde el subíndice (L) representa los valores de voltaje de línea de la fuente y la corriente de línea obtenida del motor, respectivamente.

1.7.1 Potencia en el entrehierro

Luego de haber obtenido las pérdidas en el cobre y las pérdidas en el núcleo, la potencia pasa por el entrehierro, que es la parte que se encuentra entre el rotor y el estator. De una inspección visual al diagrama de flujo de la Figura 1.13, podemos obtener la potencia del entrehierro como

$$P_{ag} = P_{ent} - P_{cu} - P_{nu} \quad (1.11)$$

Como después del entrehierro, solo queda el circuito del rotor, el único elemento que consume potencia eléctrica en el circuito del rotor es la resistencia R_2 , y si se conoce además el valor de la corriente en el rotor, entonces la potencia del entrehierro también se puede calcular por

$$P_{ag} = 3 * I_2^2 * \frac{R_s}{s} \quad (1.12)$$

Esta potencia se sigue considerando en el entrehierro, donde se convierte la potencia eléctrica en potencia mecánica, siguiendo el diagrama de flujo de potencias de la Figura 9, se puede establecer que la potencia convertida es

$$P_{conv} = P_{ag} - P_{cu,r} \quad (1.13)$$

Y también se pueden obtener en función del deslizamiento como

$$P_{conv} = (1 - s) * P_{ag} \quad (1.14)$$

En el entrehierro la potencia se convierte de potencia de eléctrica en mecánica y la pequeña fracción del deslizamiento del término $(1 - s)$, es potencia que se disipa en forma de calor, por lo que el tener altos deslizamiento es indicativo de baja eficiencia en el motor.

1.7.2 Potencia de salida

Es la potencia que resulta después de restar todas las pérdidas a la potencia de entrada. La potencia de salida es equivalente a la potencia nominal del motor, por ejemplo, si un motor es de 50 HP (37.3 KW), esta debe ser su potencia de salida.

$$P_{sal} = P_{ent} - P_{\text{é rdidas}} = P_{conv} - P_{f y v} - P_{div} \quad (1.15)$$

Cuando se conocen la potencia de entrada y la potencia de salida, se puede determinar la eficiencia de la máquina. En un motor de inducción la eficiencia es relevante porque representa tanto aspectos económicos como ambientales. La eficiencia del motor se calcula mediante la expresión:

$$\% \text{ Eff} = \frac{P_{sal}}{P_{ent}} * 100\% \quad (1.16)$$

1.8 Análisis de las pérdidas en el motor de inducción

De acuerdo con estudios efectuados por empresas constructoras, una ganancia en eficiencia de un 2% reduce las pérdidas en una máquina eléctrica en un 25%, lo que nos permite usar de manera más eficiente la energía eléctrica aplicada a las máquinas eléctricas, ya que las pérdidas que se generan se presentan en forma de calor que enviamos al medio ambiente.

En las máquinas de inducción se presentan las siguientes pérdidas:

- ▶ Pérdidas en el cobre de estator.
- ▶ Pérdidas en el cobre del rotor.
- ▶ Pérdidas en el núcleo.
- ▶ Pérdidas por fricción y ventilación.
- ▶ Pérdidas diversas.

Y se pueden agrupar en dos categorías:

- ▶ Pérdidas variables.
- ▶ Pérdidas fijas.

1.8.1 Pérdidas variables

Dependen de la carga del motor, en vacío o con carga reducida, estas pérdidas son bajas, mientras que, con cargas altas o carga nominal, las pérdidas son altas. A este tipo pertenecen las pérdidas en el cobre del estator y del rotor, que se manifiestan por un calentamiento que produce la corriente al pasar por los devanados de las bobinas debido al efecto resistivo (I^2R). Son las de mayor cuantía entre el conjunto de pérdidas.

Una forma de reducir estas pérdidas es incrementar la longitud de las bobinas y el diámetro de los alambres. Esto implica que el motor tiene que ser más largo y de mayor diámetro, para el caso de los motores con rotor de jaula de ardilla, implica también tener una mayor sección transversal en los anillos que cortocircuitan las bobinas del rotor. Estas acciones de aumentar la longitud y la sección transversal de los conductores, tiene como objeto reducir la resistencia de las bobinas. No se puede reducir la corriente para aumentar la eficiencia, ya que la corriente es producida por el efecto electromagnético de la máquina y tiene implicaciones directas con el par, es decir, con la potencia de salida del motor.

Las pérdidas en el cobre en el estator se presentan en forma de calor por el efecto Joule y puede determinarse con la siguiente fórmula:

$$P_{cu,e} = 3 * I_1^2 * R_1 \quad (1.17)$$

Las pérdidas en el cobre del rotor, al igual que las pérdidas en el circuito del estator, la corriente eléctrica al circular por las bobinas del rotor, se produce un calentamiento que se manifiesta como una disipación de potencia eléctrica, entonces las pérdidas en las bobinas del rotor se pueden determinar con la siguiente fórmula:

$$P_{cu,r} = 3 * I_2^2 * R_2 \quad (1.18)$$

1.8.2 Pérdidas fijas

Se agrupan las pérdidas en el núcleo, las pérdidas por fricción y ventilación y las pérdidas diversas. Se llaman “fijas” porque

tienen prácticamente el mismo valor independientemente de la carga en el motor, es decir, ya sea que el motor esté operando en vacío o en condiciones de carga nominal.

1.8.3 Pérdidas en el núcleo

Se producen como una energía que se requiere para oponerse a dos particularidades importantes que tienen los materiales ferromagnéticos: El fenómeno de Histéresis y las corrientes de Foucault. Para reducir estas pérdidas, se debe revisar el diseño de los núcleos o circuitos magnéticos del estator y del rotor. En los núcleos de estator y rotor se genera la fuerza magnetomotriz tanto inductora como inducida, la generación de esta fuerza magnetomotriz (FMM) se produce por el producto del número de vueltas en las bobinas por la corriente que circula a través de ellas. Generalmente las pérdidas en el núcleo se determinan principalmente en el núcleo del estator, ya que el circuito del rotor en operación normal funciona con frecuencias muy bajas, al ser una parte del motor que funciona con frecuencia baja, esto ocasiona una densidad de flujo casi constante.

En el circuito del estator, la FMM produce un flujo magnético que circula en el material ferromagnético del que está formado el núcleo. El fenómeno tiene las siguientes implicaciones: histéresis ferromagnética y circulación de corrientes parásitas, conocidas como corrientes de Foucault en honor a su descubridor o como corrientes de Eddy.

- Como todas las histéresis, la ferromagnética es el retraso entre la magnetización que ocurre en el material cuando es sometido a un campo magnético (natural o inducido eléctricamente). Coloquialmente podemos decir que si un material ferromagnético se expone a un campo, entonces se magnetiza y la magnetización es tanto mayor cuanto más intenso sea el campo. Si el campo magnético cambia, también cambia la magnetización, pero el cambio sigue un ritmo distinto, hasta el punto de no desaparecer completamente cuando el campo se anula. El fenómeno se explica aludiendo a la fricción intermolecular en el material. El hecho es que el material tiene a almacenar magnetismo

residual en su estructura. Si el campo fluctúa rápidamente, como en el caso del motor de inducción, la fricción intermolecular se traduce en incremento de la temperatura. Para reducir el fenómeno se utilizan aleaciones ferromagnéticas de alta permeabilidad magnética, mismas que por su propia naturaleza tienen menos histéresis. En el caso de motores y transformadores eléctricos, el material óptimo es una aleación de acero al silicio.

- Las corrientes parásitas se originan por inducción y circulan en el metal de los núcleos de las bobinas y del estator. Producen calentamiento por efecto Joule. Para reducir su efecto se ha recurrido al uso de núcleos laminados, es decir paquetes muy apretados de láminas muy delgadas y aisladas entre sí, de manera que se limite la conducción de electricidad entre ellas.

En la Figura 1.14 se muestra una curva de Histéresis característica [7].

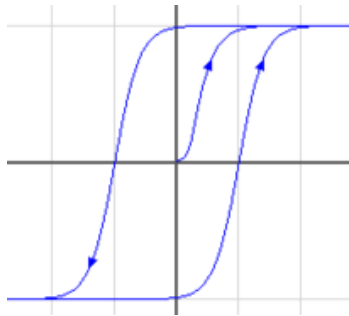


Figura 1.14 Curva de Histéresis de un material ferromagnético. [7]

Las pérdidas en el núcleo también se manifiestan en forma de calor. Al ser pequeña la frecuencia en el rotor cuando el motor está en funcionamiento, prácticamente la potencia perdida en el núcleo se puede atribuir al efecto resistivo más que al inductivo, por lo que las pérdidas en el núcleo se pueden determinar por la siguiente ecuación:

$$P_{nu} = \frac{3 * E_1^2}{R_c} \quad (1.19)$$

Las pérdidas en el núcleo se reducen cuando en las laminaciones que forman el núcleo del estator utilizan láminas muy delgadas de acero eléctrico de alta calidad.

1.8.4 Pérdidas por fricción y ventilación

Se deben principalmente a la fricción que se ejerce sobre los rodamientos y al ventilador montados en el eje del rotor. En los rodamientos, la forma de reducir estas pérdidas es mejorando el material de los rodamientos y su lubricación para limitar el calentamiento en los ventiladores, rediseñando tamaño y su forma y mejorar la capacidad de enfriamiento.

1.8.5 Pérdidas diversas

Estas pérdidas se presentan debido varios factores, entre ellos: el flujo de dispersión en las bobinas, y el calentamiento del núcleo debido a posibles trayectorias complicadas del flujo magnético a través del núcleo que produce alta densidad de flujo.

El flujo de dispersión es una pequeña cantidad del flujo que se produce por la fuente de fuerza magnetomotriz y que no se integra al núcleo, sino que se encuentra alrededor de la bobina, representando una pérdida magnética. La forma de reducir este fenómeno es mejorar la calidad del material con que se construye el núcleo, reducir la separación entre las bobinas para mejorar los acoplamientos magnéticos y construir de forma más compacta las bobinas.

El efecto de zonas con alta densidad de flujo requiere de una simulación y análisis por computadora para detectar las regiones donde se produce este fenómeno, con esto, se debe rediseñar el núcleo para modificar las trayectorias del flujo magnético de tal manera que se elimine la acumulación del flujo. Otra forma complementaria es alargar la longitud de los núcleos de estator y rotor para una mejor distribución del flujo.

Otro aspecto que se tiene que considerar en el desempeño de un motor es el diseño del entrehierro, el espacio de aire que queda entre la superficie interna del estator y la superficie externa del rotor.

Tipo de pérdida	% De Potencia		
	25%	50%	100%
Cobre del estator	42	38	28
Cobre del rotor	21	22	18
En el núcleo	15	20	13
Fricción y ventilación	7	8	14
Diversas	15	12	27

(*) Datos obtenidos en simulación digital por los autores.

Tabla 1.2 Distribución de pérdidas en un motor de inducción.(*)

Un motor se puede construir para que tenga un entrehierro amplio, estrecho o muy estrecho, con un entrehierro amplio se tienen las siguientes condiciones:

- ▶ Al ser el aire mal conductor del flujo magnético, un espacio grande de aire implica mayor reactancia u oposición al flujo magnético que debe fluir del estator al rotor.
- ▶ Un mayor flujo magnético implica más vueltas de alambre a las bobinas y por tanto se tiene un motor de mayor dimensión
- ▶ Una ventaja de un entrehierro grande es que en caso de un problema mecánico que origine vibración, es baja la posibilidad de que el rotor choque con el estator.

Características de un entrehierro reducido.

- ▶ Reducida reluctancia magnética en el entrehierro
- ▶ Se requiere menor flujo magnético en las bobinas del estator y por tanto menos vueltas.
- ▶ Al haber problemas de vibraciones mecánicas, es mayor la posibilidad de que el rotor impacte al estator, pudiendo dañar al equipo.

Un entrehierro pequeño hace más eficiente a una máquina, decidir qué tan pequeño o que tan amplio es parte del criterio del diseñador. Un entrehierro grande implica un motor más económico, un entrehierro pequeño nos dice que es un motor

más eficiente. Un entrehierro muy pequeño mejora el factor de potencia del motor, pero tiene problemas con vibraciones mecánicas.

1.9 El par en el motor de inducción

La generación del par en el motor de inducción se realiza de la siguiente manera: al aplicar la fuerza electromotriz a las bobinas de estator, se genera una corriente en las bobinas del estator. Estas corrientes producen un campo magnético giratorio por la característica del voltaje aplicado. Este campo magnético giratorio del estator induce una tensión en las bobinas del rotor. En las barras del rotor al estar cortocircuitadas, empieza a circular corriente que producen su propio campo magnético, los campos magnéticos del estator y del rotor interactúan entre sí, produciendo un giro en el rotor que sigue a la velocidad del estator, pero sin alcanzarlo, cuando estas dos componentes de la fuerza magnetomotriz interactúan entre sí, se produce un par interno que es el producto de estas dos fuerzas magnetomotrices internas y el ángulo de diferencia entre ellas. Mientras mayor sea el ángulo mayor es el par, cuando el ángulo es cero, es indicativo de que el campo magnético del rotor está alineado con el campo magnético del estator y la máquina gira a velocidad de sincronismo.

1.9.1 Par inducido

Es un par interno y es el que hace girar inicialmente al motor, es el par que se opone al par externo requerido por la carga.

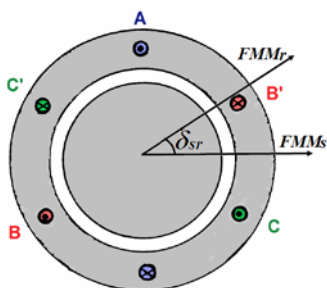


Figura 1.15 Interacción de las fuerzas magnetomotrices del estator (FMM_s) y la fuerza magnetomotriz del rotor (FMM_r) y el ángulo (δ_{sr}) entre ellos.

El par inducido se produce por

$$\tau_{ind} = FMM_s - FMM_r \text{ sen } \mathcal{S}_r \quad (1.20)$$

En variables eléctricas, el par inducido se puede determinar por los parámetros siguientes:

$$\tau_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega_m} \quad (1.21)$$

O por

$$\tau_{ind} = \frac{P_{ag}}{\omega_s} \quad (1.22)$$

Las unidades del par en el Sistema Internacional son los Newton – metro (N -m).

En la Figura 1.16 se puede observar cómo se comporta el par respecto al crecimiento de la velocidad durante el arranque de un motor de inducción, en la gráfica mencionada se pueden observar los diferentes pares que se desarrollan en el motor internamente debido a las características electromagnéticas del motor. El par inducido es el que hace girar inicialmente al motor y se opone al par externo requerido por la carga.

1.9.2 Par de arranque

El arranque es el proceso de poner un motor en marcha. El arranque va acompañado de una alta corriente que puede alcanzar de cinco a siete veces la corriente nominal, ya que el voltaje aplicado al estator llega pleno al rotor, y en condiciones de velocidad cero, la resistencia del rotor es pequeña. Para que un motor pueda arrancar, su par inicial debe ser ligeramente mayor que el par resistente de la carga. El tiempo de arranque de un motor varía en función de la diferencia del par producido por el motor y el par requerido por la carga, no es recomendable un largo tiempo de arranque, pues el efecto de la alta corriente que le acompaña produce un incremento de la temperatura, lo cual envejece el aislamiento del motor y reduce su vida útil. Además, una alta corriente de arranque afecta también a la instalación eléctrica en general.

1.9.3 Par de salida

También llamado par de carga. Se determina por las características de la carga y es el causante de la caída de velocidad en el motor. Cuando el motor alcanza su estado estable, la velocidad es constante y es un indicativo de que el par de la carga y el par inducido están en equilibrio dinámico. El par de salida se determina desarrollando la siguiente ecuación:

$$\tau_{sal} = \frac{P_{sal}}{\omega_{mec}} \quad (1.23)$$

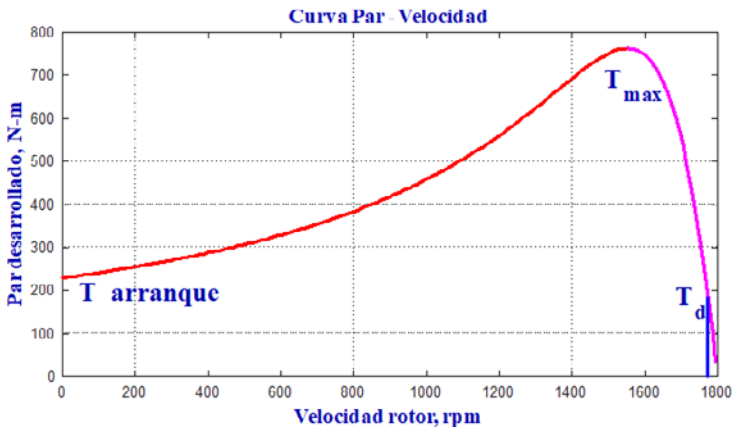


Figura 1.16 Variación del par con la velocidad de arranque característica par - velocidad del motor de inducción.

En ecuaciones anteriores se utiliza la corriente del rotor (I_2) para determinar la potencia en el entrehierro o las pérdidas de cobre en el rotor. De hecho, la corriente del rotor no puede ser medida debido a que las bobinas del rotor son inaccesibles y están en cortocircuito. Una técnica preferida para determinar analíticamente su valor es utilizar el equivalente de Thévenin del circuito equivalente por fase. Con el valor de esta corriente es posible determinar el máximo par que puede desarrollar el motor de inducción.

Para realizarlo, se hace el equivalente de Thévenin del circuito del estator y se deja como carga el circuito del rotor, tal como se muestra en la Figura 1.17.

Donde:

$$V_{TH} = \frac{X_m}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_m)^2}} * V_1 \quad (1.24)$$

Otra alternativa es determinando las impedancias individuales como la impedancia del núcleo Z_n , la impedancia de la rama serie del estator Z_1 y la impedancia de la rama serie del circuito del rotor Z_2 .

$$Z_n = \frac{jX_m * R_c}{jX_m + R_c} \quad (1.25)$$

$$Z_1 = R_1 + jX_1 \quad (1.26)$$

$$Z_{th} = \frac{Z_1 * Z_n}{Z_1 + Z_n} \quad (1.27)$$

$$Z_2 = \frac{R_2}{s} + jX_2 \quad (1.28)$$

O también mediante:

$$Z_{TH} = \frac{jX_m (R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_m)} = R_{TH} + jX_{TH} \quad (1.29)$$

A partir del análisis del circuito equivalente de Thévenin, se pueden derivar los datos más importantes del motor.

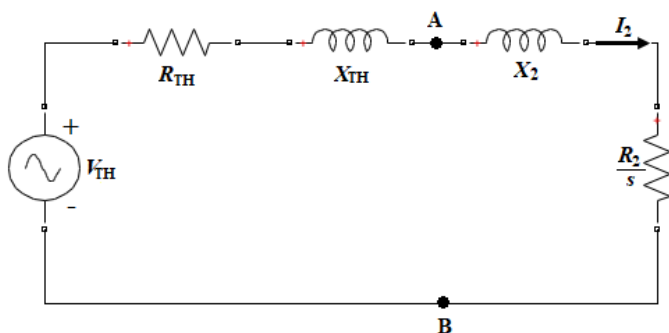


Figura 1.17 Equivalente de Thévenin del circuito equivalente por fase del motor de inducción.

La corriente en el rotor se encuentra como

$$I_2 = \frac{V_{TH}}{R_{TH} + \frac{R_2}{s} + j(X_{TH} + X_2)} \quad (1.30)$$

Las ecuaciones para determinar el par máximo y el deslizamiento correspondiente se dan a continuación.

$$\tau_{max} = \frac{3 * V_{TH}^2}{2 * \omega_{sinc} \left[R_{TH} + \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2} \right]} \quad (1.31)$$

$$s_{max} = \frac{R_2}{\sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} \quad (1.32)$$

La corriente del estator complementaria a la ecuación (1.9):

$$I_1 = \frac{I_2 (Z_n + Z_2)}{Z_n} \quad (1.33)$$

1.10 Característica par-velocidad del motor de inducción

Tal como se puede ver en la ecuación (1.27), el par máximo es independiente de la resistencia del rotor, pero la ecuación (1.28) nos indica que cuanto mayor es el valor de la resistencia del rotor mayor es el deslizamiento al cual ocurre el par máximo. Esto también nos indica que, si no se varía ningún otro parámetro en el motor de inducción durante su funcionamiento, al ir incrementando la resistencia del rotor, el par máximo es constante, pero el par de arranque se va incrementando, y que con cierto valor de resistencia en el rotor, el par máximo se puede alcanzar en el arranque.

