

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA ELÉCTRICA



Motores trifásicos de inducción, evaluación y control de pérdidas con aplicación de capacitores.

PRESENTADO POR:

RICARDO ALBERTO HENRÍQUEZ GUZMÁN

CHRISTIAN JOSÉ OLANO CENTENO

JULIO ENRIQUE SALGUERO RIVAS

PARA OPTAR AL TITULO DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

CIUDAD UNIVERSITARIA, ENERO DE 2015

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :

ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO

SECRETARIA GENERAL :

DRA. ANA LETICIA ZA VALETA DE AMAYA

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

DECANO :

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

SECRETARIO :

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERIA ELÉCTRICA

DIRECTOR :

ING. JOSÉ WILBER CALDERÓN URRUTIA

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA ELÉCTRICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO ELECTRICISTA

Título :

Motores trifásicos de inducción, evaluación y control de pérdidas con aplicación de capacitores.

Presentado por :

RICARDO ALBERTO HENRÍQUEZ GUZMÁN

CHRISTIAN JOSÉ OLANO CENTENO

JULIO ENRIQUE SALGUERO RIVAS

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

ING. ARMANDO MARTÍNEZ CALDERÓN

San Salvador, enero de 2015

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

ING. ARMANDO MARTÍNEZ CALDERÓN

ACTA DE CONSTANCIA DE NOTA Y DEFENSA FINAL

En esta fecha, 12 de diciembre de 2014, en la Sala de Reuniones de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, a las 4:00 horas, en presencia de las siguientes autoridades de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador:

1. Ing. José Wilber Calderón Urrutia
Director

Firma:


2. Ing. Salvador de Jesús Germán
Secretario

Firma:




Y, con el Honorable Jurado de Evaluación integrado por las personas siguientes:

1- Ing. Armando Martínez Calderón

2- MSc. e Ing. Luís Roberto Chávez Paz

3- Ing. Werner David Meléndez Valle

Firma:


Se efectuó la defensa final reglamentaria del Trabajo de Graduación:

Motores trifásicos de inducción, evaluación y control de pérdidas con aplicación de capacitores.

A cargo de los Bachilleres:

- Henríquez Guzmán, Ricardo Alberto

- Olano Centeno, Christian José

- Salguero Rivas, Julio Enrique

Habiendo obtenido en el presente Trabajo una nota promedio de la defensa final: 8.6

(Ocho punto Seis)

AGRADECIMIENTOS:

Le doy gracias a Dios por haberme dado vida para finalizar mis estudios, por ser mi guía, por darme sabiduría, porque todas las veces que ore él me escucho, me demostró que nunca estoy solo que siempre puedo contar con él y por mostrarme que no hay nada imposible para Él. Este logro es gracias a su bondad.

Gracias a mis padres por ese apoyo incondicional, porque siempre estuvieron conmigo cuando más los necesite por la paciencia que me tuvieron, por todos sus consejos, porque no dudaron de mí en los momentos difíciles y sobre todo por ser un excelente ejemplo de vida a seguir, a toda mi familia por sus oraciones y ánimos. Sin ellos esto no hubiese sido posible.

Le agradezco a mis compañeros Salguero y Christian por confiar en mí y tomarme en cuenta en este grupo de tesis.

A mis amigos por las tareas que juntos realizamos y por todas las veces que a mí me explicaron gracias.

Gracias Ing. Armando Calderón por la confianza, por brindarnos la oportunidad de desarrollar nuestro trabajo de graduación, por la paciencia y por permitirnos finalizar nuestro sueño.

Este triunfo no es solo mío sino de todos ustedes que Dios los bendiga.

Ricardo Alberto Henríquez Guzmán

AGRADECIMIENTOS:

A DIOS TODOPODEROSO:

Gracias Padre Celestial, por ser el motor de mi vida, mi creador y guía. Gracias por haberme hecho llegar a obtener mi título y siempre no haberme dejado que me rinda en ningún momento e iluminarme para salir adelante, porque todo lo que tengo, lo que puedo y lo que recibo es regalo que tú me lo has dado.

A MIS PADRES:

Mi padre ENRIQUE SALGUERO, por apoyarme, aconsejarme siempre y estar junto a mí cuando lo necesito, por ser un excelente PADRE, a mi madre ROSA MARÍA DE SALGUERO, por ser la persona que siempre me dio el consejo en el momento mas oportuno y la que siempre cuida para todo momento.

A MIS HERMANAS:

Arely y Roxana, por incluirme siempre en sus oraciones, en darme las fuerzas y perseverancia para lograr tener mi título.

A MI TÍA:

Marta Alicia, porque ella desde que nací ha estado en mi vida y ella ha logrado a ser como mi segunda mamá, tía has sido un gran pilar de apoyo y amor en mi vida y le doy gracias a Dios por tenerte y que seguís a mi lado.

A TODOS MIS FAMILIARES:

Y a todo aquel que de una u otra manera estuvieron pendientes del desarrollo de mi trabajo de graduación.

A MIS AMIGOS:

Gracias a ustedes que únicamente vivieron conmigo desde el inicio hasta el final de mi carrera. Ustedes que siempre me apoyaron en todo y me dieron confianza en mí mismo en todo momento.

A MIS COMPAÑEROS DE TESIS:

Gracias Ricardo y Christian, por ayudarme a terminar este sueño por obtener mi título, por haber logrado juntos este triunfo y por seguir siendo unos muy buenos amigos.

A MI ASESOR:

Ing. Armando Calderón, gracias por el apoyo y por la lucha de hacernos entender de lo maravilloso que es nuestra carrera, gracias por darnos ese empuje cuando nosotros ya estábamos rendidos.

Enrique Salguero R.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
ALCANCES	3
OBJETIVOS	4
GENERAL.....	4
ESPECÍFICOS.....	4
MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUCCIÓN.....	5
CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN MOTOR TRIFÁSICO DE INDUCCIÓN	7
PÉRDIDAS EN EL ESTATOR I^2R_1	8
PÉRDIDAS EN VACÍO.....	8
FRICCIÓN Y VENTILACIÓN	9
PÉRDIDAS EN EL NÚCLEO	9
PÉRDIDAS EN EL ROTOR I^2R_2	9
EFICIENCIA	10
CLASIFICACIÓN DE LOS MOTORES SEGÚN SU EFICIENCIA.....	10
BENEFICIOS DE LOS MOTORES DE ALTA EFICIENCIA	13
DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE CARGA Y EFICIENCIA POR EL MÉTODO DE DESLIZAMIENTO	14
CÁLCULO DE COSTOS DE OPERACIÓN DE UN MOTOR.....	15
SIMULACIÓN DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN SIMULINK	17
ANÁLISIS DE RESULTADOS DE ARRANQUE DEL MOTOR	19
ARRANQUE EN VACÍO	19
ARRANQUE A PLENA CARGA (CONSTANTE).....	20
RESULTADOS DE LA VELOCIDAD AL VARIAR EL TORQUE DE CARGA	23
CALIDAD DE LA TENSIÓN	24
DESBALANCE DE TENSIONES	24
REGULACIÓN DE TENSIÓN.....	27
EL FACTOR DE POTENCIA.....	30
CARACTERÍSTICAS, PARÁMETROS Y CONFIGURACIONES DE LOS CAPACITORES.....	32
CONDICIONES DE SERVICIO.....	32
CONDICIONES NORMALES DE SERVICIO	32
CONDICIONES ANORMALES DE SERVICIO.....	33

PARÁMETROS ESTÁNDAR.....	34
TOLERANCIA CAPACITIVA.....	34
VALORES TÍPICOS NOMINALES DE TENSIÓN, POTENCIA REACTIVA Y BIL PARA CAPACITORES	34
CAPACIDAD PARA SOPORTAR SOBRETENSIÓN Y SOBRE CORRIENTE.....	34
INFORMACIÓN DE PLACA DEL CAPACITOR	35
ESPECIFICACIONES DE LOS CONDUCTORES PARA CONECTARSE AL MOTOR	36
CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA.....	37
EFFECTOS DE LA APLICACIÓN DE CAPACITORES.....	38
LIBERACIÓN DE LA CAPACIDAD DE POTENCIA DEL TRANSFORMADOR.....	38
REDUCCIÓN DE CORRIENTES EN CONDUCTORES	40
REDUCCIÓN DE LA CAÍDA DE TENSIÓN	42
REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS ÓHMICAS EN LOS CONDUCTORES.	44
CÁLCULO DEL BANCO DE CAPACITORES PARA UN MOTOR NEMA PREMIUM DISEÑO B.....	46
MÉTODOS DE INSTALACIÓN DE CAPACITORES EN BAJA TENSIÓN	59
BANCO FIJO DE CAPACITORES.....	59
BANCO AUTOMÁTICO DE CAPACITORES	64
ESQUEMAS DE COMPENSACIÓN CON BANCOS DE CAPACITORES	65
CONEXIONES DE BANCOS DE CAPACITORES.....	67
BANCOS CONECTADOS EN DELTA.....	67
CONCLUSIONES.....	77
RECOMENDACIONES	78
BIBLIOGRAFÍA	79
ANEXOS.....	80