Para ejemplificar esta situación, en la Figura 1.14 se muestra la característica par – velocidad para un motor de inducción de 50 HP con curvas que se originan cuando se varía la resistencia del rotor, se realiza con un motor de 50 HP (37.3 KW), que tiene un par nominal de aproximadamente 200 N-m y un par máximo de 700 N-m. Sobre la gráfica se han insertado en la escala del par líneas continuas que indican estas marcaciones, claramente se ve que para un par nominal de 200 N – m, la curva de la menor resistencia es la que tiene el menor deslizamiento y la curva con mayor resistencia tiene un deslizamiento más alto, también se puede observar claramente que la curva de mayor resistencia produce un mayor par de arranque y la de menor resistencia el menor par de arranque.

Sabemos que un mayor deslizamiento tiene un mayor incremento en las pérdidas eléctricas y por ende se reduce la eficiencia de la máquina. Lo ideal es que un motor tenga alto par de arranque y pocas pérdidas, pero estas dos situaciones son contrarias en el comportamiento de un motor. Es decir, una baja resistencia del rotor implica una alta eficiencia con un bajo par, por el contrario, una alta resistencia es indicativo de una eficiencia baja pero un par alto. Esto se muestra claramente en la Figura 1.15, donde la menor resistencia del rotor se obtiene el menor par de arranque, y el menor deslizamiento.

Con respecto a la línea de 700 N m, donde se indica el par máximo, se observa que independientemente de la resistencia del rotor, el valor del par máximo se muestra invariante, esto comprueba lo que se plasmó en la ecuación 1.31, que el par máximo es independiente de la resistencia del rotor. El par máximo es el límite de su operación estable, si la diferencia entre el par demandado por la carga y el par producido por el motor se hace grande, el par sigue creciendo y llega a su límite de ruptura de la estabilidad del motor y el rotor se bloquea.

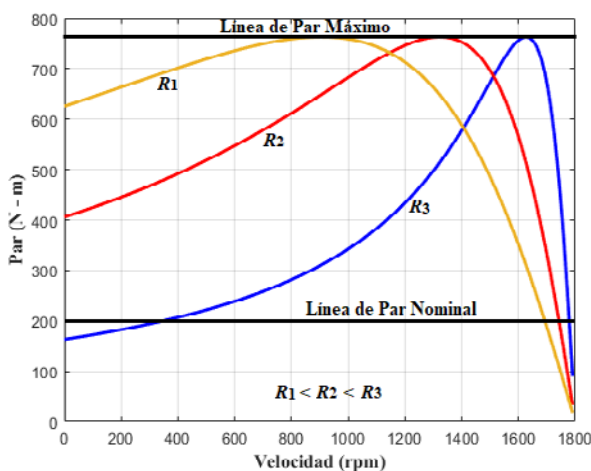


Figura 1.18 Efecto de la variación de la resistencia del rotor en el par máximo y en el par de arranque.

En un rotor tipo jaula de ardilla no es posible modificar la resistencia del rotor para conseguir beneficios con la variación grande de la misma, porque las bobinas del rotor son inaccesibles. En el motor de rotor devanado se puede conectar un conjunto de resistencias externas al circuito del rotor, usando contacto de escobillas sobre anillos deslizantes montados sobre el eje del rotor, de manera que en el arranque, se pueda incrementar la resistencia del rotor con la inserción de estas resistencias externas, y una vez que haya alcanzado su par de arranque, las resistencias externas se desconectan automáticamente para no afectar la eficiencia en operación normal. Este diseño se muestra en la Figura 1.19.

El uso del motor de rotor devanado cada vez tiene menos aplicaciones, salvo en algunas situaciones de alta potencia, pero en motores de baja y mediana potencia, el más utilizado es el motor tipo jaula. Para aplicaciones de alto par, se utiliza el rotor con doble jaula.

Para comparar el funcionamiento entre estos dos tipos de rotores, consulte la siguiente liga:
<https://www.youtube.com/watch?v=JPn5Ou-N0b0>

1.11 Efecto de la resistencia y la reactancia del rotor en el funcionamiento del motor con rotor tipo jaula

Las resistencias y las inductancias se toman del modelo del circuito equivalente del motor, una resistencia alta implica una bobina de sección transversal pequeña y una resistencia baja se debe a una bobina de sección transversal grande.

El efecto inductivo de las bobinas del motor se debe al flujo de la bobina que no se integra al núcleo y que produce un flujo de pérdida o de dispersión y se manifiesta como una inductancia de fuga. Una inductancia es grande si las bobinas del rotor están muy separadas de las bobinas del estator, por el efecto de la alta reluctancia. Por el contrario, si la bobina del rotor se encuentra sobre su superficie externa, tendrá una inductancia de fuga baja.

Un motor con bobinas de baja resistencia (sección transversal grande) y barra profunda, es un motor con bajo par de arranque, bajo deslizamiento y alta eficiencia. Este motor es diseño NEMA “B”

Un motor con bobinas de alta resistencia (sección transversal pequeña) y barras superficiales, es un motor con alto par de arranque, deslizamientos altos y no tan alta eficiencia. Es un motor diseño NEMA “C”.

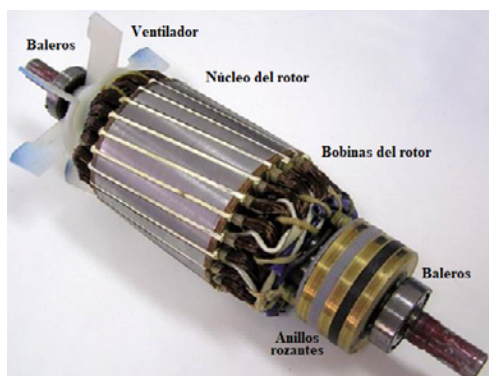


Figura 1.19 Anillos deslizantes en el rotor devanado de un motor de inducción. [8]

En el diseño de los rotores del tipo doble jaula, las bobinas externas se diseñan de alta resistencia y las bobinas profundas de baja resistencia. Para simular el efecto de los motores diseños NEMA “B” y “C”. Durante el arranque, el mayor trabajo se realiza en las bobinas externas por las siguientes razones:

- ▶ En las bobinas de barra profunda durante el arranque, la frecuencia es alta, y se genera un alto flujo de dispersión, con las consecuencias de una inductancia alta y poca circulación de corriente.
- ▶ En las bobinas de barra externas durante el arranque, con frecuencia alta tienen una trayectoria de reluctancia mayor, lo que produce una baja reactancia, que por ser de sección transversal pequeña tiene una resistencia alta que demanda mayor corriente y produce un alto par de arranque en el motor.

En operación normal ocurre el efecto contrario, ya que, al ser la frecuencia pequeña, la reactancia tanto en la bobina externa como interna son pequeñas, y la corriente fluye en su mayoría por las bobinas que tienen menor resistencia, esto es por las bobinas internas.

Los rotores de doble jaula son más caros que los motores tipo jaula convencionales, pero más económicos que los motores con rotor devanado.



Figura 1.20 Laminaciones de un rotor tipo jaula de ardilla. Fuente: [5]

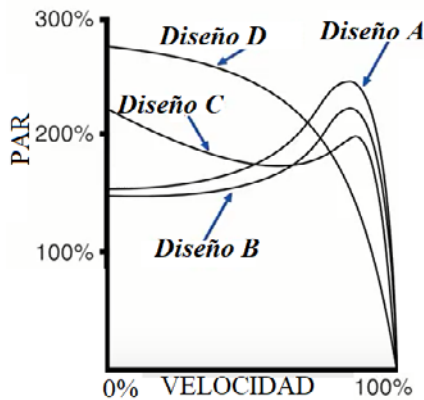


Figura 1.21 Características par-velocidad para diferentes diseños del rotor. [6]

1.12 Cálculo de los parámetros del motor de inducción

Para analizar el comportamiento de un motor de inducción en régimen permanente se toma como referencia un motor con las siguientes características:

Se toman los datos de placa del motor [7], enlistados a continuación:

50 H.P., 460 V, 2 polos, 60 Hz

$R_1 = 0.087 \, \Omega$, $R_2 = 0.228 \, \Omega$,

$$X_1 = 0.3016 \, \Omega, X_2 = 0.3016 \, \Omega,$$

$$X_3 = 13.0819 \, \Omega, J = 1.662 \, \text{Kg} \cdot \text{m}^2$$

El diagrama de bloques para la simulación de este motor se muestra en la Figura 1.19.

1.12.1 Cálculo de los parámetros del motor a mediante el análisis del circuito equivalente

Al correr la simulación, se le aplica un par de 20 N -m, y se obtiene un deslizamiento a plena carga de 4.55%.

Para tener completo el circuito equivalente hace falta determinar la resistencia que representa las pérdidas en el núcleo R_c . Para esto, utilizando el ambiente gráfico de *Simulink*, se aplica la prueba de circuito abierto, y se obtiene un valor aproximado de la resistencia del núcleo, con este parámetro, además se puede también para determinar un valor estimado de las pérdidas en el núcleo.

$$P_{\text{prueba}} = P_{\text{núcleo}} + P_{\text{fyv}}$$

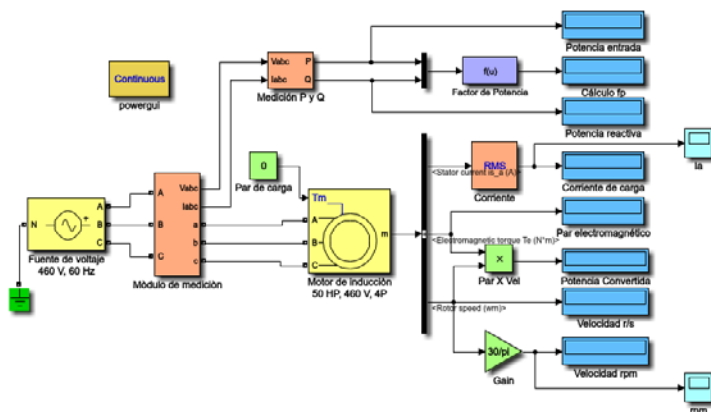


Figura 1.22 Diagrama de bloques en Simulink™ del motor de inducción cuyos datos de placa son la base simulaciones que se presentan en esta publicación.

Para reforzar estas estimaciones, se realiza un experimento también en *Simulink*, recomendado por [8], que consiste alimentar

al motor con voltaje variable desde aproximadamente el 30 o 40% hasta el 100% del voltaje nominal y obtener lecturas de voltaje contra potencia, al graficar el voltaje al cuadrado contra la potencia, y haciendo aplicando el ajuste de la curva de Matlab, llevando la gráfica hasta voltaje igual a cero, se obtiene un valor de potencia que debe ser la potencia consumida por el núcleo y las pérdidas por fricción y ventilación. Este experimento nos permite confirmar si el valor encontrado anteriormente de las pérdidas en el núcleo es válido. Con el valor previamente estimado de las pérdidas en el núcleo se pueden obtener las pérdidas rotacionales del motor. Con estos experimentos, se obtiene un valor de $R_c = 95.86 \, \Omega$ y las pérdidas por fricción y ventilación son $P_{fyv} = 184.7 \, \Omega$.

El resultado de este experimento se muestra en la Figura 1.23.

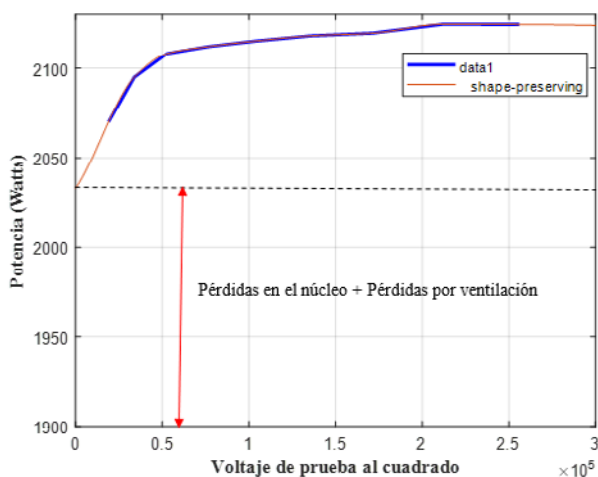


Figura 1.23 Resultado de la prueba para determinar las pérdidas fijas.

Ahora se va a utilizar el circuito equivalente del motor de la Figura 1.17, pero mostrando los valores a sus parámetros internos.

Del circuito equivalente por fase, para obtener de manera sencilla los parámetros requeridos para determinar el desempeño del motor en condiciones de plena carga, se hace uso del circuito equivalente de Thévenin, tal como se muestra en la Figura 1.21, y las ecuaciones que de este análisis se derivan.

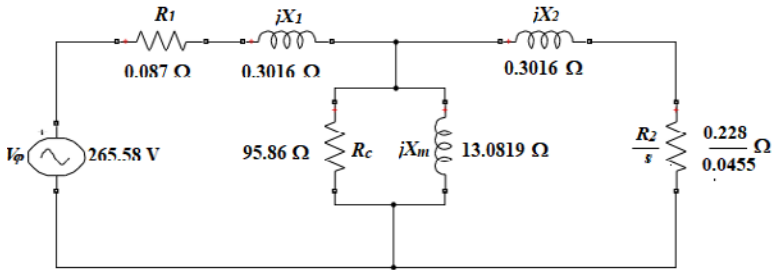


Figura 1.21 Circuito equivalente con valores correspondientes.

Cálculo de la impedancia de la rama en paralelo del núcleo.

$$Z_n = \frac{jX_m * R_c}{jX_m + R_c} = \frac{13.0819 \angle 90^\circ * 95.86}{95.86 + j13.0819} = \frac{1254.0309 \angle 90^\circ}{96.7485 \angle 7.771^\circ} = 12.96176 \angle 82.229^\circ \Omega$$

$$Z_n = 12.96176 \angle 82.229^\circ \Omega = 1.7526 + j12.8427 \Omega$$

Cálculo de la rama serie del primario.

$$Z_1 = R_1 + jX_1 = 0.087 + j0.3016 = 0.31389 \angle 73.91^\circ \Omega.$$

Cálculo de la impedancia y el voltaje de Thévenin

$$Z_{th} = \frac{Z_1 * Z_n}{Z_1 + Z_n} = \frac{0.31389 \angle 73.91^\circ * 12.96176 \angle 82.229^\circ}{0.087 + 1.7526 + j(0.3016 + 12.8427)} = \frac{4.0685 \angle 156.139^\circ}{13.2724 \angle 82.0329^\circ}$$

$$Z_{th} = 0.306538 \angle 74.1061^\circ = 0.08394 + j0.2948 \Omega$$

$$V_{th} = \frac{V_\phi * Z_n}{Z_1 + Z_n} = \frac{265.5811 * 12.96176 \angle 82.229^\circ}{13.2724 \angle 82.0329^\circ} = 259.3651 \angle 0.1961^\circ V$$

Cálculo de la corriente del rotor:

$$I_2 = \frac{V_{th}}{R_{th} + \frac{R_2}{s} + j(X_{th} + X_2)} = \frac{259.5155 \angle -0.116^\circ}{0.08394 + 5.011098 + j(0.2948 + 0.3016)}$$

$$I_2 = \frac{259.5811 \angle -0.116^\circ}{5.0949 + j0.5964} = \frac{259.5811 \angle -0.116^\circ}{5.11968 \angle 6.676^\circ} = 50.7026 \angle -6.792^\circ A$$

Cálculo de la corriente en el estator:

$$I_1 = \frac{I_2(Z_{sh} + Z_2)}{Z_{sh}} = \frac{I_2(6.7636 + j13.1443)}{12.96176 \angle 82.229^\circ}$$

$$= \frac{50.7026 \angle -6.792^\circ * 14.78238 \angle 62.771^\circ}{12.96176 \angle 82.229^\circ}$$

$$I_1 = 57.8243 \angle -26.25^\circ \text{ A}$$

Cálculo del factor de potencia del motor:

$$fp = \cos \theta = \cos(26.25^\circ) = 0.8968 \text{ atrasado.}$$

Cálculo de la corriente en vacío:

$$I_o = I_1 - I_2 = 51.861 - j25.575 - 50.3467 + j5.9963 = 1.5143 - j19.7587$$

$$I_o = 19.8166 \angle -85.255^\circ \text{ A}$$

Cálculo de la potencia en el entrehierro.

$$P_{ag} = 3 \frac{I_2}{s} |I_2|^2 = 3 * 5.011 * 50.7026^2 = 38646.1395 \text{ W}$$

Cálculo del par inducido o par desarrollado internamente en el motor.

$$\tau_{ind} = \frac{P_{ag}}{\omega_s} = \frac{38646.1395}{188.5} = 205.02 \text{ N} - m$$

Potencia convertida.

$$P_{conv} = (1 - s) P_{ag} = (1 - 0.0455) * 38646.1395 = 36887.7401 \text{ W}$$

Pérdidas de cobre en el estator:

$$P_{cu,e} = 3 R_i I_i^2 = 3 * 0.087 * 578243^2 = 872.6925 \text{ W}$$

Pérdidas en el núcleo.

$$P_{nu} = 3 \text{ Real}(Z_n) |I_o|^2 = 3 * 1.7526 * 19.8166^2 = 2064.7256 \text{ W}$$

Cálculo de la potencia de entrada

$$P_{ent} = P_{ag} + P_{cu,e} + P_{nu} = 38646.1395 + 872.6925 + 2064.7256 = 41583.5576 \text{ W}$$

La potencia de salida se calcula por:

$$P_{sal} = P_{conv} - P_{f\gamma v} = 36887.7401 - 184.7 = 36703.0401 \text{ W} = 49.1 \text{ HP.}$$

Cálculo de la eficiencia:

$$\% Ef = \frac{P_{sal}}{P_{ent}} * 100\% = \frac{36703.0401}{41583.5576} * 100\% = 88.26\%$$

Cálculo del par máximo.

$$\tau_{max} = \frac{3V_{th}^2}{2\omega_{sinc} \left[R_{th} + \sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2)^2} \right]}$$

$$\tau_{max} = \frac{3 * 259.3651^2}{2 * 188.5 \left[0.08394 + \sqrt{(0.08394^2 + (0.2948 + 0.3016)^2)} \right]}$$

$$\tau_{max} = 780.083 \text{ N} - m$$

Cálculo del deslizamiento al cual ocurre el par máximo

$$s_{max} = \frac{R_2}{\sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2)^2}} = \frac{0.228}{\sqrt{(0.08394^2 + (0.2948 + 0.3016)^2)}}$$

$$s_{max} = 0.3785$$

Para complementar los resultados analíticos obtenidos se hicieron corridas simuladas con el diagrama de bloques de la Figura 1.19 para después analizar y comentar situaciones específicas del comportamiento del motor de inducción en estado estable. Así, se puede comparar lo establecido en los conceptos teóricos con el análisis de los resultados prácticos.

Resumen

En este capítulo se revisaron los principios básicos del motor de inducción comentando en forma detallada cada uno de los conceptos principales, dando énfasis a los diferentes tipos del par que se presentan en ésta máquina, también la deducción de algunos de estos parámetros donde se establecen las principales ecuaciones que determinan su funcionamiento y, en base a un motor específico, se calculan los valores de los principales parámetros como una base para lo que serán los siguientes temas, para lo que se propone un diagrama de bloques en *Simulink^{TR}*. Utilizando las normas internacionales para determinar valores difíciles de obtener mediante pruebas de laboratorio.