FIGURAS

Figura 1. Circuito equivalente por fase en un motor de inducción	7
Figura 2. Motor trifásico de inducción, 1725 RPM.....	17
Figura 3. Circuito implementado en SIMULINK.....	18
Figura 4. Diagrama fasorial de un sistema trifásico balanceado.....	24
Figura 5. Triángulos de potencias diferentes	30
Figura 6. Triángulos utilizados para la corrección del factor de potencia.....	37
Figura 7. Capacitores para corrección del factor de potencia	39
Figura 8. Triángulos de potencia	39
Figura 9. Triangulo de potencia resultante	39
Figura 10 Flujo de corrientes.....	40
Figura 11. Distancia para la cual se evaluarán las pérdidas óhmicas.....	44
Figura 12. Datos generales del motor	46
Figura 13. Datos de eficiencia y factor de potencia del motor, 460V	46
Figura 14. Diagrama de un banco de capacitores con sus respectivas protecciones	63
Figura 15. Banco de capacitores ubicado después del relé de sobrecarga.....	64
Figura 16. Compensación individual.....	65
Figura 17. Compensación central	66
Figura 18. Configuración de los bancos, delta, estrella aterrizada y estrella sin aterrizar .	67
Figura 19. Datos de placa de un motor de 50 HP	68
Figura 20. Datos de placa de un motor de 75 HP	70
Figura 21. Datos de placa de un motor de 100 HP	72
Figura 22. Datos de placa de un motor de 125 HP	74
Figura 23. Diagrama de conexión para motores de 50HP y 75HP.	76
Figura 24. Diagrama de conexión, motores de 100HP y 125HP.....	76

GRÁFICOS

Gráfico 1. Curvas características típicas para diferentes tipos de motores.....	6
Gráfico 2. Curva de magnetización de un motor de inducción comparada con la de un transformador	7
Gráfico 3. Torque-Tiempo, arranque en vacío	19
Gráfico 4. Corriente de estator-tiempo, arranque en vacío.....	20
Gráfico 5. Torque-Tiempo, carga constante.....	21
Gráfico 6. Corriente estator-tiempo, carga constante	21
Gráfico 7. Corriente del estator a 230V.....	22
Gráfico 8. Arriba, a tensión nominal, abajo, incremento de tensión a 230V.	22
Gráfico 9. Factor de ajuste de los HP de un motor debido al desbalance	25
Gráfico 10. Características y pérdidas del motor	28
Gráfico 11. Capacidad del transformador de acuerdo con el factor de potencia.....	40
Gráfico 12. Curva de reducción de corriente en alimentadores	41
Gráfico 13. Curvas de reducción de pérdidas en alimentadores por corrección del factor de potencia	45
Gráfico 14. Curva de magnetización en vacío de un motor y la curva de comportamiento de dos bancos de capacitores, $Q_1 < Q_2$, que se utilizan para compensar el factor de potencia de M.....	60
Gráfico 15. Tensión en por unidad a la entrada de un motor cuando conmuta con un banco de capacitores.....	62
Gráfico 16. Punto de equilibrio para un motor de 50HP.....	69
Gráfico 17. Punto de equilibrio para un motor de 75HP.....	71
Gráfico 18. Punto de equilibrio para un motor de 100HP.....	73
Gráfico 19. Punto de equilibrio para un motor de 125HP.....	75

TABLAS

Tabla 1. Clasificación de motores según el par	6
Tabla 2. Eficiencia a plena carga de motores EnergyEfficient abiertos.....	11
Tabla 3. Eficiencia a plena carga de motores EnergyEfficient cerrados.....	12
Tabla 4. Eficiencia a plena carga motores abiertos Premium Efficiency con tensión nominal 600V ó menos.....	12
Tabla 5. Eficiencia a plena carga motores cerrados Premium Efficiency con tensión nominal 600V o menos.....	13
Tabla 6. Eficiencia a plena carga de motores Premium Efficiency para motores con tensión nominal 5000V o menos.....	13
Tabla 7. Torques a plena carga.....	23
Tabla 8. Velocidad de motor de 3 HP variando el torque de carga	23
Tabla 9. Efectos del desbalance de tensión en motores trifásicos de inducción.....	26
Tabla 10. Efectos de variación de tensión sobre las características de un motor.	28
Tabla 11. Tensión de placa de motores de inducción estándar.....	29
Tabla 12. Valores máximos de temperatura.	33
Tabla 13. Valores típicos nominales de tensión y potencia reactiva	35
Tabla 14. Corriente a plena carga, motores trifásicos.....	42
Tabla 15. Conductores de cobre THHN cobre, con su correspondiente resistencia, reactancia y ampacidad.....	43
Tabla 16. Datos obtenidos para ejemplo 1.....	52
Tabla 17. Operación del motor a su tensión de placa y a una tensión superior, para un factor de potencia de 0.98	58
Tabla 18. Calibres de conductores, fusibles e interruptores termomagnéticos recomendados por GE.....	63
Tabla 19. Datos para un motor de 50HP	69
Tabla 20. Datos de un motor de 75HP	71
Tabla 21. Datos motores de 100HP	73
Tabla 22. Datos motores de 125HP	75