Referencias

- [1] ABB Power and productivity for a better world, *Cuaderno de aplicaciones técnicas n° 6*, Barcelona: ABB, 2006.
- [2] Electromotores y bombas industriales S. A. de C. V., «Electromotoresybombas.org,» Servicios y Reparaciones, 09 09 2018. [En línea]. Available: Electromotoresybombas.org. [Último acceso: 15 01 2020].
- [3] Energía Controlada de México, S.A. de C.V., «Energía Controlada de México, S.A. de C.V.,» Qué es un motor?, 2 09 2019. [En línea]. Available: <https://energiacontrolada.com/faqs.php#collapse3>. [Último acceso: 22 02 2020].
- [4] M. Á. Rodríguez Pozueta, «Universidad de Cantabria,» [En línea]. Available: <https://personales.unican.es/rodrigma/PDFs/campo%20magn%20entrehierro%20caminos.pdf>. [Último acceso: 22 Mayo 2018].
- [5] S. J. Chapman, *Máquinas Eléctricas*, 5 ed., México D. F: McGraw-Hill, 2012.
- [6] A. E. Fitzgerald, C. J. Kingsley y U. S. E, *Máquinas Eléctricas*, 6 ed., Madrid: McGraw Hill, 2004.
- [7] P. C. Krause, O. Wasynczuk y S. D. Sudhoff, *Analysis of Electric Machinery and drive systems*, 2 ed., Piscataway: Wiley Interscience, 2002.
- [8] IEEE, «IEEExplore Digital Library,» 1996. [En línea]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/587531>. [Último acceso: 23 Junio 2018].
- [9] B. U. S. Motors, «Motores de Eficiencia Premium Super-E,» 02 2007. [En línea]. Available: <http://www.baldordistribuidor.com.mx/MOTORES%20EFICIENCIA%20PREMIUM.pdf>.
- [10] W. S. U. E. Program, «Premium Efficiency Motor Selection and Application Guide,» 04 2014. [En línea]. Available: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/04/f15/amo_motors_handbook_web.pdf. [Último acceso: 15 Enero 2018].

- [11] V. M. D. Hernández, «Teoría Básica de la CFP,» 2015. [En línea]. Available: <http://rodisa.com.mx/ArchivosPagWEB/Capacitores.pdf>. [Último acceso: 22 Diciembre 2018].
- [12] A. Huges, Electric Motors and drives. *Fundamental, types and applicactios*, 3 ed., Burlintong: Elsevier, 2006.
- [13] J. J. Cathey, Máquinas eléctricas. *Análisis y diseño aplicando Matlab*, México D. F.: McGraw - Hill Interamericana, 2002.
- [14] J. M. Aller, *Máquinas Eléctricas Rotativas*, Valle de Sartenas: Equinoccio, 2004.
- [15] C. K. Alexander y S. N. O. Mathew, *Fundamentals of Electric Circuits*, New York: McGraw Hill, 2009.
- [16] A. I. & A. & S. I. Adekitan, «The performance of a 3-Phase Induction Machine under Unbalance Voltage Regime,» *Journal of Engineering Science and Tecnology Reviw*, vol. 10, pp. 136 - 143, 2017.
- [17] A. I. Adekitan, B. Adekutan, T. Shomefun y T. Aligbe, «Cost implication of Line Voltage variation on Three Phase Induction Motor Operation,» *TELEKOMNIKA*, pp. 1 - 9, 2018.
- [18] C. Saravanan, J. Sathiswar y S. Raja, «Performance of the Three Phase Induction Motor using Modified Stator Winding,» *International Journal of Computer Applications*, pp. 1 - 4, 2012.
- [19] W. Motors, «Motores Eléctricos Guía de Especificación,» 2016. [En línea]. Available: <https://static.weg.net/media/downloadcenter/h6e/h82/WEG-motores-electricos-guia-de-especificacion-50039910-brochure-spanish-web.pdf>.
- [20] M. Altaira, Artist, *Efficiency Improvement of Three Phase Squirrel Cage Induction Motor by Controlling the Applied Voltage to the Stator Using Simulink Models*. [Art]. Colorado State University, 2018.

- [21] J. Pimienta, «Sistemas de Compensación,» 30 Agosto 2017. [En línea]. Available: https://new.abb.com/docs/librariesprovider78/eventos/abb-high-voltage-customer-day-2017/sistemas-de-compensacion-para-lineas-de-distribucion.pdf?sfvrsn=d13f9612_2. [Último acceso: Diciembre 2018].

Capítulo II

Efectos del voltaje en el motor de inducción

2.1 La regulación de velocidad

La velocidad del motor de inducción se desarrolla en la flecha o eje del motor y se mide en revoluciones por minuto (rpm) en el Sistema Inglés y en radianes por segundo (r/s) en el Sistema Internacional de Unidades.

En un motor de inducción, la velocidad de sincronismo, que representa la velocidad base de la máquina, se obtiene por las variables de diseño y se encuentra por la expresión dada en la Ecuación (2.1) para el sistema inglés, y por la ecuación (2.2) en el sistema internacional.

$$\eta_s = \frac{120f}{P} \quad (2.1)$$

O por

$$\omega_s = \frac{4\pi f}{P} \quad (2.2)$$

Donde:

η_s = Velocidad sincrónica en revoluciones por minuto.

ω_s = Velocidad sincrónica en radianes por segundo.

f = Frecuencia eléctrica en Hertz.

P = Número de polos de la máquina.

Para explicar cómo se comporta la velocidad en un motor de inducción, se puede decir que además de las variables de diseño, la velocidad del motor depende básicamente del número de polos y de la frecuencia de la fuente. Se pueden hacer pequeñas variaciones variando el voltaje aplicado, obteniéndose los siguientes efectos:

- A mayor voltaje mayor velocidad.
- A menor voltaje menor velocidad.

Pero este método tiene muchas limitaciones.

En la máquina de inducción trabajando como motor, la velocidad se reduce al aumentar la cantidad de carga mecánica que se aplique al eje del rotor.

- La variación entre el voltaje y la velocidad son directamente proporcionales.
- Pero la relación entre la velocidad y la carga aplicada son inversamente proporcionales.
- Es decir, la variación de la velocidad depende del voltaje aplicado al motor y de la carga mecánica conectada.

Cuando la carga aumenta, la velocidad disminuye, pero no se puede variar el voltaje para ajustar la velocidad a las condiciones iniciales, ya que esto somete al aislamiento del motor a un esfuerzo dieléctrico que reduce su vida útil.

Cuando se consulta cualquier libro de máquinas eléctricas, y se revisan los ejercicios por resolver al final de cada capítulo, los autores suponen (incluso algunos lo indican) qué para obtener los resultados deseados, el motor eléctrico está conectado a una fuente infinita con valores de voltaje y frecuencia constantes.

De hecho no es conveniente variar la tensión aplicada a un motor de inducción durante su operación desde vacío a plena carga, ya que una de las características de un sistema eléctrico debe ser su robustez, y se supone que cuando el motor se conecta a una fuente de voltaje, entonces la fuente de energía eléctrica debe ser capaz de mantener siempre un valor constante en la magnitud

del voltaje aplicado y en su frecuencia, independientemente de la cantidad de carga que el motor tiene que soportar.

Recuerde el lector que en circuitos de corriente alterna, el flujo magnético depende del voltaje aplicado al circuito, es decir, si se varía el voltaje del motor, se están variando los parámetros de la máquina que se relacionan con la distribución del flujo magnético, así como su curva de magnetización. Algo similar ocurre con la variación de la frecuencia eléctrica.

También es recomendable que cada motor se alimente de una fuente trifásica que no alimente simultáneamente a cargas monofásicas, de esta manera se debe garantizar que los tres voltajes de fase estén balanceados, es decir, sean de la misma magnitud.

Cuando un motor está en vacío, es decir, sin carga conectada, su velocidad es alta, conforme se incrementa la carga, la velocidad decrece, por lo que el efecto de la regulación de velocidad se determina para diferentes condiciones de carga del motor. Es común manejar los conceptos de velocidad en vacío (cuando el motor está funcionando sin carga mecánica conectada) y velocidad a plena carga (que es la situación en la que el motor tiene una carga mecánica conectada que lo hace funcionar a sus valores nominales de corriente eléctrica y par desarrollado), pero fuera del rango de su velocidad de sincronismo, que como sabemos es una velocidad que nunca debe alcanzar una máquina de inducción trabajando como motor, a esta velocidad con carga se le acostumbra llamar “velocidad mecánica”.

Cabe mencionar que la velocidad mecánica no necesariamente implica la velocidad mínima a la que puede operar un motor, ya que, en algunas aplicaciones industriales, los motores manejan cargas variables, por lo que no siempre se va a alcanzar la “velocidad a plena carga”. Independientemente de la cantidad de carga que se le aplique a un motor, la regulación de velocidad (RV) toma como referencia la velocidad en vacío o de sincronismo y la velocidad con carga y se define por la siguiente expresión:

$$RV = \frac{\text{Velocidad en vacío} - \text{Velocidad con carga}}{\text{Velocidad con carga}} \times 100\% \quad (2.3)$$

Una de las características de los motores de inducción es su poca variación de velocidad entre sus valores de velocidad vacío a velocidad a plena carga, los motores eficientes tienen deslizamientos menores al 3%, y los motores de eficiencia estándar pueden presentar deslizamientos del 5%, que ya se considera alto. También se puede establecer que mientras mayor sea la diferencia entre las velocidades en vacío y plena carga, menor es la eficiencia del motor.

La característica que mejor representa el comportamiento del motor al variar la carga es la curva de velocidad contra corriente de carga o velocidad contra par aplicado. Mediante esta gráfica se puede ver si el motor tiene grandes variaciones de velocidad al pasar la carga desde vacío a plena carga, además de poder determinar la regulación de velocidad del equipo. En la Figura 2.1 se muestra esta característica del motor que se toma como referencia.

Otra representación del comportamiento de un motor desde vacío a plena carga, o con sobrecarga, se puede analizar en una curva de velocidad contra corriente, que se muestra en la Figura 2.2, donde se puede determinar el consumo del motor en cualquier momento.

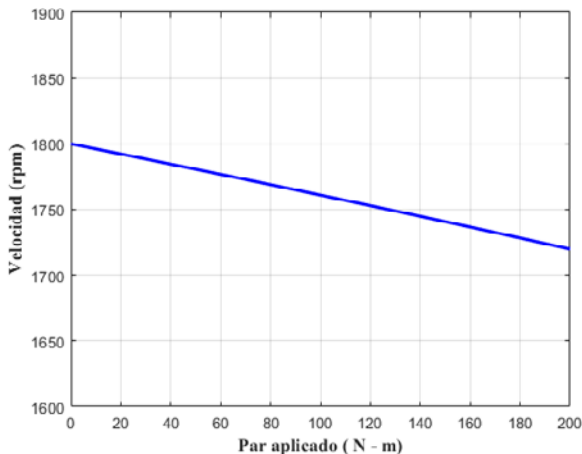


Figura 2.1 Velocidad desde vacío a plena carga, variando el par.

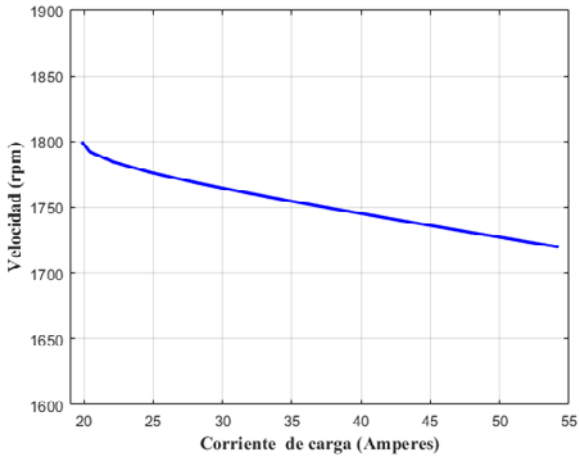


Figura 2.2 Velocidad contra la corriente de armadura.

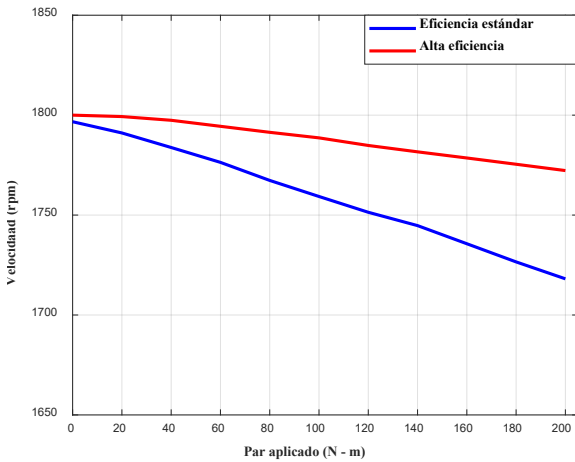


Figura 2.3 Comparativo de las curvas Par – Velocidad entre un motor de eficiencia estándar y un motor de alta eficiencia.

Al analizar ambas gráficas, de velocidad contra par o velocidad contra corriente del estator, se puede constatar que ambos comportamientos son similares, por lo que se puede establecer una relación prácticamente lineal entre el par y la corriente de carga del motor de inducción.

En la Figura 2.3 se observa la diferencia entre un motor de alta eficiencia y un motor estándar, La regulación de voltaje del motor estándar es de 4.45 %, mientras que la regulación de voltaje en el motor de alta eficiencia es de 1.5 %.

Los cálculos posteriores se harán con un motor estándar.

2.2 Regulación de voltaje con sobrecarga

En las gráficas 2.4 y 2.5 se muestran las gráficas donde se somete al motor a una sobrecarga.

Estos datos avalan el comportamiento casi lineal que manifiesta la relación entre el par y la corriente en el motor de inducción, para cualquier característica de carga.

Para resaltar la similitud entre el par y la corriente, comparando los resultados obtenidos con carga nominal, se resalta lo siguiente:

La variación del par fue por encima del 30% del par nominal, para la corriente el porcentaje de incremento respecto a la corriente nominal resultó del 26.4%, mientras que la variación de la velocidad entre carga nominal y sobrecarga fue del 1.65%.

También se puede obtener de manera indirecta la eficiencia del motor a cualquier índice de carga, y se puede comprobar que la más alta eficiencia se obtiene cerca de los valores de la corriente nominal y no necesariamente a la corriente nominal. Este análisis se presenta en el apartado de eficiencia del motor.

Dado que el deslizamiento es menor en los motores de alta eficiencia, la regulación de velocidad es mejor que la de los motores estándar, en la Figura 2.4 se muestra la característica par vs. velocidad donde se comparan estos datos.

En las gráficas obtenidas para la regulación de velocidad para un motor estándar en condiciones de carga nominal y de sobrecarga, donde se obtienen los siguientes datos:

Con carga nominal, velocidad de sincronismo 1800 rpm, velocidad con carga nominal con un valor de 1719.88 rpm, regulación de velocidad 4.66 %.

Si se aplica una sobrecarga del 30%, velocidad nominal 1800, velocidad con sobrecarga de 1691.48 rpm, con estos valores se obtiene una regulación de velocidad de 6.41%.

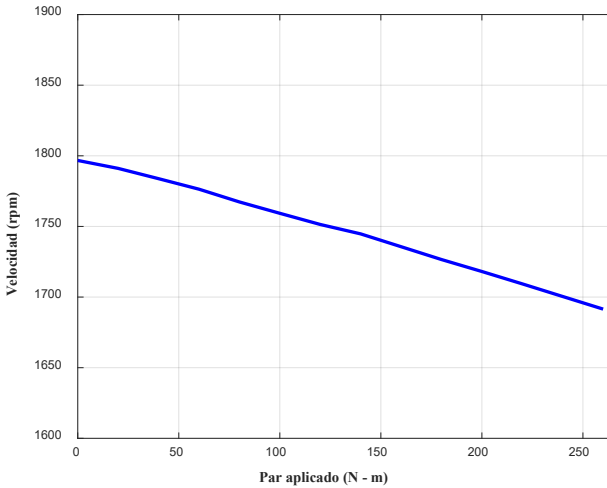


Figura 2.4 Velocidad con sobrecarga del par aplicado.

2.3 Voltajes balanceados por encima o por debajo de su voltaje nominal

Someter al motor de inducción a un sobrevoltaje acorta su vida útil. El voltaje en el motor se manifiesta por la expresión

donde:

$$e_{ind} = L_1 \frac{di}{dt} \quad (4)$$

e_{ind} = Voltaje inducido en las bobinas del estator.

L_1 = Inductancia de la bobina del estator.

di = Corriente variable producida en el estator.

dt = Variación en el tiempo.

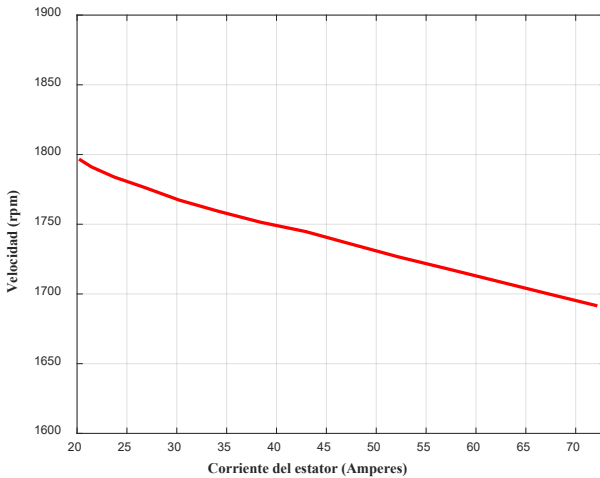


Figura 2.5 Variación de la Velocidad como función de la corriente en el estator.

Este voltaje inducido crea un campo eléctrico alrededor de las bobinas del estator. Estas bobinas tienen una rigidez dieléctrica acorde con el voltaje nominal del motor, si el voltaje en el motor se eleva, aumenta el campo eléctrico en las bobinas del motor, estas se someten a un esfuerzo dieléctrico y causan un efecto de envejecimiento del aislamiento, es decir, reduce la vida útil del motor. Poner más aislamiento, implica tener un mayor volumen y un motor de mayor tamaño y, por ende, de mayor costo, por esto los motores solo deben trabajar a su voltaje nominal. La relación entre el voltaje y el aislamiento es:

- A mayor voltaje mayor aislamiento.
- A menor voltaje, menor aislamiento.

Además, como se ha comentado, en circuitos de corriente alterna la producción del flujo magnético en las bobinas depende del voltaje aplicado, de tal manera que a mayor voltaje mayor flujo magnético. Cuando un motor se opera con una tensión por encima de su valor nominal, el flujo que se produce en las bobinas excede los valores máximos de la densidad de flujo magnético $B_{\max}$ permisible, se incrementa la reluctancia interna del núcleo, aumenta la corriente de magnetización por la tendencia

a la saturación del material ferromagnético, lo que se traduce en calentamiento en el núcleo, incremento de la corriente y un incremento de las pérdidas en el núcleo y en el cobre. Es decir, el incremento de la tensión en el circuito del motor tiene una relación directa con el aumento de las pérdidas en el núcleo, pero al calentarse el núcleo implica que en las bobinas se incrementa la temperatura y se incrementen las pérdidas en el cobre.

Si un motor de inducción se trabaja con un voltaje menor al nominal, el aislamiento no sufre ningún estrés, en cambio sí se producen los siguientes efectos:

- Aumento de las pérdidas en el cobre y en el núcleo.
- Mayor corriente de carga y mayor calentamiento del motor.
- Reducción potencia nominal del motor.
- Disminución en la velocidad del motor.
- Disminución de la eficiencia.

Las normas IEC 60034-1 y la IEEE MG-1 12.44.1 establecen que el motor de inducción debe ser apto a suministrar par con variaciones de $\pm 10\%$ del voltaje nominal.

En los siguientes párrafos se muestra los efectos que estas variaciones de $\pm 10\%$ causan en el motor de inducción, para tal efecto, se utilizarán voltajes de 506 V (110% del voltaje nominal), 460 V (voltaje nominal) y 414 V (90% del voltaje nominal) en la experimentación. La finalidad de esta actividad es analizar el comportamiento que tienen los principales parámetros en la operación de un motor de inducción, como son el par, el deslizamiento, la corriente de carga, la velocidad y la eficiencia.

En el comportamiento del par ante las variaciones de voltaje, se analizarán como afectan estas variaciones al par máximo, al par de arranque y al par de carga; se compararán estas variaciones con los resultados obtenidos en la simulación y con lo que se establece en la teoría del comportamiento del motor de inducción.

Tal como se establece en la ecuación (1.31), el par máximo depende del cuadrado del voltaje de Thévenin, este voltaje se determina a partir del circuito equivalente por fase del motor. Por

otro lado, sabemos que en circuitos de corriente alterna, el voltaje es el que produce el flujo magnético, y que el voltaje es proporcional al flujo en el entrehierro, además, la corriente inducida en el rotor es proporcional a la densidad de flujo. Si la relación del par desarrollado en el motor está en función de la corriente del rotor y de la densidad de flujo en el entrehierro y además depende del cuadrado del voltaje aplicado, esto propiciará que una leve variación en el voltaje, causando una variación mayor en la capacidad de producción del par, tal como se establece en [Huges]. Esta variación del par propicia variación en la velocidad de salida del motor y por tanto en el deslizamiento. La velocidad del motor tiene influencia en la corriente del estator, por tanto, si la corriente crece, es mayor el calentamiento del motor.