Lista de Símbolos y Abreviaciones

IEEE = Instituto de ingenieros electricistas y electrónicos

NEMA = Asociación nacional de fabricantes electricos

NEC = Código eléctrico nacional

IEC = Comisión electrotécnica internacional

SIGET = Superintendencia general de electricidad y telecomunicaciones

DOE = Departamento de energia

HP = Caballos de fuerza

fp = Factor de potencia

P = Potencia activa

S = Potencia aparente

S_L = Potencia liberada del transformador

η = Eficiencia

Q = Potencia reactiva

Q_C = Potencia reactiva de corrección

I = Corriente rms

V = Tensión rms

C = Condensador

R = Resistencia

M = Motor de inducción

Std = Estándar

$P_{conductor}$ = Perdidas en conductor

ΔV = Caída de tensión

$\%r_{ct}$ = Porcentaje de la reducción de caída de tensión

$\%r_c$ = Porcentaje de la reducción de corriente

$\%r_t$ = Porcentaje de la reducción de tensión

$\%r_p$ = Disminución de pérdidas en conductores

$R_{conductor}$ = Resistencia longitudinal del conductor

$X_{conductor}$ = Reactancia longitudinal del conductor

$Z_{conductor}$ = Impedancia longitudinal del conductor

ITM = Interruptor termomagnético

RPM = Revoluciones por minuto

N_s = Velocidad síncrona

THD = Distorsión armónica total

$Motor\ Master$ = Software mediante el cual se obtienen datos de placa de motores

Glosario Técnico

- **Motor eléctrico:** Es una máquina eléctrica que transforma energía eléctrica en energía mecánica por medio de interacciones electromagnéticas.
- **Motor de inducción:** Es un motor eléctrico del cual solamente una parte (estator), se conecta a la fuente de energía, la otra (rotor) funciona por inducción electromagnética.
- **Motor tipo jaula de ardilla:** Es un motor de inducción cuyo circuito secundario está formado por barras colocadas en ranuras del núcleo secundario, permanentemente cerradas en circuito corto (corto circuito) por medio de anillos en sus extremos, dando una apariencia de una jaula de ardilla.
- **Estator:** Parte fija del motor en la que se desarrolla la función de crear un campo magnético o de recoger sobre una bobina los fenómenos provocados por un campo magnético móvil.
- **Rotor:** Parte giratoria del motor, es el elemento de transferencia mecánica, ya que de él depende la conversión de energía eléctrica a mecánica
- **Sobretensión:** Es una magnitud de tensión que está por encima del valor nominal.
- **Potencia nominal:** Es la potencia mecánica de salida, indicada en la placa de datos del motor.
- **Tensión nominal:** Describe la clase de tensiones que se aplica al sistema, 120, 240, 480 voltios.
- **Tensión de servicio:** Describe el valor de la tensión en el punto donde la distribuidora entrega el servicio al usuario

- **Tensión de operación (utilización):** Describe al valor de la tensión en las terminales del motor.
- **Temperatura ambiente:** Es la temperatura del medio que rodea el motor, generalmente aire y que está en contacto con sus partes externas, enfriándolo.
- **Corriente de arranque (rotor bloqueado):** Es la corriente que demanda el motor al arrancar, y que corresponde a condiciones de rotor bloqueado o velocidad cero. Aplicando tensión y frecuencia eléctricas nominales.
- **Deslizamiento:** Es la diferencia entre la frecuencia de rotación (velocidad) síncrona y de carga plena de un motor de inducción, expresada en por ciento.
- **Letra de diseño:** Es la letra que identifica las características de corriente de arranque, par de arranque, par máximo y par mínimo de un motor.
- **Motor abierto:** Es un motor que permite el paso del aire exterior alrededor y a través de sus embobinados, para su enfriamiento.