Si durante el arranque se reduce el voltaje aplicado, el par generado dentro del motor puede ser insuficiente para acelerar el motor hasta lograr su desarrollo normal y poder vencer al par de carga, por tanto, con voltaje reducido el proceso de arranque del motor tarda más tiempo y esto produce mayor calentamiento. Este efecto se muestra claramente en las figuras 3.1, 3.2 y 3.3, donde se simulan las corrientes de arranque en vacío a tres voltajes diferentes.

Para que la máquina pueda acelerar, el par eléctrico debe ser mayor que el par de la carga. Si esta diferencia es muy pequeña, la máquina demora mucho tiempo para alcanzar el punto de operación permanente.

Cuando el voltaje aplicado es mayor que el voltaje nominal, el par es mayor y la corriente se reduce levemente, esto ocurre a una mayor velocidad y por tanto a menor deslizamiento, se reduce el calentamiento, pero el aislamiento se somete a un mayor esfuerzo dieléctrico.

Estos conceptos teóricos se contrastarán contra los resultados obtenidos durante la simulación.

Voltaje aplicado	Corriente (Amp)	Tiempo (s)
506 V	21.83	0.6
460 V	19.85	0.7
414 V	17.86	0.8

Tabla 2.1. Tiempo de la corriente en vacío para alcanzar su estado permanente a diferentes voltajes, determinado por simulación.

Las gráficas 2.6, 2.7 y 2.8 muestran lo que se había comentado anteriormente, a menor voltaje, mayor tiempo en que las bobinas se exponen a más altas corrientes. En vacío, la diferencia es apenas significativa, pero cuando el motor está en condiciones de plena carga en el motor con el 90% del voltaje, el tiempo de estabilización de la corriente se retrasa hasta 144% del motor con voltaje nominal.

Voltaje aplicado	Corriente (Amp)	Tiempo (s)
506 V	50.59	0.7
460 V	54.25	0.9
414 V	59.38	1.3

Tabla 2.2 Tiempos de la corriente de plena carga en alcanzar estado permanente a diferentes voltajes obtenidos por simulación.

En las gráficas mencionadas también se pudo observar que la corriente de arranque es menor a menor voltaje y la corriente de arranque mayor corresponde al mayor voltaje aplicado. Esto se explica de la siguiente manera, entendiendo que el voltaje aplicado es proporcional a la potencia del motor, si a un motor de 50 HP se le aplica un voltaje superior, la potencia capaz de desarrollar es mayor a los 50 HP. Esta técnica se usa en los arranques electrónicos para obtener un arranque suave en el motor, lo arrancan a un voltaje muy inferior para tener la corriente de arranque de un motor de menor potencia.

Ahora vemos como es la relación entre el voltaje aplicado y el par. Se ha establecido que el par debe ser proporcional a la potencia, y que el voltaje aplicado al motor es proporcional a la potencia, por lo tanto, debemos esperar que a mayor voltaje mayor par y que a menor voltaje menor par.

En la Figura 2.9 se muestra la simulación de la característica Par – Velocidad para el motor de inducción al 10%, 100% y 90% del voltaje nominal. De esta misma figura, se puede ver que el par máximo para las tres curvas ocurre a la misma velocidad, en este caso a 1548 rpm.

Tomando como referencia un par nominal de carga de 200 N – m, se puede ver que esta magnitud se alcanza a menor velocidad para el 90% del voltaje aplicado (mayor deslizamiento) y a mayor velocidad para el 110% del voltaje aplicado (menor deslizamiento). Los valores obtenidos para el par máximo y el par de arranque se muestran en la Tabla 2.3.

Para el par máximo.

- ▶ Una variación del 10% por encima del valor nominal del voltaje produce una variación del 17.35% en el par.
- ▶ Una variación del 10% por debajo del voltaje nominal produce una disminución del 19% del par.

Gráfica	Par máximo (N – m)	Par de arranque (N – m)
506 V	923.5	276.8
460 V	763.2	228.8
414 V	618.2	185.3

Tabla 2.3 Valores del par máximo y arranque.
Simulaciones para diferentes voltajes.

Para el par de arranque.

- ▶ Una variación del 10% por encima del valor nominal del voltaje produce una variación del 21% en el par.
- ▶ Una variación del 10% por debajo del voltaje nominal produce una disminución del 23.45% del par.

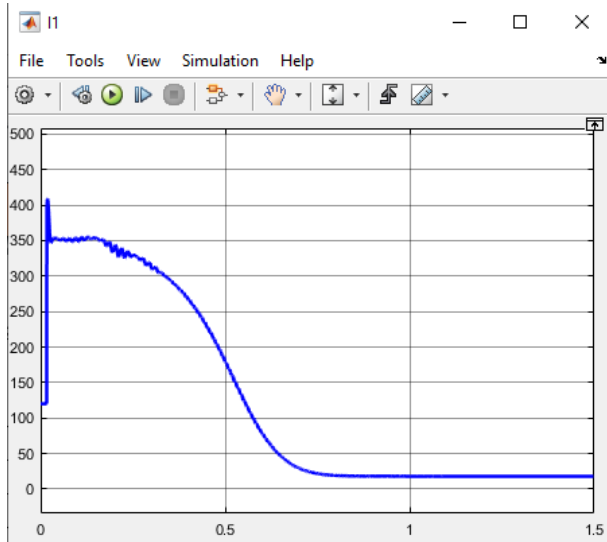


Figura 2.6 Corriente de arranque en vacío a voltaje reducido.

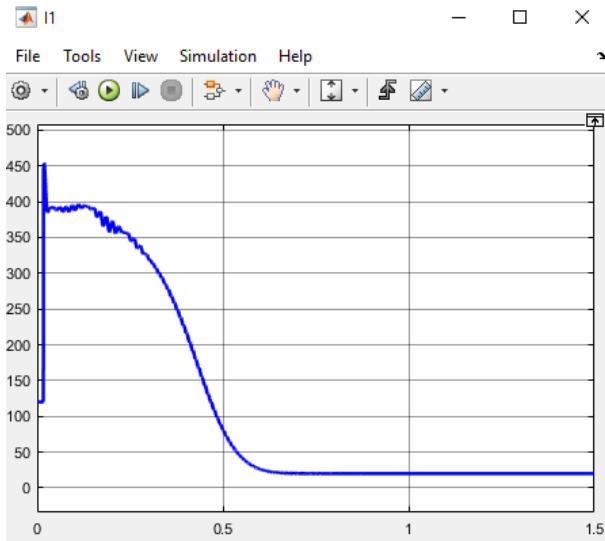


Figura 2.7 Corriente de arranque en vacío a voltaje nominal.

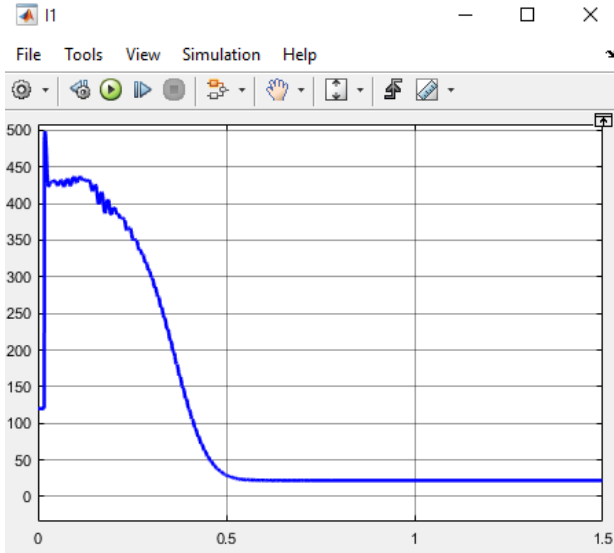


Figura 2.8 Corriente de arranque en vacío con sobrevoltaje.

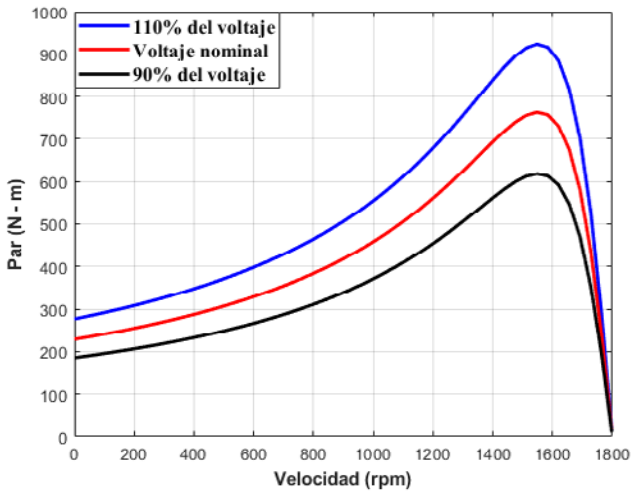


Figura 2.9 Curva par – velocidad a diferentes voltajes.

De todo esto, se demuestra que el voltaje aplicado es proporcional al par, por ende, a la potencia del motor.

En relación a la velocidad, se ha explicado que la máxima velocidad se obtiene cuando el motor se encuentra con la carga mínima o en vacío, y que al ir incrementando la carga de la misma manera se va reduciendo la velocidad.

¿Pero qué sucede con la velocidad cuando en condiciones similares de carga, tres motores de la misma capacidad funcionan a voltajes diferentes?

En la Figura 2.10 se muestra la simulación obtenida para la velocidad a diferentes voltajes, los rangos de variación de la velocidad de plena carga (200 N – m) muestran los siguientes valores de regulación de velocidad:

- ▶ Al 110% del voltaje nominal 3.78%.
- ▶ A voltaje nominal 4.65%.
- ▶ Al 90% del voltaje nominal 5.9%.

En la gráfica también se observa que a mayor voltaje mayor velocidad y que a menor voltaje menor velocidad. En la Tabla 2.4 se muestran las diferencias de las velocidades.

Voltaje	Velocidad (rpm)	Velocidad de (rad/s)
506 V	1734.44	181.63
460 V	1719.88	180.1
414 V	1699.58	178.0

Tabla 2.4 Velocidades de plena carga obtenidas, por simulación, a diferentes voltajes.

La relación del voltaje y la corriente deben ser similares ya que, al aumentar el voltaje, se aumenta la potencia del motor, y al aumentar la potencia se debe demandar mayor corriente a la fuente donde se conecta el motor, e inversamente con la disminución del voltaje.

Para la corriente en el estator o la corriente de carga, se tiene la gráfica de la Figura 2.11 se contrasta la corriente de carga a diferentes voltajes contra el par desarrollado en el motor y los

valores obtenidos se muestran en la Tabla 2.5, donde se confirman los conceptos teóricos vertidos con anterioridad.

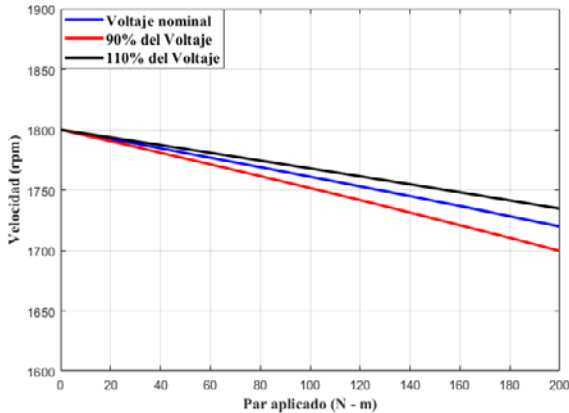


Figura 2.10 característica Par – Velocidad a diferentes voltajes.

Al tomar como referencia el voltaje nominal de 460 volts, las variaciones de corriente de carga plena que son las más significativas son:

- ▶ Al 110 del voltaje nominal, la corriente es 6.74% menor
- ▶ Para el 90% del voltaje nominal, la corriente es 9.33% mayor.

Voltaje aplicado	Corriente en vacío (A)	Corriente a plena carga (A)
506 V	21.83	50.59
460 V	19.85	54.25
414 V	17.86	59.31

Tabla 2.5 Corrientes en vacío y a plena carga a diferentes voltajes obtenidas por simulación.

La corriente de carga en el motor y el par aplicado siempre han mantenido una relación prácticamente lineal, al simular estos valores que se muestran en la gráfica de la Figura 2.11 se puede ver una situación “rara” en la que las corrientes se cruzan a cierto nivel de carga, en este caso aproximadamente a un valor

de 80 N - m del par nominal aplicado y que, por ejemplo, la curva de 90% voltaje, la corriente en vacío es la menor de todas y su corriente de plena carga es la mayor de todas. Esto se puede explicar comentando que, cuando el motor arranca con menor voltaje, su potencia efectiva es menor y demanda menos corriente de arranque. Cuando se le aplican los 200 N – m de la plena carga, al mismo tiempo que se alimenta con bajo voltaje, la carga aplicada es tomada como una sobrecarga que demanda una mayor corriente.

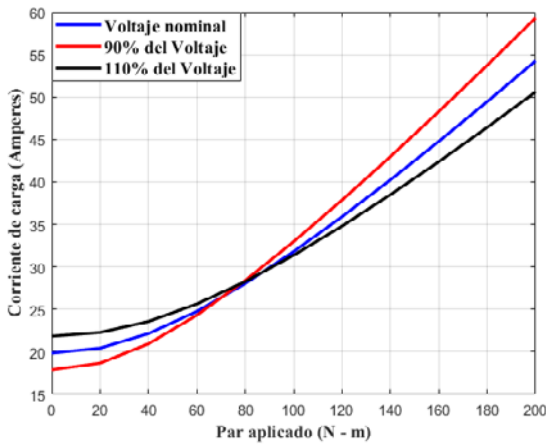


Figura 2.11 Característica Par – Corriente a diferentes voltajes.

Si la corriente y el par tienen comportamientos similares, si la velocidad se reduce al incrementarse el par, y a mayor par mayor corriente, entonces al aumentar la corriente debe disminuir la velocidad, en la gráfica de la Figura 2.12 se muestra esta consideración.

En la Figura 2.12 se muestra claramente las corrientes no se cruzan al incremento de la carga, además de que son prácticamente tres desplazamientos paralelos manteniendo su jerarquía (menor, intermedia y mayor) durante toda la trayectoria. La gráfica muestra también las velocidades que alcanzan cuando llegan a la carga plena la curva de menor voltaje con la veloci-

dad más baja y la de mayor voltaje alcanza la velocidad más alta, corroborando lo expuesto en los conceptos teóricos:

- Menor corriente a menor voltaje aplicado.
- Mayor corriente a mayor voltaje aplicado.

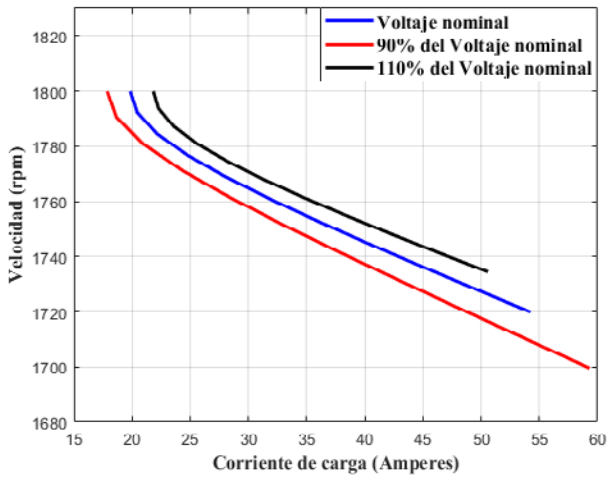


Figura 2.12. Corriente de carga variando el voltaje aplicado.

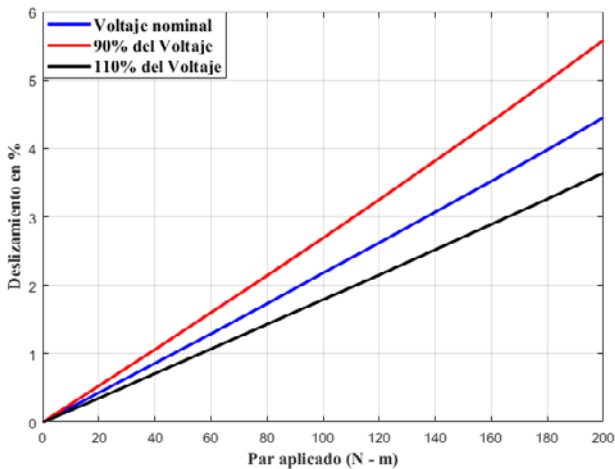


Figura 2.13 Característica del deslizamiento con relación al par de carga a diferentes voltajes.

2.4 Efecto de la variación del voltaje en el deslizamiento

En la Figura 2.13 se muestra la simulación del deslizamiento en correspondencia con el par aplicado. Las gráficas muestran el comportamiento del deslizamiento en el motor de inducción a los tres voltajes ya previamente especificados. La simulación no muestra las características de arranque (velocidad cero en el rotor), el primer valor computado es el obtenido con la corriente en vacío del motor en condiciones de vacío, esta velocidad es muy cercana a la velocidad de sincronismo y el deslizamiento es cercano a cero. Conforme se incrementa la carga, la velocidad del rotor empieza a disminuir y el deslizamiento empieza a crecer. Esta simulación muestra la aplicación de una carga hasta su valor nominal, es decir, de 200 N – m, en tal situación se puede apreciar que a menor voltaje se alcanza el deslizamiento más alto, y a mayor voltaje se obtiene el deslizamiento menor, ratificándose lo que anteriormente se ha reiterado:

- Menor voltaje menor velocidad y mayor deslizamiento.
- Mayor voltaje mayor velocidad y menor deslizamiento.

2.5 El motor de inducción con voltajes desbalanceados

En una fuente trifásica convencional los voltajes se desbalancean principalmente porque están alimentando a cargas monofásicas; estas cargas monofásicas producen un desbalance del sistema trifásico de corrientes, y por consecuencia, estas corrientes desbalanceadas producen diferentes caídas de tensión en las bobinas y se presentan voltajes desbalanceados. Al llegarle al motor un sistema de voltajes trifásicos desbalanceados, ocurren los siguientes eventos:

- Corrientes desbalanceadas en el motor.
- Pulsaciones o vibraciones excesivas.
- Esfuerzos mecánicos y sobrecalentamiento en las bobinas.
- Mayor corriente.

- Incremento de las pérdidas en el motor.
- Reducción de la eficiencia.
- Reducción de la vida útil.

En sistemas industriales algunas veces se combinan cargas trifásicas con cargas monofásicas, y aunque el ingeniero de diseño determina un desbalanceo mínimo para un determinado sistema, en la práctica el desbalanceo mínimo ocurre sólo cuando todas las cargas conectadas son trifásicas. Cuando hay cargas monofásicas, es raro que todas operen simultáneamente y, en general, su efecto real es mucho más significativo que el estipulado teóricamente. El desbalanceo de corrientes produce desbalance de voltajes.

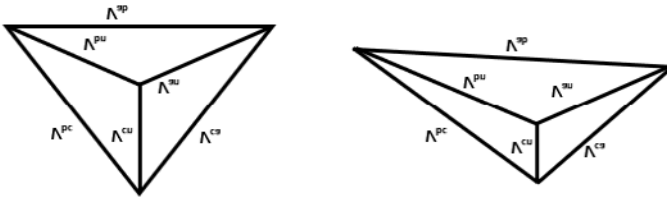


Figura 2.14 A la izquierda voltajes de fase y de línea balanceados.
A la derecha voltajes de fase desbalanceados, esto origina voltajes de línea desbalanceados y corrimiento del neutro.

En esta sección se analiza el desempeño del motor de inducción cuando es operado a diferentes voltajes dentro de rangos razonables que no afecten su expectativa de vida útil. Para esto, se utiliza el motor de 50 HP descrito en los párrafos anteriores y se usarán diversas simulaciones que permitan discernir de manera adecuada las diferencias en su comportamiento. El análisis se limita a utilización de voltajes rms con excitación sinusoidal donde no se utilizan drivers que puedan variar la frecuencia o controlar la corriente de arranque del motor.

En la práctica, las fuentes ideales (voltaje y frecuencia constantes) no existen por sí mismas, sino que son implementadas gracias a la operación de dispositivos de electrónica de potencia, principalmente en aplicaciones con instrumentos de medición que requieren precisiones muy estrictas, o también en equipos

de potencia con una función indispensable dentro de un proceso industrial. Lo deseable es que todos los equipos se conecten a fuentes ideales, pero no se realiza por razones económicas.