INTRODUCCIÓN

El ahorro energético en el sector industrial ha sido siempre un tema de vital importancia, no sólo porque permite un funcionamiento eficiente de las instalaciones y los equipos, sino que a su vez, logra reducir costos de operación y aumentar con esto las utilidades. Durante los últimos años este tema ha cobrado más importancia debido en gran medida a los altos precios del petróleo y sus derivados, que para 2013 y según el Consejo Nacional de Energía (CNE) de El Salvador¹, representaban el 49% de la generación de energía eléctrica del país.

Se ha comprobado que aproximadamente 50% de la energía eléctrica que se consume en el mundo es a través de los motores de inducción trifásicos por constituir la fuerza motriz principal de la industria moderna². La industria salvadoreña no es la excepción y utiliza también motores trifásicos de inducción en su actividad diaria. Esta realidad ha motivado, por una parte, la fabricación de motores cada vez más eficientes, y por otra, la adopción de disposiciones legales por parte de los gobiernos de muchos países tendientes a obligar a los usuarios de los motores a tomar todas las medidas que conlleven a la disminución del consumo de energía eléctrica de estas máquinas giratorias.

El presente documento investiga algunas técnicas que ayuden al ahorro de energía eléctrica en aplicaciones con motores trifásicos de inducción, enfocándose en la disminución de las pérdidas que se presentan producto de la naturaleza de la potencia que demanda dicho equipo y de todos los componentes y factores asociados con un sistema de potencia en baja tensión. Se pueden mencionar entre estos: los alimentadores del motor, su factor de potencia, su eficiencia, la tensión de utilización, entre otros. La aplicación de bancos de capacitores ayuda a aumentar el factor de potencia del motor, cuyo valor es crítico porque determina la cantidad de potencia que se puede transformar en trabajo mecánico. Cabe mencionar que la eficiencia de un motor y su factor de potencia son parámetros encontrados, si aumenta uno disminuye el otro, lo que vuelve aún más importante la corrección del factor de potencia para asegurar el funcionamiento deseado.

Basándose en publicaciones hechas por el Instituto de Ingenieros Electrónicos y Electricistas (IEEE por sus siglas en inglés), y la Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos (NEMA por sus siglas en inglés), se recomiendan prácticas adecuadas que se deben seguir para ajustar los valores de los factores antes mencionados y conseguir los resultados deseados en el sistema de potencia.

¹ CNE. El camino del cambio de la matriz energética de El Salvador, diciembre 2013.

² De Almeida, Aníbal. Improving the penetration of energy efficient motors and drives, 2000.

Se incluyen cálculos realizados en un modelo teórico de una instalación que suministra potencia eléctrica a un motor, tomando en cuenta el calibre de los conductores, la tensión de servicio y de utilización, etc. Se añade además un estimado económico, con precios de cables, tablero de alimentación, interruptores, etc. Finalmente se aplican las recomendaciones en una instalación real para evaluar el efecto que éstas tienen en el consumo de energía, y se presentan los resultados obtenidos.

ALCANCES

Definir una metodología para la aplicación de bancos de capacitores en sistemas industriales de potencia, cuya tensión de operación es menor que 1000 VAC, y cuyas cargas son motores trifásicos de inducción del tipo jaula de ardilla; con el objetivo de reducir las pérdidas eléctricas en alimentadores y pérdidas en funcionamiento del motor, tomando en cuenta las formas posibles de conexión de los bancos de capacitores (paralelo), y siendo cuidadosos al no exceder los parámetros límite del motor. Se considera la corrección del factor de potencia como una de las técnicas para reducir las pérdidas en alimentadores, y un aumento controlado de la tensión de operación del motor para incrementar su rendimiento.

OBJETIVOS

GENERAL

Hacer un estudio del impacto de la aplicación de capacitores para la reducción de pérdidas en funcionamiento, para motores trifásicos de inducción del tipo jaula de ardilla.

ESPECÍFICOS

- Estudiar la aplicación del capacitor Shunt o paralelo para la corrección del factor de potencia.
- Determinar el impacto de la aplicación de capacitores en la reducción de pérdidas en alimentadores y motores trifásicos de inducción.

MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUCCIÓN

Los motores de inducción o asíncronos basan su funcionamiento en la creación de un campo giratorio en el entrehierro debido a la circulación de corriente alterna trifásica por los devanados del estator. La velocidad de giro de este campo magnético es llamada velocidad síncrona N_s , y depende del número de polos p , y de la frecuencia f .

$$N_s = \frac{120 f}{p} \quad (1)$$

Son llamados asíncronos porque el motor opera a una gran velocidad, la cual nunca llega a ser la velocidad de sincronismo, sin embargo es muy próxima. A la diferencia entre la velocidad síncrona y la velocidad que se mide en el eje del motor en rotación se le llama velocidad de deslizamiento

$$\text{velocidad de deslizamiento} = N_s - N_{medida} \quad (2)$$

El deslizamiento suele expresarse en por unidad, tomando como base la velocidad síncrona, así

$$s = \frac{\text{velocidad de deslizamiento (rpm)}}{\text{velocidad síncrona (rpm)}} \quad (3)$$

Los motores de inducción con rotor tipo jaula de ardilla, son los más utilizados por la industria, y son considerados como los motores de inducción universales y comúnmente conocidos como “caballos de la industria”. Los motores de inducción con rotor tipo jaula de ardilla son divididos en clasificaciones de par de arranque por las especificaciones en NEMA MG1-1993. El rendimiento del motor de acuerdo con las clasificaciones de par se describe como sigue³:

Diseño A: Estos motores se diseñan generalmente para un uso específico. Estos tienen la corriente de arranque más elevada y un par de ruptura más alto que los motores de diseño B y tienen un deslizamiento de 5% o inferior.

Diseño B: Estos son los motores de propósito general, tienen un deslizamiento del 5% o inferior. Se prefieren sobre los diseños de clase A por requerir poca corriente.

Diseño C: Estos motores tienen un elevado torque de arranque con una corriente de arranque normal y un bajo deslizamiento. Su deslizamiento es de 5% o inferior. Son construidos con rotor de doble jaula de ardilla, por lo cual son más costosos.

Diseño D: Estos motores poseen un alto deslizamiento, un alto torque de arranque, baja corriente de arranque y una baja velocidad a plena carga.

³ NEMA MG1-1993 Motors and Generators,
IEEE STD 739 Recommended Practice for Energy Management in Industrial and Commercial Facilities

Diseño E: Estos motores son de propósito general y tienen un rendimiento de corriente, velocidad y par equivalente a los de las normas internacionales con un nivel mínimo establecido para la eficiencia nominal. Su corriente de arranque puede ser más alta que la del diseño, con un deslizamiento del 3% o inferior.

De todos los tipos de motores jaula de ardilla antes mencionados el motor diseño B es el más frecuentemente utilizado para aplicaciones industriales. El gráfico 1 muestra la curva de porcentaje del par a plena carga contra el porcentaje de velocidad síncrona.

Diseño NEMA	Corriente de Arranque	Torque de Arranque	Deslizamiento
A	Normal	Normal	Bajo*
B	Normal	Normal	Bajo
C	Normal	Alto	Bajo
D	Bajo	Muy Alto	Alto**

Tabla 1. Clasificación de motores según el par

*5% o menos

**Varía 5-8% o 8-13%

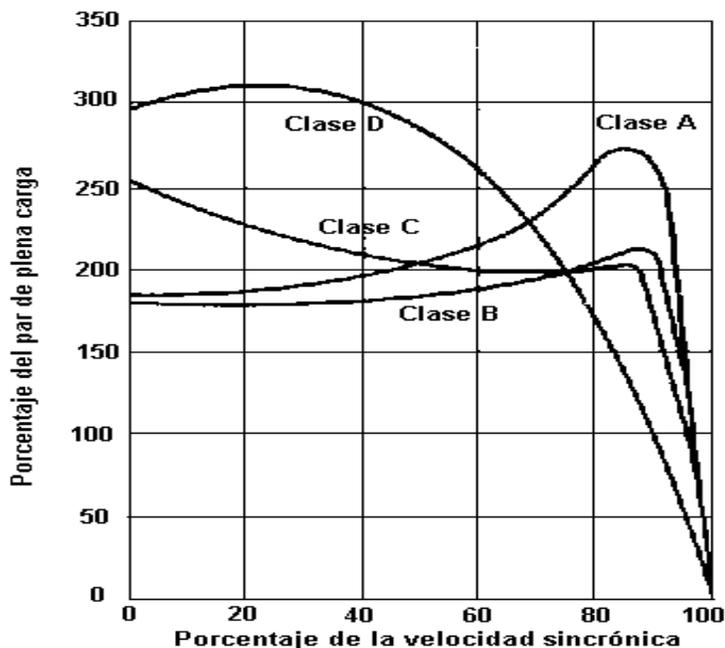


Gráfico 1. Curvas características típicas para diferentes tipos de motores

CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN MOTOR TRIFÁSICO DE INDUCCIÓN

El circuito equivalente por fase del motor de inducción corresponde al de la figura 1.