Si de manera frecuente, un motor de inducción se conecta a una fuente con voltajes desbalanceados, esto puede afectar al motor en su reducción de velocidad, lo que implica la reducción de su potencia nominal y por ende trabajará como un motor de menor potencia, con el consecuente incremento de la corriente de línea, calentamiento del motor, aumento de las pérdidas y consecuentemente reducción de la vida útil del motor.

Cabe mencionar que los desbalances de voltaje crean desbalances mucho mayores en las corrientes, por lo que un desbalance de voltajes del 5% sería catastrófico comportamiento del motor.

Las normas NEMA e IEEE definen el porcentaje de desbalance como:

$$\% \text{ de desbalance} = \frac{\text{máxima desviación respecto al voltaje promedio}}{\text{voltaje promedio}} \times 100\%$$

En base a la ecuación anterior, se van a tener tres situaciones:

- ▶ Simulación con voltajes de fase en desbalance de 0%
- ▶ Simulación con voltajes de fase en desbalance de 2.5%
- ▶ Simulación con voltajes de fase en desbalance de 5%

En estos procesos se medirán los principales parámetros del motor, como son la velocidad, el par, es deslizamiento, la corriente y la eficiencia, haciendo énfasis en las pérdidas en el cobre.

En la Figura 2.15 se muestra el efecto que causa un desbalance en un motor de inducción sobre las pérdidas en el estator, la simulación consiste en cargar el motor desde 0 a 200 N – m en etapas de 20 N – m, y obtener los valores de pérdidas en el cobre de las bobinas del estator.

De los resultados obtenidos en la Tabla 2.6, se resalta lo siguiente:

- Las pérdidas en el cobre del estator con un desbalance de 2.5 % son 1.7 veces mayores que con voltajes balanceados.
- Las pérdidas con un desbalance del 5% son 7.7 veces mayores.

Desbalance de voltajes	0%	2.5%	5%
Pérdidas en el cobre a plena carga	768 W	1328	5964

Tabla 2.6 Pérdidas en el cobre del estator obtenidas por simulación para diferentes desbalances de voltaje.

De igual manera se grafican las pérdidas de cobre en el rotor, para las tres situaciones comentadas; con voltajes balanceados, con voltajes con 2.5 de desbalance y con voltajes con 5% de desbalance, esto se muestra en la Figura 2.16.

Desbalance de voltajes	0%	2.5%	5%
Pérdidas en el cobre a plena carga	1680 W	1734.7	1793.32

Tabla 2.7 Pérdidas en el cobre del rotor obtenidas simulando diferentes desbalances de voltajes.

De la Tabla 2.7 se observa que la diferencia entre las pérdidas en el rotor a diferentes desbalances es bastante moderado comparado con las pérdidas obtenidas a voltaje balanceado (1680 W), las pérdidas con desbalance de 2.5% son 1.03 veces mayores y las pérdidas con 5% de desbalance son 1.05 veces mayores.

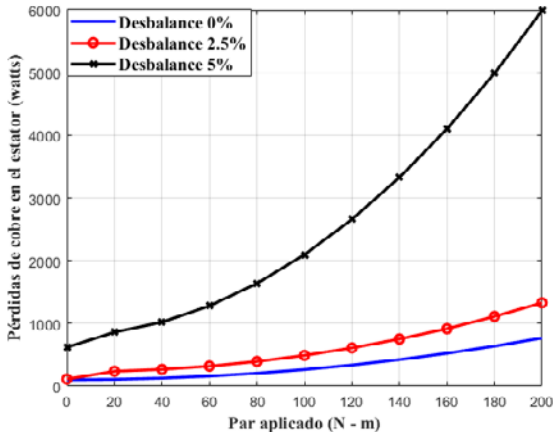


Figura 2.15 Efecto del desbalance de voltajes en las pérdidas en el cobre del estator.

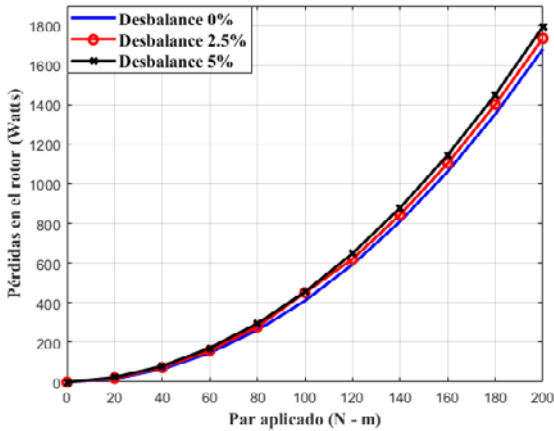


Figura 2.16 Efecto del desbalance de voltajes en las pérdidas de cobre en el rotor.

Ahora, conjuntando las pérdidas totales para cada uno de los desbalances aplicado anteriormente, se obtienen las gráficas 2.17, 2.18 y 2.19.

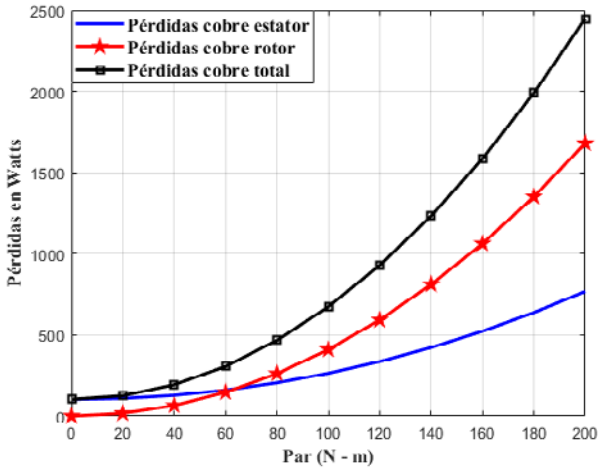


Figura 2.17 Pérdidas de cobre a voltaje nominal sin desbalances.

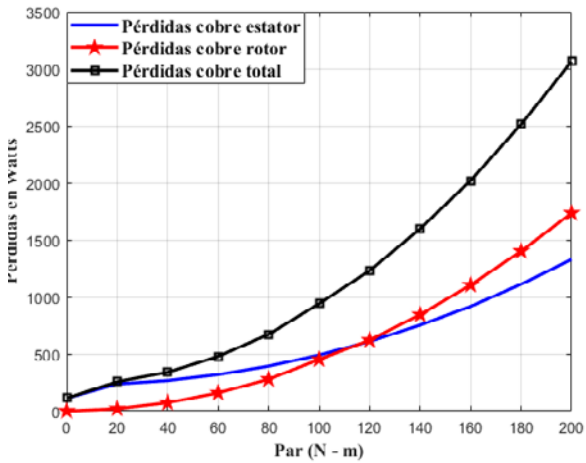


Figura 2.18 Pérdidas en el cobre con 2.5% de desbalance de voltajes.

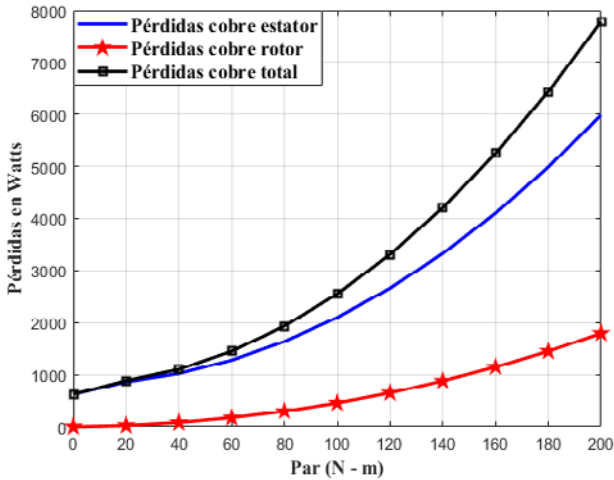


Figura 2.19 Pérdidas en el cobre con 5% de desbalance de voltajes.

Desbalance voltajes	Pérdidas rotor	Pérdidas estator	Pérdidas totales
0%	1680 W	767.95 W	2447.95 W
2.5%	1734.7 W	1327.76 W	3062.42 W
5%	1793.32 W	5984.39 W	7777.71 W

Tabla 2.8. Pérdidas en el cobre, obtenidas simulando diferentes desbalances de voltaje.

Del análisis de estas tres últimas gráficas, y de los resultados puestos en la Tabla 2.8 se puede ver claramente lo siguiente:

- El desbalance de voltajes afecta poco las pérdidas en el rotor.
- En el estator, a mayor desbalance mayores pérdidas.
- Las pérdidas totales en el motor de inducción con desbalance de 5% crece un 318%.

Con esta información es claro que desbalance del 5% o mayor, pone en una condición altamente insegura el funcionamiento del motor de inducción.

Como sabemos, las pérdidas en el cobre se originan por la corriente que fluye en los devanados de la máquina y la resistencia que oponen estos devanados al paso de la corriente. Las resistencias de los devanados prácticamente se toman como valores constantes, no así las corrientes que cambian principalmente con el cambio en la carga aplicada, pero también por las variaciones del voltaje. En las siguientes gráficas se muestran como varían las corrientes en el estator por el efecto del desbalance en los voltajes aplicados al motor de inducción.

Para esto, las gráficas de las Figuras 2.20 y 2.21 muestran las variaciones de las corrientes de fase en el motor para los desbalances de voltaje de 2.5% y 5%.

En condiciones normales una gráfica de corriente cuando se aplican voltajes balanceados al motor, las tres corrientes tienen una misma trayectoria y se empalmarán las tres trayectorias, pero las gráficas de las figuras 2.20 y 2.21 que nos muestran corrientes totalmente desbalanceadas, producto del desbalance de voltajes aplicados al motor.

El efecto de desbalance de voltajes no solo afecta el comportamiento de las corrientes de fase, sino a todos los demás parámetros como se indicó al principio de que se abordara este tema, en las siguientes figuras se mostrarán como afecta a otros parámetros del motor. Tomemos por ejemplo el factor de potencia del motor, este se muestra en la Figura 2.22, donde se observa que el mejor factor de potencia se obtiene cuando se tienen los tres voltajes de magnitudes idénticas, en cambio, el peor factor de potencia se observa con un desbalance en los voltajes del 5%.

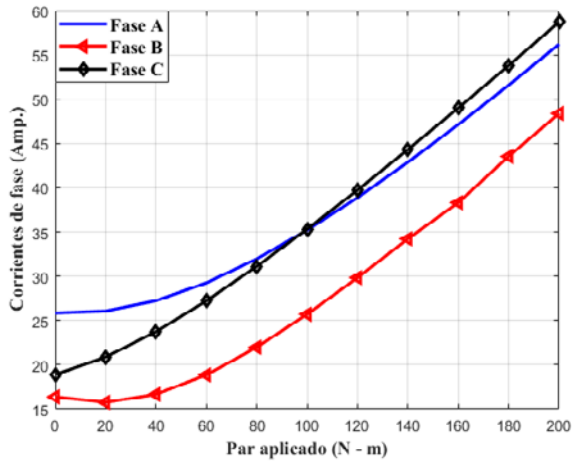


Figura 2.20 Corrientes de fase con desbalance de voltajes de 2.5%.

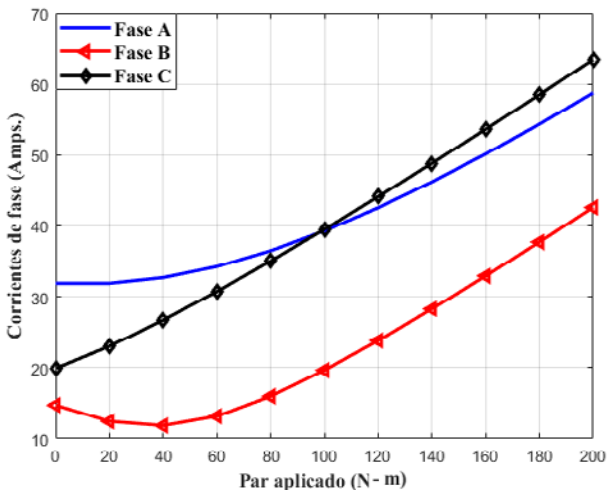


Figura 2.21 Corrientes de fase con desbalance de voltajes de 5%.

Ahora, si el factor de potencia es una relación entre la potencia real contra la potencia aparente, indica que el efecto de los voltajes desbalanceados también afectan tanto a la potencia real, la potencia aparente y la potencia reactiva solicitadas a la fuente por

el motor durante su operación, y que además afecta a la potencia de salida del motor.

Ya se ha especificado anteriormente que voltajes y potencia del motor son directamente proporcionales, por tanto, también este desbalance de voltajes va a afectar a uno de los parámetros más importantes en el desempeño de un motor de inducción, la eficiencia.

En la figura 2.23 se muestran las variaciones de la eficiencia para los tres casos de desbalance estudiados en esta sección, y cuyo resumen se muestra en la Tabla 2.9.

Desbalance de voltajes	0%	2.5%	5%
% De Eficiencia	89.2	86.6	75

Tabla 2.9 Eficiencia en el motor con desbalance de voltajes.

Datos obtenidos en simulación por autor.

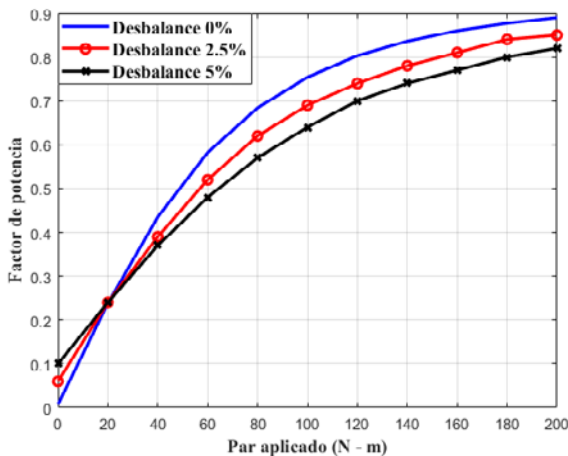


Figura 2.22 Efecto del desbalance de voltajes sobre el factor de potencia.

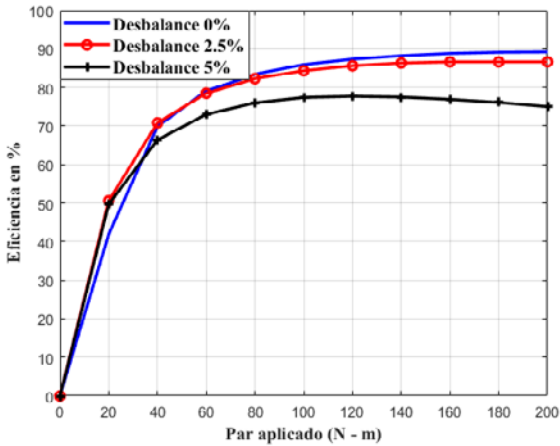


Figura 2.23 Efecto del desbalance de voltajes en la eficiencia del motor.

Resumen

En este capítulo se simularon situaciones de desbalances y operaciones con voltajes por encima y por debajo del valor nominal, se mostró y se demostró que los desbalances de voltaje en el motor de inducción originan serios inconvenientes de operación, no se trataron los aspectos económicos que este fenómeno genera por no ser tema a tratar aquí, pero se puede recalcar que este tipo de situaciones ponen en riesgo la operación no solo del motor de inducción, sino también la del sistema al que se encuentra conectado este motor así como la seguridad de los operadores.

Referencias

- [1] ABB Power and productivity for a better world, Cuaderno de aplicaciones técnicas n° 6, Barcelona: ABB, 2006.
- [2] Electromotores y bombas industriales S. A. de C. V., «Electromotoresybombas.org,» Servicios y Reparaciones, 09 09 2018. [En línea]. Available: Electromotoresybombas.org. [Último acceso: 15 01 2020].
- [3] Energía Controlada de México, S.A. de C.V., «Energía Controlada de México, S.A. de C.V.,» Qué es un motor?, 2 09 2019. [En línea]. Available: <https://energiacontrolada.com/faqs.php#collapse3>. [Último acceso: 22 02 2020].
- [4] M. Á. Rodríguez Pozueta, «Universidad de Cantabria,» [En línea]. Available: <https://personales.unican.es/rodrigma/PDFs/campo%20magn%20entrehierro%20caminos.pdf>. [Último acceso: 22 Mayo 2018].
- [5] S. J. Chapman, Máquinas Eléctricas, 5 ed., México D. F: McGraw-Hill, 2012.
- [6] A. E. Fitzgerald, C. J. Kingsley y U. S. E, Máquinas Eléctricas, 6 ed., Madrid: McGraw Hill, 2004.
- [7] P. C. Krause, O. Wasynczuk y S. D. Sudhoff, Analysis of Electric Machinery and drive systems, 2 ed., Piscataway: Wiley Interscience, 2002.
- [8] IEEE, «IEEExplore Digital Library,» 1996. [En línea]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/587531>. [Último acceso: 23 Junio 2018].
- [9] B. U. S. Motors, «Motores de Eficiencia Premium Super-E,» 02 2007. [En línea]. Available: <http://www.baldordistribuidor.com.mx/MOTORES%20EFICIENCIA%20PREMIUM.pdf>.
- [10] W. S. U. E. Program, «Premium Efficiency Motor Selection and Application Guide,» 04 2014. [En línea]. Available: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/04/f15/amo_motors_handbook_web.pdf. [Último acceso: 15 Enero 2018].

- [11] V. M. D. Hernández, «Teoría Básica de la CFP,» 2015. [En línea]. Available: <http://rodisa.com.mx/ArchivosPagWEB/Capacitores.pdf>. [Último acceso: 22 Diciembre 2018].
- [12] A. Huges, *Electric Motors and drives. Fundamental, types and applicatios*, 3 ed., Burlintong: Elsevier, 2006.
- [13] J. J. Cathey, *Máquinas eléctricas. Análisis y diseño aplicando Matlab*, México D. F.: McGraw - Hill Interamericana, 2002.
- [14] J. M. Aller, *Máquinas Eléctricas Rotativas*, Valle de Sartenas: Equinoccio, 2004.
- [15] C. K. Alexander y S. N. O. Mathew, *Fundamentals of Electric Circuits*, New York: McGraw Hill, 2009.
- [16] A. I. & A. & S. I. Adekitan, «The performance of a 3-Phase Induction Machine under Unbalance Voltage Regime,» *Journal of Engineering Science and Tecnology Reviw*, vol. 10, pp. 136 - 143, 2017.
- [17] A. I. Adekitan, B. Adekutan, T. Shomefun y T. Aligbe, «Cost implication of Line Voltage variation on Three Phase Induction Motor Operation,» *TELEKOMNIKA*, pp. 1 - 9, 2018.
- [18] C. Saravanan, J. Sathiswar y S. Raja, «Performance of the Three Phase Induction Motor using Modified Stator Winding,» *International Journal of Computer Applications*, pp. 1 - 4, 2012.
- [19] W. Motors, «Motores Eléctricos Guía de Especificación,» 2016. [En línea]. Available: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h6e/h82/WEG-motores-electricos-guia-de-especificacion-50039910-brochure-spanish-web.pdf>.
- [20] M. Altaira, Artist, *Efficiency Improvement of Three Phase Squirrel Cage Induction Motor by Controlling the Applied Voltage to the Stator Using Simulink Models*. [Art]. Colorado State University, 2018.
- [21] J. Pimienta, «Sistemas de Compensación,» 30 Agosto 2017. [En línea]. Available: <https://new.abb.com/docs/librariespro->

vider78/eventos/abb-high-voltage-customer-day-2017/
sistemas-de-compensacion-para-líneas-de-distribución.
pdf?sfvrsn=d13f9612_2. [Último acceso: Diciembre 2018].



Capítulo 3

La eficiencia en el motor de inducción

3.1 Introducción

La eficiencia en un motor de inducción trifásico es relevante porque debido a su amplio uso a nivel industrial, se requiere una máquina con pocas pérdidas y un eficiente consumo de energía. El uso de la energía es inevitable en el mundo y ese uso contamina nuestro entorno, por esto, la sustentabilidad de los equipos cada vez más es un factor que afecta en las decisiones de compra por parte de los usuarios. El reto de los fabricantes es aprovechar la tecnología para innovar y producir motores que sean cada vez más eficientes, un motor eficiente es un motor bien diseñado y, valga la redundancia, bien construido.

En el capítulo 1 se comentaron las técnicas y estrategias para reducir las pérdidas, esta tecnología que requiere el auxilio de herramientas de computación, software de diseño como las técnicas del elemento finito, la mecánica de fluidos, mejores lubricantes, mejores procesos de laminación en frío y en caliente y mejores aleaciones metálicas, entre otras, son algunas de las técnicas que se están utilizando actualmente para mejorar el desempeño de las máquinas eléctricas en general.

Todo esto debe ir acompañado de un buen uso de la máquina en el proceso industrial, es decir, que el motor sea adecuado para la aplicación, que trabaje la mayor parte del tiempo dentro del rango seguro de sus valores nominales de voltaje, corriente, temperatura y velocidad. Con todo esto, además de un motor eficiente, se tiene una máquina menos ruidosa, con menos vibraciones mecánicas, mejor lubricada y de fácil mantenimiento.

Para determinar la eficiencia de un motor, cada país o región tiene sus estándares:

- En México se aplica la norma NOM-016-ENER-2010.
- En Estados Unidos la norma NEMA MG-1.
- En Japón la norma JIC C4034-2-1.
- En Europa la norma IEC 60034-30-1.

Los países que han marcado la pauta son Japón, la Unión Europea y Estados Unidos, actualmente las normas europeas y japonesas son las normas que más se comprometen con el cuidado del medio ambiente.

La Comisión Europea fue la primera en proponer normas para mejorar la eficiencia de los motores de inducción mediante las clases de eficiencia EFF1, EFF2 y EFF3 después las normas IEC, según Manual de motores de alta eficiencia de la ABB, clasifican a los motores de la siguiente manera:

IEC 6034 – 30 - 1	NEMA MG - 1
IE1 Eficiencia Estándar	
IE2 Alta Eficiencia	Alta Eficiencia
IE3 Eficiencia Premium	Eficiencia Premium
IE4 Eficiencia Super Premium	

Tabla 3.1 Niveles de eficiencia energética de motores de inducción. [9]



Figura 3.1 Las normas que debe cumplir el motor de inducción trifásico. Fuente: [10]

Las normas europeas EFF no han perdido su validez, pero estas van siendo sustituidas por las normas IE.

Los motores de alta eficiencia presentan las siguientes ventajas:

- Reducción del costo de mantenimiento.
- Menor corriente de arranque.
- Son adecuados para variadores de frecuencia.
- Al tener menos pérdidas, tienen menor elevación de temperatura.
- Tienen reserva de potencia para trabajar por encima de la temperatura nominal.
- Mejoran su factor de servicio.
- Al revisar la Figura 3.2 (tomado de un Manual de Siemens Motors), se observa que la eficiencia en los motores asíncronos se hace más evidente en las máquinas de mayor potencia.
- Los motores de mayor eficiencia son más costosos, pero consumen menos energía al desarrollar la misma potencia mecánica, además la diferencia específica de cada eficiencia es el costo de recuperación económica que tiene cada motor, es decir, en un determinado tiempo, por el ahorro de energía que se obtiene en los motores de alta eficiencia, la inversión del costo del motor lo recuperan en menor tiempo.

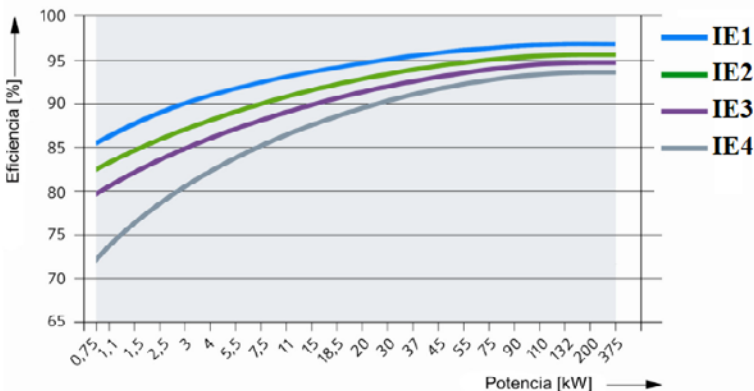


Figura 3.2 Curvas de eficiencia según normas IEC 60034-30-1:2014 a diferentes potencias. Fuente: [9]

Para tener un motor eficiente, se trabajan cada una de las partes que presentan mayor índice de pérdidas, esta información se detalla en la Tabla 3.2.

Como se puede ver de las notas arriba escritas, la eficiencia de un motor de inducción se relaciona con el diseño cuidadoso de cada una de las partes, tecnologías innovadoras para el diseño, nuevos materiales con mejores características mecánicas, eléctricas y magnéticas, procesos de fabricación cuidadosamente planeados, un buen programa de mantenimiento, una instalación eléctrica de calidad, pero además el acoplamiento mecánico para evitar que el motor quede sub-dimensionado o sobre-dimensionado.

En la vida real, los motores de inducción en ocasiones no operan su zona de plena carga o de valores nominales de corriente y potencia, dependiendo de la aplicación del motor, su carga generalmente varía entre el 60 y el 75% de su plena carga, por esto los fabricantes de motores de alta eficiencia diseñan motores cuya eficiencia varía poco. Al revisar los catálogos de los grandes fabricantes las tablas de datos y las curvas de eficiencia, se puede ver claramente que a partir un valor determinado de la carga nominal su eficiencia prácticamente es constante. Con los porcentajes de 75% y 100% de la carga nominal en los motores de baja potencia esta variación puede estar con diferencias de 1 o 2 décimas, pero en los grandes motores, la variación es de centésimas.

Tipos de pérdidas	Estrategias de solución
Pérdidas eléctricas en el cobre del estator	Mayor cantidad de cobre en bobinas, aumento en la sección transversal de los conductores, utilizar cobre de mayor conductividad eléctrica, incrementar el número de ranuras y utilizar un mayor factor de llenado.
Pérdidas eléctricas en el cobre del rotor	Mayor cantidad de cobre en bobinas, aumentar la sección transversal tanto de las bobinas como de los anillos de corto circuito, utilizando cobre de mayor conductividad eléctrica, incrementar el número de ranuras y utilizar un mayor factor de llenado.
Pérdidas en el núcleo	Incrementar el área de laminación para reducir el flujo de dispersión, usar láminas de acero al silicio ultradelgadas para reducir corrientes de Eddy y pérdidas del campo magnético.
Pérdidas por fricción	Usar rodamientos anti fricción y mejor lubricados, también hay baleros magnéticos, donde la flecha del rotor no hace contacto alguno con la carcasa del motor, eliminando este calentamiento.
Pérdidas por ventilación	Usar ventiladores aerodinámicos de tamaño pequeño y fabricados de propileno, acabado liso de los anillos de corto circuito para reducir las pérdidas por ventilación.
Pérdidas adicionales	Mejorar el diseño y los métodos de fabricación, disminuir la longitud del entrehierro.

Tabla 3.2 Reducción de las pérdidas en el motor de inducción. [9]

3.1 Análisis gráfico de la eficiencia en el motor de inducción

Cabe hacer la aclaración de que para las simulaciones de un motor eficiente de 50 H. P. no se utilizan parámetros de un motor real, sino parámetros que se ajustaron para obtener las características de un motor eficiente, y a través de este se han elaborado gráficas que implican contrastar la eficiencia con los diversos parámetros

importantes del motor de inducción como el par aplicado, la potencia, el deslizamiento y el factor de potencia, entre otros.

La siguiente liga presenta la importancia de la eficiencia en el motor de inducción:

<https://www.youtube.com/watch?v=FZeKFigZXWE>

3.2 La eficiencia y la velocidad

Los motores de alta eficiencia giran a mayor velocidad que los motores de eficiencia estándar, por su diseño y operación, tienen ahorros de energía que les permite que el rotor gire a mayor velocidad y tener un menor deslizamiento.

En las siguientes figuras se establece un análisis comparativo del comportamiento de la velocidad entre un motor eficiente y un motor estándar, para diferentes situaciones de operación.

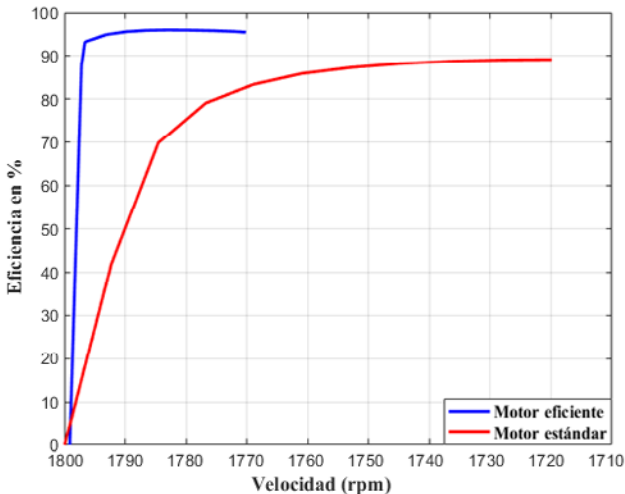


Figura 3.3 Comparación de velocidad entre un motor estándar y un motor eficiente.

En la Figura 3.3 se muestran las diferencias en velocidad del motor estándar y el de alta eficiencia desde que arranca hasta su plena carga. De manera clara se puede ver que la mayor eficiencia también implica mayor velocidad y menor deslizamiento. De alguna manera ya se había comentado que a menor deslizamiento mayor eficiencia.

3.3 La eficiencia y el par

En la gráfica de la Figura 3.4, se puede corroborar lo dicho líneas arriba, la eficiencia es prácticamente constante después de un cierto porcentaje de carga aplicada, estos valores casi constantes de eficiencia son útiles ya que a nivel industrial los motores no siempre funcionan a sus valores nominales de carga, generalmente trabajan por debajo de su carga de diseño, pero aún siguen siendo eficientes.

En la Figura 3.5 se muestra una gráfica que compara el comportamiento de la eficiencia del motor propuesto con otro motor de las mismas características, es decir, de 50 HP, 460 Volts, 4 Polos, 60 Hz, pero con eficiencia estándar desde su arranque hasta su condición de carga plena.

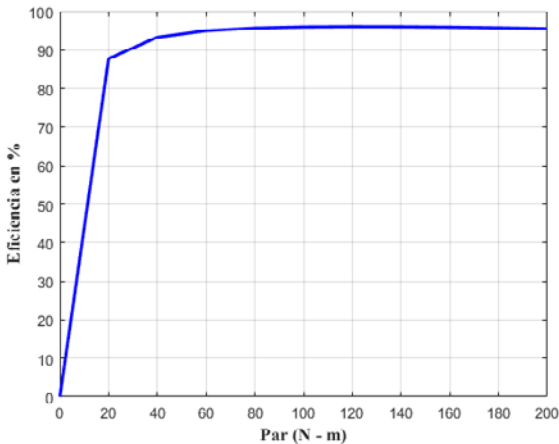


Figura 3.4 Gráfica de la eficiencia contra el par aplicado.

3.4 La eficiencia en un motor con sobrecarga

Ya se comentó arriba que a pesar de que los motores trabajen por debajo de su capacidad nominal, siguen siendo motores eficientes, ahora se analiza que sucede cuando el motor se sobrecarga, para este análisis la sobrecarga al motor se hace por encima del 30% de su capacidad nominal.

En la Figura 3.6 se muestra el comportamiento de un motor con sobrecarga, Se puede ver como la eficiencia se reduce ligeramente. Con este nivel de sobrecarga se obtuvo un incremento del 26% en la corriente de armadura, pero la eficiencia sólo se redujo en menos de medio punto porcentual, esto indica que, a pesar de tener una sobrecarga considerable, el motor sigue siendo eficiente. En este caso, el factor de la eficiencia no es el mejor criterio para evaluar el desempeño del motor en estas condiciones, pues con esta sobrecarga, se obtiene una corriente demasiado alta que produce calentamiento en las bobinas y que puede resultar peligroso de mantenerse durante cierto tiempo de operación en estas condiciones.

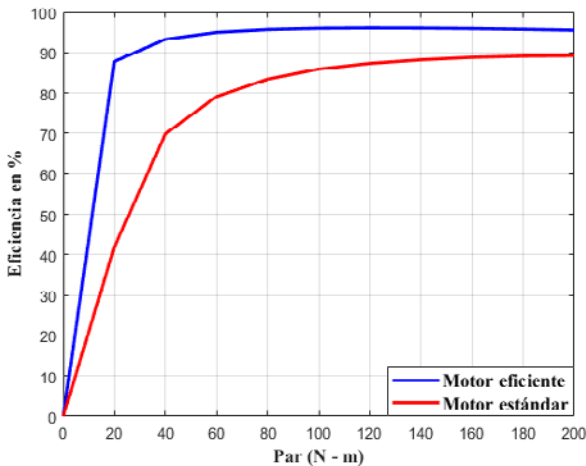


Figura 3.5 Comparación de un motor de eficiencia estándar con un motor de alta eficiencia.

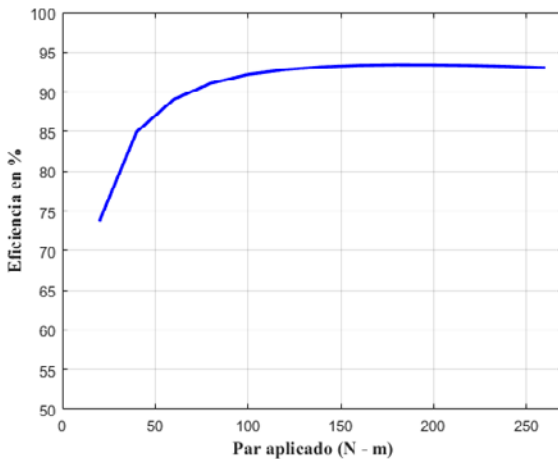


Figura 3.6 Gráfica de Eficiencia con sobrecarga en el motor.

3.5 Eficiencia y deslizamiento

Uno de los análisis que se debe hacer con mayor detenimiento en un motor de inducción es el desempeño del deslizamiento durante el proceso que va desde el arranque hasta que alcance su condición de estado estable, ya que mediante este parámetro se definen los puntos de operación básicos de la máquina. Con esta información se pueden determinar las características de las corrientes de carga, el par, la potencia de entrada, la potencia de salida y la eficiencia. En la Figura 3.7 se muestra el desempeño del deslizamiento contra la eficiencia en los motores estándar y de alta eficiencia.

Ya se había comentado que un motor de alta eficiencia mantiene bajos deslizamientos. Otro análisis que se obtiene del comportamiento del motor es que, para deslizamientos bajos, la relación Par – Deslizamiento es prácticamente lineal, por tanto, la gráfica de la eficiencia comparadas con el deslizamiento debe ser similar a la gráfica de la eficiencia con el par. Esto se puede corroborar comparando con las gráficas de figuras 3.4 y 3.5.

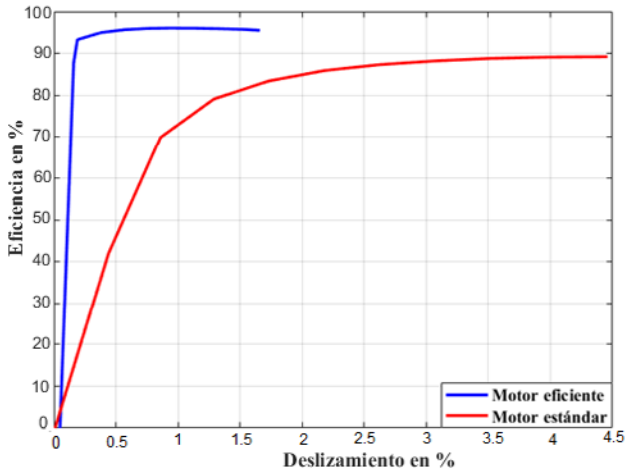


Figura 3.7 Simulación del deslizamiento en función de la eficiencia.

3.6 La eficiencia y el factor de potencia

El motor eléctrico es una máquina que transforma energía eléctrica en energía mecánica y en calor. La energía eléctrica consumida por el motor se compone de energía activa o potencia real y energía pasiva o potencia reactiva, estos dos componentes son los que determinan el factor de potencia del motor.

La energía que se transforma en calor se considera energía no útil y se debe reducir, la eficiencia del motor eléctrico tiene que ver con la forma de aprovechar al máximo potencia útil del motor y reducir al mínimo las pérdidas por calor.

Factor de potencia y eficiencia son dos términos que indican el buen desempeño de un motor, desafortunadamente, por su principio de funcionamiento, el motor es una máquina inductiva y no se puede evitar tener un bajo o regular factor de potencia. Por otro lado, los diseños de las máquinas eficientes se han orientado a reducir todos los efectos que puedan tener pérdidas de energía en forma de calor. Pero el tener un motor eficiente no indica tener un motor con un buen factor de potencia, en la gráfica de la Figura 3.8 donde se muestra que el mejor factor de potencia

lo tiene el motor estándar. Si una industria instala motores eléctricos de alta eficiencia, podrá tener ahorros significativos en el consumo de la energía útil del motor, pero tendrá que compensar la potencia reactiva producida en su funcionamiento.

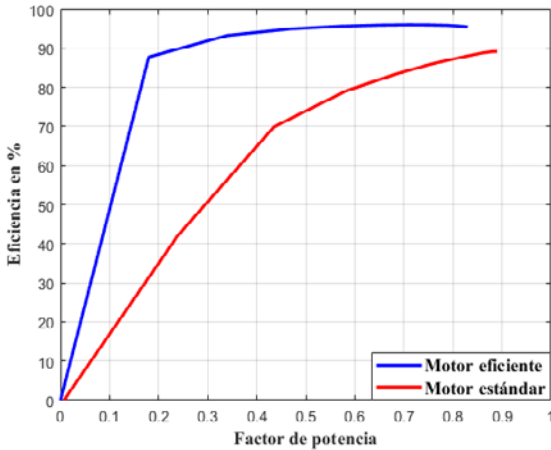


Figura 3.8 Simulación de la variación de la eficiencia respecto al factor de potencia.

3.7 La corriente en el motor eficiente

Desde que arranca hasta que obtiene su carga nominal y durante el tiempo que permanece en operación, la corriente del motor es el parámetro más vigilado y que más protecciones requiere.

Un motor eficiente tiene mayor corriente nominal que un motor estándar, también su corriente de arranque y su corriente transitoria de conexión (corriente de inrush) son más altas. La relación entre la corriente de arranque y la corriente nominal generalmente es mayor conforme se aumenta la eficiencia de un motor.

La corriente de arranque y el inrush no son relevantes en motores de pequeñas potencias, pero en motores de 50 Hp o mayores, se requiere implementar protecciones adicionales que

permitan omitir el efecto de estos dos transitorios en la red durante el proceso de arranque.

De la simulación se obtienen las siguientes figuras 3.9, y 3.10, y con los datos colectados se obtiene la Tabla 3.3, que facilita hacer el comparativo.

Motor	Arranque	En vacío	Plena carga
Estándar	385 A	18.85 A	54.25 A
Eficiente	415 A	27.09 A	58.40 A

Tabla 3.3 Comparación de las corrientes de un motor eficiente y uno estándar.

En el motor eficiente La corriente de arranque es 7.8%, mayor, la corriente en vacío es 43.71% mayor y la corriente de plena carga es 7.25% mayor.

La corriente de inrush es un dato que no proporciona el fabricante y es algo complejo de obtener.

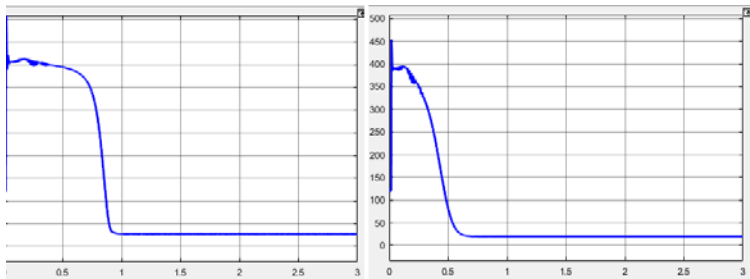


Figura 3.9 Gráficas, obtenidas por simulación, de la corriente de arranque en vacío, a la derecha el motor eficiente, a la izquierda el motor estándar.

En la Figura 3.10 se observa la mayor velocidad que se obtiene al tener un motor eficiente, pero con una corriente mayor.