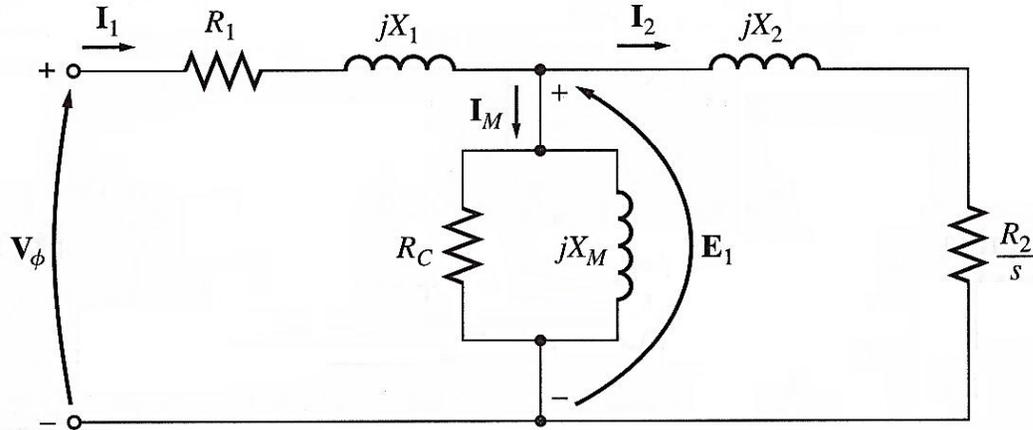


Figura 1. Circuito equivalente por fase en un motor de inducción

Los valores de resistencia $\frac{R_2}{s}$ y reactancia X_2 ya están reflejados al lado del estator, utilizando la relación efectiva de vueltas de la máquina (muy difícil y casi imposible de determinar en un motor con rotor tipo jaula de ardilla). La resistencia del rotor se divide entre el deslizamiento porque su valor depende de la carga que se conecte en el eje del motor. Las impedancias en paralelo R_C y X_M representan el núcleo y dependen totalmente del punto de operación sobre la curva de magnetización del motor (gráfico 2). R_C es usualmente muy alta y en la práctica la mayoría de las pérdidas en el núcleo se reflejan en X_M .

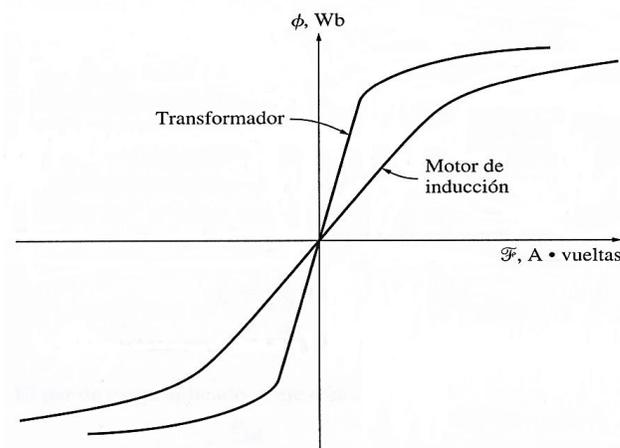


Gráfico 2. Curva de magnetización de un motor de inducción comparada con la de un transformador

La pendiente de la curva del motor es menos pronunciada que la de un transformador porque debe haber un entrehierro en los motores de inducción que incrementa fuertemente la reluctancia del camino del flujo, reduciendo el acoplamiento entre los devanados. Mientras más alta sea la reluctancia, mayor será la corriente de magnetización requerida para obtener cierto nivel de flujo. Por último, R_1 y X_1 representan la impedancia de los bobinados del estator. Para una explicación detallada de la obtención de este modelo, refiérase a: “Conversión de energía electromecánica. Vembu Gourishankar. Alfaomega. 1990”.

No toda la energía eléctrica que se suministra al estator se convierte en energía mecánica disponible en el eje del rotor. Una parte de la potencia de entrada se transforma en calor, tanto en el estator como en el rotor. Además, como se mencionó antes, parte de la corriente se utiliza para establecer el campo magnético que ha de poner la máquina en funcionamiento.

Se entiende por pérdidas la potencia eléctrica que se transforma y disipa en forma de calor en el proceso de conversión de la energía eléctrica en mecánica que ocurre en el motor⁴. Las pérdidas en los motores se pueden clasificar en cuatro categorías principales. Dos de éstas, las pérdidas en el hierro del núcleo y las pérdidas por fricción y ventilación, se clasifican como pérdidas no relacionadas con la carga, ya que permanecen constantes con independencia de la misma. Las pérdidas relacionadas con la carga, es decir, que varían con ella, son las pérdidas en el cobre del estator y las pérdidas en el rotor. A continuación se describen las pérdidas.