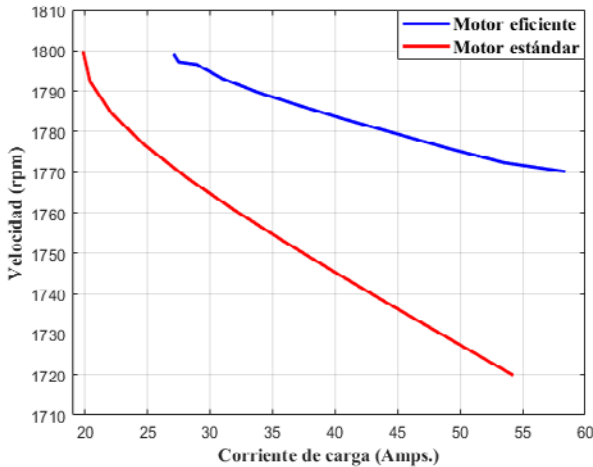


Figura 3.10 Simulaciones para comparar las características velocidad-corriente de carga entre motores eficiente y estándar.

3.8 Las pérdidas en el motor eficiente

Las pérdidas en devanados del estator y rotor representan alrededor del 50% de las pérdidas totales en un motor de inducción, por lo que la eficiencia del motor debe poner mucha atención en estas pérdidas. En el párrafo anterior se comprobó que la corriente en un motor eficiente es mayor que en un motor estándar, y las pérdidas en el cobre de los devanados dependen del cuadrado de la corriente, pero si comparamos corrientes en motor eficiente y motor estándar, se puede verificar que la corriente en el motor eficiente aumenta solo en un pequeño porcentaje respecto al motor estándar, por otro lado, las técnicas y materiales utilizados en los motores eficientes permiten disminuir en un alto porcentaje las resistencias internas que en el motor estándar, este factor termina dominando en el producto de la corriente al cuadrado por la resistencia y con esto permitir reducir las pérdidas eléctricas en los devanados del motor eficiente.

En las figuras 3.11 y 3.12 se muestran las gráficas donde se puede observar el efecto de tener bajas resistencias para reducir las pérdidas en los devanados. En la Tabla 4.4 se muestran de

manera cuantitativa los cambios entre el motor eficiente y el motor estándar.

Motor	Pérdidas en estator	Pérdidas en rotor
Eficiente	696 W	716 W
Estándar	768 W	1677 W

Tabla 4.4. Simulación de pérdidas en el cobre de un motor eficiente y uno estándar.

De los datos obtenidos, las reducciones de las pérdidas en el motor eficiente son del siguiente orden:

En el estator hubo una disminución del 9.4%

En el rotor hubo una disminución del 57.3%

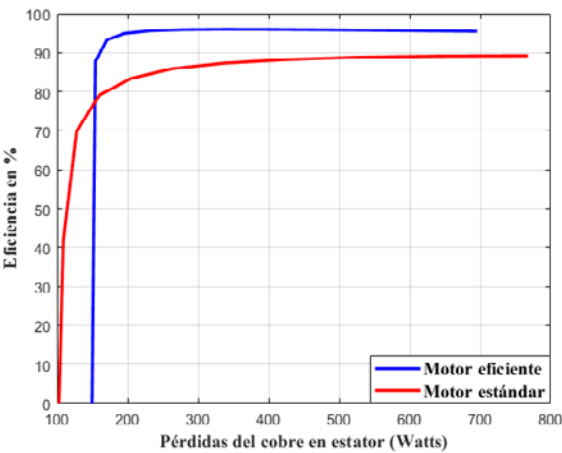


Figura 3.11 Pérdidas del cobre en estator entre un motor eficiente y un motor estándar.

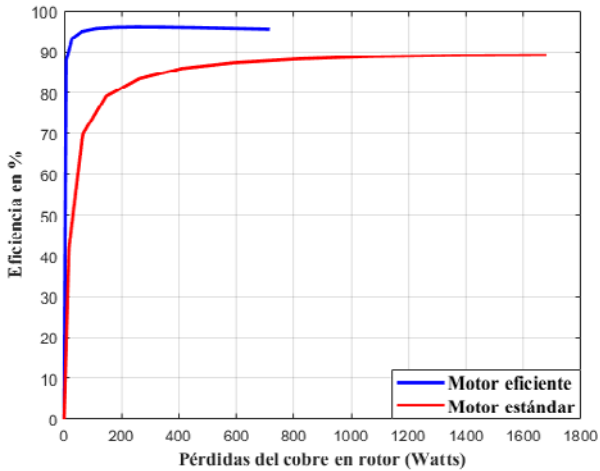


Figura 3.12 Pérdidas del cobre en rotor entre un motor eficiente y un motor estándar.

Resumen

Dado que los proyectos sustentables son una exigencia normativa a nivel no solo técnico sino también jurídico, en este capítulo se desarrolla la simulación de un motor de alta eficiencia y se compara, atendiendo su desempeño, con un motor de eficiencia estándar similar al que se trató en los capítulos anteriores. La intención es comprobar los aspectos teóricos de un motor eficiente mediante el análisis de las gráficas de desempeño.

El método seguido consiste simplemente en generar, mediante simulación, las curvas de desempeño de un motor estándar y repetir la simulación convirtiendo el motor estándar en un motor de alta eficiencia mediante la modificación de algunos de sus parámetros, principalmente los resistivos.

Para poder conjuntar todos estos conceptos aquí vertidos, el fundamento son las normas de la IEEE, y la literatura que publican los fabricantes en las secciones de ingeniería de sus catálogos. También se utiliza la información de algunos artículos científico-técnicos relativos al tema. Las simulaciones nos permiten verificar empíricamente y comprobar el cumplimiento de la teoría.

Referencias

- [1] ABB Power and productivity for a better world, Cuaderno de aplicaciones técnicas n° 6, Barcelona: ABB, 2006.
- [2] Electromotores y bombas industriales S. A. de C. V., «Electromotoresybombas.org,» Servicios y Reparaciones, 09 09 2018. [En línea]. Available: Electromotoresybombas.org. [Último acceso: 15 01 2020].
- [3] Energía Controlada de México, S.A. de C.V., «Energía Controlada de México, S.A. de C.V.,» Qué es un motor?, 2 09 2019. [En línea]. Available: <https://energiacontrolada.com/faqs.php#collapse3>. [Último acceso: 22 02 2020].
- [4] M. Á. Rodríguez Pozueta, «Universidad de Cantabria,» [En línea]. Available: <https://personales.unican.es/rodrigma/PDFs/campo%20magn%20entrehierro%20caminos.pdf>. [Último acceso: 22 Mayo 2018].
- [5] S. J. Chapman, *Máquinas Eléctricas*, 5 ed., México D. F: McGraw-Hill, 2012.
- [6] A. E. Fitzgerald, C. J. Kingsley y U. S. E, *Máquinas Eléctricas*, 6 ed., Madrid: McGraw Hill, 2004.
- [7] P. C. Krause, O. Wasynczuk y S. D. Sudhoff, *Analysis of Electric Machinery and drive systems*, 2 ed., Piscataway: Wiley Interscience, 2002.
- [8] IEEE, «IEEExplore Digital Library,» 1996. [En línea]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/587531>. [Último acceso: 23 Junio 2018].
- [9] B. U. S. Motors, «Motores de Eficiencia Premium Super-E,» 02 2007. [En línea]. Available: <http://www.baldordistribuidor.com.mx/MOTORES%20EFICIENCIA%20PREMIUM.pdf>.
- [10] W. S. U. E. Program, «Premium Efficiency Motor Selection and Application Guide,» 04 2014. [En línea]. Available: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/04/f15/amo_motors_handbook_web.pdf. [Último acceso: 15 Enero 2018].

- [11] V. M. D. Hernández, «Teoría Básica de la CFP,» 2015. [En línea]. Available: <http://rodisa.com.mx/ArchivosPagWEB/Capacitores.pdf>. [Último acceso: 22 Diciembre 2018].
- [12] A. Huges, Electric Motors and drives. *Fundamental, types and applicactios*, 3 ed., Burlintong: Elsevier, 2006.
- [13] J. J. Cathey, Máquinas eléctricas. *Análisis y diseño aplicando Matlab*, México D. F.: McGraw - Hill Interamericana, 2002.
- [14] J. M. Aller, *Máquinas Eléctricas Rotativas*, Valle de Sartenas: Equinoccio, 2004.
- [15] C. K. Alexander y S. N. O. Mathew, *Fundamentals of Electric Circuits*, New York: McGraw Hill, 2009.
- [16] A. I. & A. & S. I. Adekitan, «The performance of a 3-Phase Induction Machine under Unbalance Voltage Regime,» *Journal of Engineering Science and Tecnology Reviw*, vol. 10, pp. 136 - 143, 2017.
- [17] A. I. Adekitan, B. Adekutan, T. Shomefun y T. Aligbe, «Cost implication of Line Voltage variation on Three Phase Induction Motor Operation,» *TELEKOMNIKA*, pp. 1 - 9, 2018.
- [18] C. Saravanan, J. Sathiswar y S. Raja, «Performance of the Three Phase Induction Motor using Modified Stator Winding,» *International Journal of Computer Applications*, pp. 1 - 4, 2012.
- [19] W. Motors, «Motores Eléctricos Guía de Especificación,» 2016. [En línea]. Available: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h6e/h82/WEG-motores-electricos-guia-de-especificacion-50039910-brochure-spanish-web.pdf>.
- [20] M. Altaira, Artist, *Efficiency Improvement of Three Phase Squirrel Cage Induction Motor by Controlling the Applied Voltage to the Stator Using Simulink Models*. [Art]. Colorado State University, 2018.
- [21] J. Pimienta, «Sistemas de Compensación,» 30 Agosto 2017. [En línea]. Available: <https://new.abb.com/docs/>

librariesprovider78/eventos/abb-high-voltage-customer-day-2017/sistemas-de-compensacion-para-lineas-de-distribucion.pdf?sfvrsn=d13f9612_2. [Último acceso: Diciembre 2018].



Capítulo IV

Compensación de reactivos en el motor de inducción

4.1 Importancia de la compensación

Para empezar este tema, se podría preguntar ¿porque el factor de potencia en un motor de inducción no es unitario? O ¿por qué no se diseña un motor de inducción con factor de potencia unitario? Esto facilitaría muchas cosas y ahorraría mucho dinero.

Como respuesta, podemos decir que el motor se llama de inducción porque en él se desarrolla un fenómeno electromagnético muy fuerte que hace que el motor funcione y que impide que se logre este propósito, dentro de los conceptos más elementales podemos establecer es que al energizarse las bobinas del estator, por inducción electromagnética se producen corrientes en el circuito del estator. Los aspectos magnéticos son temas de matemáticas no lineales, y generan lo que se llama reactancias inductivas, que de lo aprendido en circuitos eléctricos de corriente alterna, uno de sus efectos principales es retrasar el ángulo de la corriente respecto al voltaje. Precisamente de este retraso nace el concepto de factor de potencia, para el caso de las cargas inductivas, este se considera en atraso porque propician que la onda corriente sinusoidal se atrase a la onda de voltaje.

¿Y cómo se desarrolla el factor de potencia durante el funcionamiento del motor? En vacío el factor de potencia es muy bajo (muy atrasado) no mayor a 0.2, cuando el motor adquiere carga el factor de potencia empieza a crecer y debe alcanzar su valor más alto (poco atrasado) cerca de carga nominal.

4.2. Teoría de la compensación de reactivos

Siguiendo con las preguntas, otras importantes podrían ser:

- ▶ ¿Cuál es la relación entre la eficiencia de un motor y su factor de potencia?
- ▶ ¿Son los motores de alta eficiencia los que tienen un factor de potencia más elevado?

Si se revisan los catálogos de los fabricantes de motores de alta eficiencia, vemos que los factores de potencia de estos motores rondan el 0.85, lo cual se puede considerar un factor de potencia (fp) “no muy eficiente”.

La explicación es simple, sabemos que la eficiencia se define como la relación entre la potencia de salida contra la potencia de entrada. [11]

$$Eficiencia = \frac{Potencia\ de\ salida}{Potencia\ de\ entrada} \quad (4.1)$$

La potencia de entrada se calcula por:

$$Potencia\ de\ entrada = \sqrt{3} * V_L * I_L * fp \quad (4.2)$$

Al sustituir la ecuación (4.2) en la ecuación (4.1), y despejando el factor de potencia (fp), se obtiene:

$$fp = \frac{Potencia\ de\ salida}{\sqrt{3} * V_L * I_L * Eficiencia} \quad (4.3)$$

Donde claramente se ve que la relación entre eficiencia y factor de potencia son inversamente proporcionales.

Si una empresa instala motores de alta eficiencia, va a requerir de compensación de reactivos mediante una instalación de banco de capacitores para mejorar el factor de potencia de su sistema, y así evitar las multas que establecen las compañías suministradoras de energía eléctrica por el bajo factor de potencia.

La energía eléctrica cuando se aplica a un motor, se convierte en trabajo mecánico, que demanda de la fuente de suministro de tensión dos tipos de potencias:

Potencia real (P), en watts, que es la potencia eléctrica que se convierte en trabajo mecánico efectivo.

Potencia reactiva (Q), en volt – amperes reactivos, que es la energía que utiliza el motor para producir su energía magnética que le permite mantener las cargas inductivas.

Y además se puede determinar la potencia aparente (S), en volt – amperes, que representa la suma vectorial de las potencias real y reactiva.

Estas tres potencias se representan gráficamente mediante el “triángulo de potencias”, el cual se muestra en la Figura 4.1.

El factor de potencia (fp) se define como el $\cos \theta$, es decir

$$fp = \cos \theta = \frac{\text{Potencia Real}}{\text{Potencia Aparente}} \quad (4.4)$$

La relación entre el fp y los elementos pasivos de un circuito eléctrico son:

Las cargas puramente resistivas tienen un $fp = 1.0$. No existe un desfaseamiento entre el ángulo del voltaje y el ángulo de la corriente.

Las cargas predominantemente inductivas presentan un fp atrasado. La corriente se atrasa al voltaje en un ángulo de θ grados.

Las cargas predominantemente capacitivas presentan un fp adelantado. La corriente se adelanta al voltaje en un ángulo de θ grados.

Debe aclararse que no existen las cargas puramente inductivas o puramente capacitivas, pero se puede tener un sistema con condiciones de una carga puramente resistiva, es decir, con un factor de potencia unitario si se compensa la potencia reactiva, tanto inductiva como capacitiva.

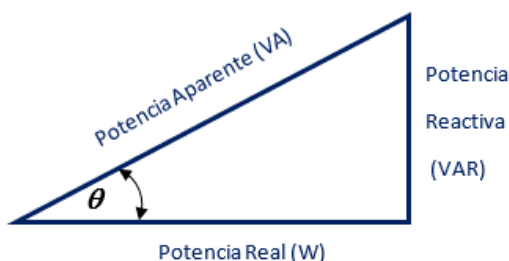


Figura 4.1 Triángulo de potencias.

Como sabemos, los motores de inducción, por su simplicidad de construcción, su robustez, su velocidad prácticamente constante, su durabilidad y bajo costo son ampliamente usados a nivel industrial, pero por su principio de funcionamiento, el motor es una carga predominantemente inductiva y su factor de potencia es bajo, por lo que para poder tener un sistema eficiente en cuanto a un alto factor de potencia se refiere, es necesario compensar los reactivos inductivos producidos por la acción motora, mediante el uso de capacitores.

4.3 Técnicas de la compensación de reactivos

En la Figura 4.2 se muestra la gráfica de la potencia en un circuito predominantemente inductivo, hay potencia que va de la fuente al motor, lo que se considera un trabajo útil (parte positiva de la potencia) y la que va del motor a la fuente (potencia negativa) lo cual no representa un trabajo útil, siendo la potencia promedio baja.

Al conectar capacitores al circuito del motor, estos producen una corriente reactiva capacitiva que se opone a la corriente reactiva inductiva producida por la inductancia del motor, mejorando así el factor de potencia. Esta acción sucede sin modificar el valor que toma la potencia real durante la operación del motor. Cabe mencionar que además de la potencia real, hay otras características que tampoco cambian en el funcionamiento del motor durante la compensación, por ejemplo, la velocidad y la potencia mecánica. La velocidad depende del voltaje aplicado y la potencia mecánica depende de la carga en el motor. Pero el

factor de potencia si cambia al variar el voltaje, a mayor voltaje el factor de potencia disminuye.

Los bancos de capacitores tienen otras ventajas en su aplicación, pueden, por ejemplo, además de mejorar el factor de potencia de una instalación, mejorar el perfil del voltaje de la fuente o filtrar armónicos, todo esto con bancos que pueden ser fijos o automáticos.

En ese documento, el uso de capacitores solo se enfocará a la aplicación de mejoramiento del factor de potencia de un motor específico.

Como en todas las aplicaciones, se debe tener en cuenta que en el manejo del parámetro “factor de potencia”, el voltaje de la red juega un papel fundamental y se requiere cuidar la calidad del voltaje, ya que una variación en la tensión de suministro producirá variaciones en el factor de potencia del motor, pero en forma inversamente proporcional, es decir, a menor voltaje mejor factor de potencia y viceversa. En la gráfica de la Figura 4.3 se muestra este efecto.

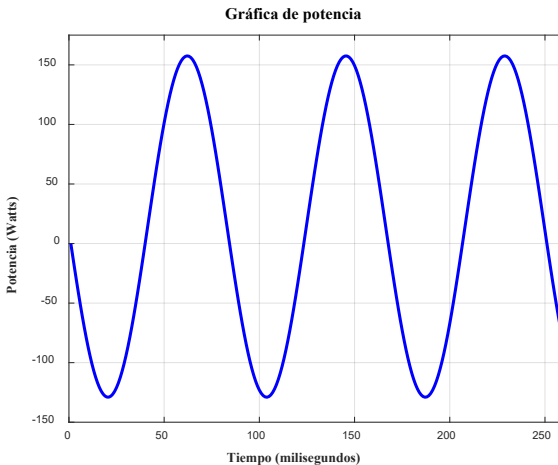


Figura 4.2 Energía útil y energía reactiva en un circuito predominantemente inductivo.

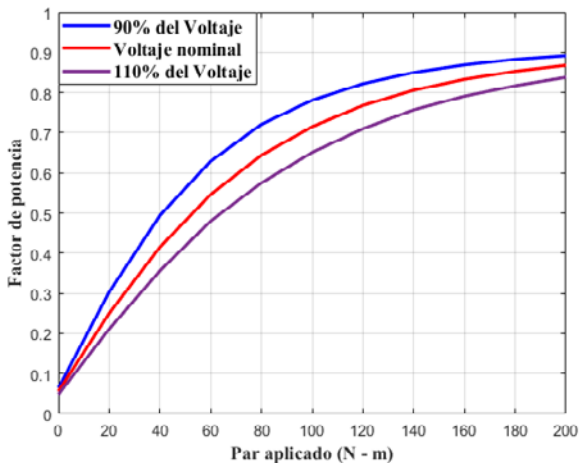


Figura 4.3 Factor de potencia a diferentes voltajes.

Es importante recordar que los capacitores son dispositivos que almacenan energía y que esta energía almacenada va a trabajar con el motor eléctrico que es un dispositivo predominantemente inductivo y que también almacena energía, sabemos también que la corriente capacitiva del banco se opone a la corriente inductiva del motor, por lo que la interacción de estas energías almacenadas genera algunos efectos que pueden mejorar el desempeño de la instalación o que pueden generar efectos adversos. Por esto, se debe dimensionar cuidadosamente la capacidad de potencia reactiva a instalar para poder hacer una compensación de reactivos adecuada.

Situaciones que se pueden presentar con la aplicación de bancos de capacitores a motores de inducción trifásicos.

- ▶ En motores de baja potencia no se recomienda la compensación. Un motor pequeño requerirá una compensación pequeña, lo cual puede resultar una solución económicamente no muy atractiva.
- ▶ Es recomendable instalar capacitores fijos y que solo funcionen cuando el motor esté en operación, es decir, se conecten o desconecten con el mismo interruptor del motor. La experiencia ha demostrado que la compensación de

reactivos es mejor cuando un motor tiene su propio banco de capacitores.

- ▶ Para motores de media y gran potencia, no es recomendable ni económica ni técnicamente compensar por encima del 0.95 en atraso. Un exceso de capacitancia va a tener efecto en las cargas periféricas conectadas a la misma fuente, lo cual no debe ser el propósito para controlar el factor de potencia de un motor.
- ▶ Una sobre-compensación puede producir una sobreexcitación en el motor y este puede actuar como generador. Cuando se desconecta el motor de la línea, aunque el motor y el banco de capacitores están desenergizados, el motor al seguir girando antes de pararse mantiene un voltaje generado internamente, que al combinarse con la energía almacenada en el banco conectado en paralelo con el motor, este puede mantener el voltaje en las terminales. Cuando el motor se energiza nuevamente, las dos tensiones se pueden sumar y producir efectos transitorios que pueden dañar el banco o la instalación misma.

La siguiente liga presenta una explicación del factor de potencia fácil de entender:

<https://www.youtube.com/watch?v=7XWf96gg>

Para mostrar los efectos de la compensación de potencia reactiva del motor de inducción, se van utilizar los datos obtenidos en la simulación el motor de alta eficiencia de 50 HP.

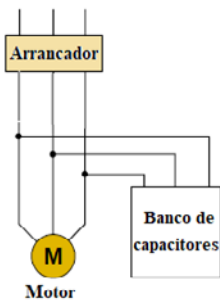


Figura 4.4. Conexión del banco de capacitores al motor de inducción.

Para la compensación se puede apoyar de la Figura 4.5, donde se muestra el diagrama fasorial de las potencias real, reactiva y aparente que participan en este proceso.

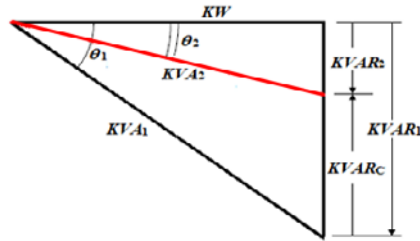


Figura 4.5 Diagrama fasorial auxiliar para la compensación de reactivos.

Donde:

KVA_1 Potencia aparente sin compensación reactiva.

KVA_2 Potencia aparente después de la compensación reactiva.

KW Potencia real generada por el motor a plena carga.

$KVAR_1$ Potencia reactiva sin compensación reactiva.

$KVAR_2$ Potencia reactiva después de la compensación reactiva.

$KVAR_c$ Potencia reactiva compensada.

θ_1 Factor de potencia sin compensación reactiva.

θ_2 Factor de potencia con compensación reactiva.

La potencia reactiva de compensación Q_c requerida se obtiene mediante la ecuación:

$$Q_c = P^*(\tan \theta_1 - \tan \theta_2) \quad (4.5)$$

4.4 Simulación de la compensación de reactivos

Los datos que se obtuvieron durante la simulación del motor de alta eficiencia, con carga nominal y sin compensación en el capítulo anterior, son los siguientes.

460 V, 200 N-m, $P_{ent} = 38571.3$ W, $Q_{ent} = 26067.4$ VAR, $S = 46553.9$ VA, $I_a = 58.4$ A, $fp = 0.83$ (-), Eficiencia = 93.5 %, $s = 1.66$ %

Y se va a comparar con el mismo motor en el que se adiciona un banco de capacitores para obtener un factor de potencia de 0.95 en atraso, por tanto:

Se tiene un ángulo $\theta = 33.9^\circ$ y se requiere un ángulo de 18.184° , la potencia reactiva de compensación es:

$$Q_C = 38571.3 * (\tan 33.9 - \tan 18.184) = 13241.17 \text{ KVAR.}$$

La reactancia capacitiva del banco se obtiene mediante la expresión:

$$C = \frac{Q_C}{V^2 * \omega} \quad (4.6)$$

$$C = \frac{13241.17}{460^2 * 377} = 166 \mu F$$

Se requiere un banco con capacitancias de 166 μF para poder compensar a factor de potencia de 0.95 en atraso. Al compensar los reactivos en un motor de inducción, literalmente se está reduciendo la potencia reactiva Q del motor. Para el ejemplo que se está trabajando, el motor compensado reduce su potencia reactiva pasando $Q = 26067.4$ VAR con $fp = 0.869$ en atraso a 13241.17 VAR con $fp = 0.95$ en atraso. Los cambios que se producen de modificar el factor de potencia mediante la compensación de reactivos se muestran en las siguientes gráficas.

La Figura 4.5 muestra la variación de la potencia reactiva, con y sin compensación, nótese la considerable cantidad de potencia reactiva que se tuvo que compensar para lograr el factor de potencia especificado. Cabe mencionar que mientras mayor cantidad de potencia reactiva se compense, el equipo de compensación es más caro, por lo que no siempre se va a compensar a un factor de potencia tan alto por los altos costos que esto representa. En esta aplicación la compensación es fija y no se desarrolla de manera automática, ya que el motor de inducción representa una carga fija.

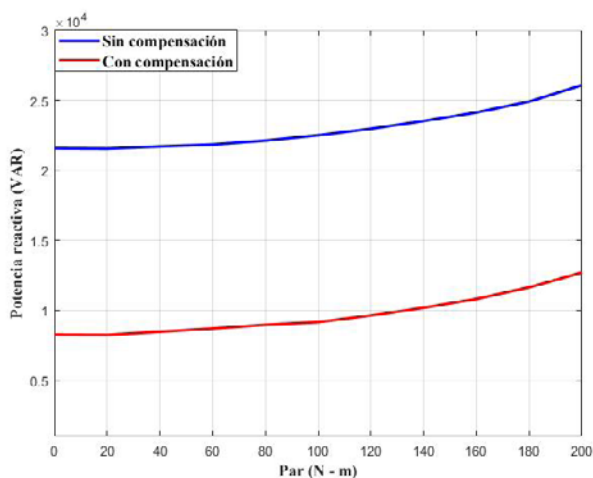


Figura 4.5. Cambio de Q al variar el factor de potencia de 0.83 a 0.95 en atraso.

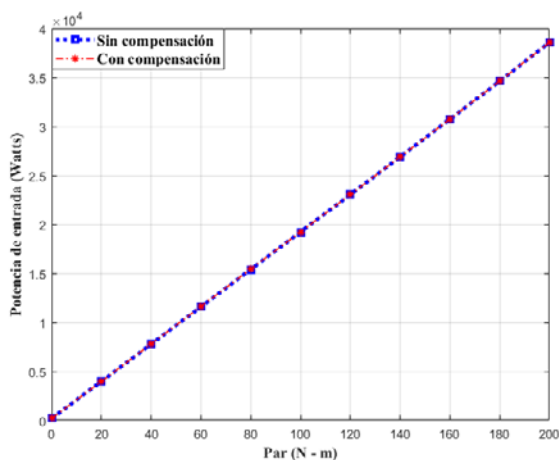


Figura 4.6 Potencia de entrada al motor con y sin compensación.

En figuras 4.6 y 4.7 se muestran las corridas para potencia y corriente con y sin compensación, se puede observar que tal como se había establecido anteriormente, el incluir la carga del banco de capacitores al circuito del motor, no implica un aumento de la potencia real ni de la corriente de carga que ve el arrancador del motor.

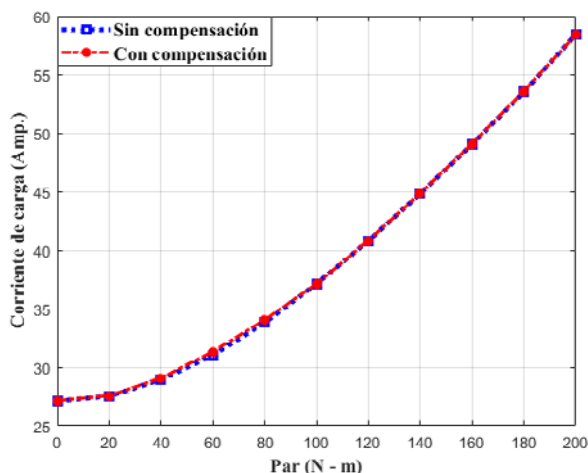


Figura 4.7 Corriente del motor con y sin compensación de reactivos.

Al observar las gráficas se puede ver que estas tienen una trayectoria ascendente, esto indica que, al someter al motor a una sobrecarga, este mejorará su factor de potencia. Si este motor se somete a sobrecargas, la potencia real sigue creciendo, pero la potencia reactiva no crece en la misma proporción, por lo que se tendrá un mejor factor de potencia, pero con la lamentable consecuencia de que operar un motor con sobrecarga es una condición no indicada para la vida útil del motor.

La Figura 4.8 muestra el comportamiento de ambos factores de potencia al variar la carga en el motor, en el arranque se obtiene un factor de potencia muy bajo, esto se debe a que con cargas bajas, la potencia real es pequeña comparada con la potencia reactiva, que prácticamente es constante durante todo el proceso de arranque. Revísese también que, conforme la carga se incrementa, lo hace también la potencia real y factor de potencia empieza a mejorar. Esto nos da la indicación de que el mejor factor de potencia se obtiene en valores cercanos a la carga nominal del motor.

En la gráfica de la Figura 4.9 se muestra el desempeño que tienen ambas características del factor de potencia al incremento de la carga, al igual que en el análisis con corrientes, con el incremento del par aplicado la potencia real del motor tiene el

mismo comportamiento, y las curvas tienen trayectoria ascendente, pero se sigue reiterando que el mejor factor de potencia posible se obtiene cuando se aplica el par nominal al que fue diseñado el motor.

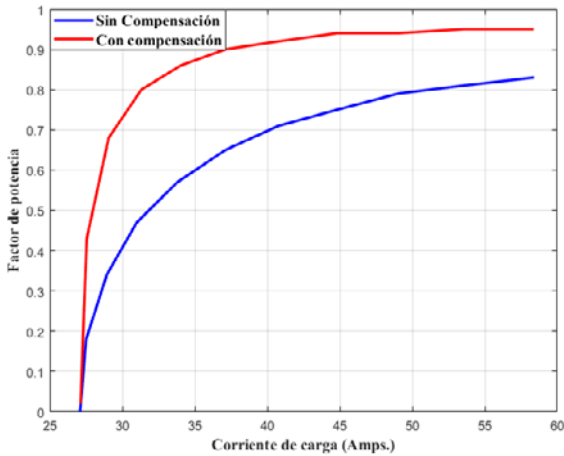


Figura 4.8 Corriente de carga a diferentes factores de potencia.

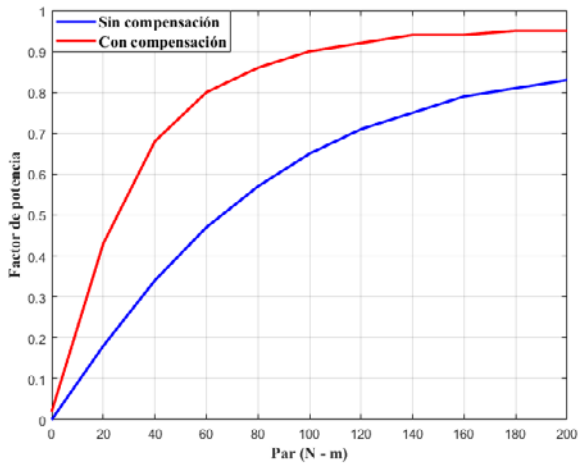


Figura 4.9 Par – factor de potencia con y sin compensación.

En la Figura 4.10 se muestra el comportamiento de la velocidad en revoluciones por minuto (rpm) para los dos factores de potencia que se están manejando, tal como se muestra en la Figura 4.11, la velocidad con ambos factores de potencia es prácticamente la misma, por lo que se deduce que la variación del factor de potencia mediante una fuente externa, no afecta la velocidad mecánica del motor de inducción.

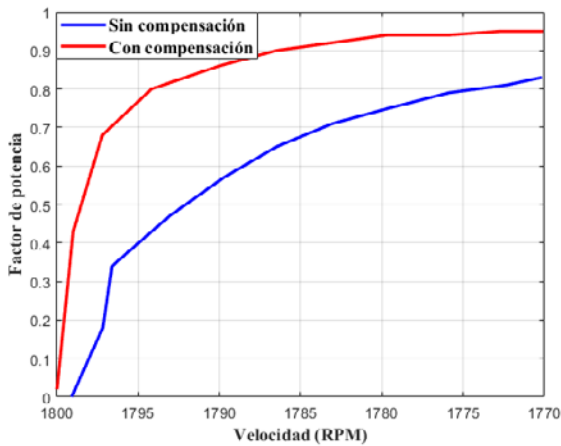


Figura 4.10 Factor de potencia contra velocidad.

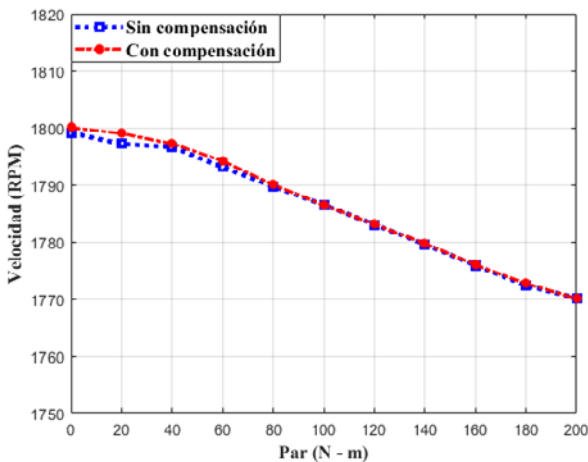


Figura 4.11 Comportamiento de la velocidad con y sin compensación.

Resumen

En este apartado se comentaron los beneficios de la compensación de reactivos en una red eléctrica, se aplican los conceptos teóricos para aplicar la compensación de reactivos para el motor de alta eficiencia que se trabaja en este documento a partir del capítulo 3, donde se obtuvo un factor de potencia bajo y se propone mejorarlo. Mediante simulaciones se analizan y comentan las gráficas obtenidas al comparar el factor de potencia con otros parámetros importantes del motor de inducción.

Como conclusión se puede establecer que la compensación de reactivos en un motor de inducción se hace necesaria no para mejorar el desempeño del motor, sino para mantener un buen factor de potencia en el sistema.

Que los efectos internos de la compensación de potencia reactiva mediante un banco de capacitores exclusivo para el motor, no tiene efecto en la variación de la velocidad, la potencia real, la corriente o el deslizamiento del motor, y esta técnica de compensación solo se utiliza para reducir la potencia reactiva, y a la vez la potencia aparente del motor.

Referencias

- [1] ABB Power and productivity for a better world, Cuaderno de aplicaciones técnicas n° 6, Barcelona: ABB, 2006.
- [2] Electromotores y bombas industriales S. A. de C. V., «Electromotoresybombas.org,» Servicios y Reparaciones, 09 09 2018. [En línea]. Available: Electromotoresybombas.org. [Último acceso: 15 01 2020].
- [3] Energía Controlada de México, S.A. de C.V., «Energía Controlada de México, S.A. de C.V.,» Qué es un motor?, 2 09 2019. [En línea]. Available: <https://energiacontrolada.com/faqs.php#collapse3>. [Último acceso: 22 02 2020].
- [4] M. Á. Rodríguez Pozueta, «Universidad de Cantabria,» [En línea]. Available: <https://personales.unican.es/rodrigma/PDFs/campo%20magn%20entrehierro%20caminos.pdf>. [Último acceso: 22 Mayo 2018].
- [5] S. J. Chapman, Máquinas Eléctricas, 5 ed., México D. F: McGraw-Hill, 2012.
- [6] A. E. Fitzgerald, C. J. Kingsley y U. S. E, Máquinas Eléctricas, 6 ed., Madrid: McGraw Hill, 2004.
- [7] P. C. Krause, O. Wasynczuk y S. D. Sudhoff, Analysis of Electric Machinery and drive systems, 2 ed., Piscataway: Wiley Interscience, 2002.
- [8] IEEE, «IEEExplore Digital Library,» 1996. [En línea]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/587531>. [Último acceso: 23 Junio 2018].
- [9] B. U. S. Motors, «Motores de Eficiencia Premium Super-E,» 02 2007. [En línea]. Available: <http://www.baldordistribuidor.com.mx/MOTORES%20EFICIENCIA%20PREMIUM.pdf>.
- [10] W. S. U. E. Program, «Premium Efficiency Motor Selection and Application Guide,» 04 2014. [En línea]. Available: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/04/fl5/amo_motors_handbook_web.pdf. [Último acceso: 15 Enero 2018].

- [11] V. M. D. Hernández, «Teoría Básica de la CFP,» 2015. [En línea]. Available: <http://rodisa.com.mx/ArchivosPagWEB/Capacitores.pdf>. [Último acceso: 22 Diciembre 2018].
- [12] A. Huges, Electric Motors and drives. Fundamental, types and applicatios, 3 ed., Burlintong: Elsevier, 2006.
- [13] J. J. Cathey, Máquinas eléctricas. Análisis y diseño aplicando Matlab, México D. F.: McGraw - Hill Interamericana, 2002.
- [14] J. M. Aller, Máquinas Eléctricas Rotativas, Valle de Sartenas: Equinoccio, 2004.
- [15] C. K. Alexander y S. N. O. Mathew, Fundamentals of Electric Circuits, New York: McGraw Hill, 2009.
- [16] A. I. & A. & S. I. Adekitan, «The performance of a 3-Phase Induction Machine under Unbalance Voltage Regime,» *Journal of Engineering Science and Tecnology Reviw*, vol. 10, pp. 136 - 143, 2017.
- [17] A. I. Adekitan, B. Adekutan, T. Shomefun y T. Aligbe, «Cost implication of Line Voltage variation on Three Phase Induction Motor Operation,» *TELEKOMNIKA*, pp. 1 - 9, 2018.
- [18] C. Saravanan, J. Sathiswar y S. Raja, «Performance of the Three Phase Induction Motor using Modified Stator Winding,» *International Journal of Computer Applications*, pp. 1 - 4, 2012.
- [19] W. Motors, «Motores Eléctricos Guía de Especificación,» 2016. [En línea]. Available: <https://static.weg.net/media/downloadcenter/h6e/h82/WEG-motores-electricos-guia-de-especificacion-50039910-brochure-spanish-web.pdf>.
- [20] M. Altaira, Artist, *Efficiency Improvement of Three Phase Squirrel Cage Induction Motor by Controlling the Applied Voltage to the Stator Using Simulink Models*. [Art]. Colorado State University, 2018.

- [21] J. Pimienta, «Sistemas de Compensación,» 30 Agosto 2017. [En línea]. Available: https://new.abb.com/docs/librariesprovider78/eventos/abb-high-voltage-customer-day-2017/sistemas-de-compensacion-para-lineas-de-distribucion.pdf?sfvrsn=d13f9612_2. [Último acceso: Diciembre 2018].



Rito Javier Rodríguez Lozoya

Ingeniero Industrial Electricista por el Instituto Tecnológico de Chihuahua, Maestro en Ciencias con especialidad en Ingeniería Electrónica por la Universidad de las Américas Puebla y realizó una especialidad en Competencias Docentes en la Universidad Pedagógica Nacional.

Profesor Investigador en la División Académica de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco desde 1986, se desempeña en el área de máquinas eléctricas apoyando a los programas educativos de Ingeniería Mecánica Eléctrica e Ingeniería Eléctrica y Electrónica.

Su experiencia laboral refiere trabajos en la Comisión Federal de Electricidad donde participó en las áreas de construcción, puesta en servicio y mantenimiento eléctrico de plantas termoeléctricas. Tuvo también una breve estancia como supervisor de ingeniería en la terminal marítima “Dos Bocas” de Petróleos Mexicanos (PEMEX) en Paraíso, Tabasco.

Rubén Vásquez León

Técnico Electromecánico por el CECYT No. 169 e Ingeniero Mecánico Electricista por la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, distinguido como el mejor promedio de su generación.

Trabajó en la Subdirección Técnica de Estudios y Proyectos de la Secretaría de Comunicaciones, Asentamientos Humanos y Obras Públicas del Gobierno del Estado de Tabasco y participó en el Proyecto de Excelencia y Superación Académica de la UJAT.

Desde 1986 es docente en la División Académica de Ingeniería y Arquitectura de la UJAT, ha impartido cátedra tanto el licenciatura como en posgrado. De igual forma, ha colaborado y dirigido diversos proyectos de investigación. En 2002 ganó el premio al Mérito Científico de la UJAT y, en 2006, fue galardonado con el Premio Estatal de Ingeniería del Estado de Tabasco.



Wilfrido Miguel Contreras Sánchez
Secretario de Investigación, Posgrado y Vinculación

Pablo Marín Olán
Director de Difusión y Divulgación Científica y Tecnológica

Analuisa Kú Ortíz
Jefa del Departamento Editorial de Publicaciones No Periódicas