- Pérdidas en el estator $I^2 R_1$.
- Pérdidas en el rotor $I^2 R_2$.
- Pérdidas por fricción o ventilación.
- Pérdidas en el núcleo.

PÉRDIDAS EN EL ESTATOR $I^2 R_1$

Para una máquina trifásica, las pérdidas en el estator $I^2 R_1$, se muestran en la ecuación (4).

$$P_{est} = 1.5 I^2 R = 3I^2 R_1 \quad (4)$$

Donde I es la corriente de línea, medida o calculada, en amperios (A).

PÉRDIDAS EN VACÍO

Se realiza una prueba aplicando la tensión nominal de placa al motor, a la frecuencia nominal sin conectarle carga. Cuando se requiera determinar las pérdidas en vacío se

⁴ Eficiencia de Motores, Optimización del rendimiento durante la vida útil de los motores

deben medir la temperatura, la tensión, la corriente y la potencia demandada a la entrada a frecuencia nominal, y aplicando tensiones desde un 125% del valor nominal hasta un valor tal que la corriente de entrada aumente al seguir disminuyendo la tensión.

La potencia de entrada medida es el total de las pérdidas del motor sin carga. Estas incluyen pérdidas en el estator I^2R_1 , por fricción, por ventilación y las pérdidas en el núcleo.

Al promedio de las corrientes de línea, medidas a tensión nominal cuando el motor opera sin carga se le llama corriente de vacío.

FRICCIÓN Y VENTILACIÓN

Para determinar las pérdidas por fricción y ventilación, se restan las pérdidas I^2R del estator de las pérdidas totales (en vacío) para cada uno de los valores de tensión de prueba y se grafica la potencia resultante contra la tensión, extendiendo la curva hasta que corte el eje de tensión cero. El punto de potencia correspondiente a ese intercepto, representa las pérdidas por fricción y ventilación.

PÉRDIDAS EN EL NÚCLEO

Las pérdidas en el núcleo P_h , para cada tensión de prueba se obtienen restando las pérdidas por fricción y ventilación a la potencia total en vacío menos las pérdidas en el cobre del estator.

PÉRDIDAS EN EL ROTOR I^2R_2

Las pérdidas en el rotor I^2R_2 , deberán ser determinadas tomando en cuenta el deslizamiento usando la ecuación (5) como sigue:

$$P_{rot} = (\text{potencia de entrada al estator (medida)} - P_{est} - \text{pérdidas en el núcleo}) \times s \quad (5)$$

Todos los valores de potencia están en watts.

En todas las pérdidas de un motor pueden influir diversas consideraciones de diseño y construcción, es decir, la calidad de los procesos de diseño y fabricación.

La sumatoria de todas las pérdidas antes mencionadas representa P_T .

$$P_T = P_h + P_f + P_{est} + P_{rot} \quad (6)$$

Ahora se puede introducir un nuevo concepto, que es fundamental comprender al trabajar con motores de inducción.

EFICIENCIA

La eficiencia de un motor está definida como la relación entre la potencia que la máquina entrega en el eje P_{salida} y la potencia que toma de la red a la cual está conectado $P_{entrada}$.

$$\eta = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}} \quad (7)$$

Si las condiciones de operación de un motor son incorrectas o éste tiene algún desperfecto, la magnitud de las pérdidas, puede superar por mucho las de diseño, con la consecuente disminución de la eficiencia.

Para el análisis de la eficiencia de los motores es común presentar esta expresión en la forma

$$\eta = \frac{P_{entrada} - P_T}{P_{entrada}} \quad (8)$$

Esta expresión, más que ser una transformación matemática de la ecuación (7), es una forma usual para evaluar la eficiencia. En efecto, al no conocer todos y cada uno de los parámetros necesarios para cuantificar las pérdidas individualmente, se pueden obtener como un conjunto, despejando de (8). La eficiencia se puede obtener de datos de placa o calcularse por el método del deslizamiento, que se explica posteriormente. La potencia de entrada es puramente eléctrica y se puede medir.

A manera de ejemplo, suponga que $\eta = 0.87$ y $P_{entrada} = 839.5 \text{ kW}$:

$$P_T = P_{entrada} (1 - \eta) \quad (9)$$

$$P_T = 839.5 \text{ kW} (1 - 0.87)$$

$$\mathbf{P_T = 109.14 \text{ kW}}$$

CLASIFICACIÓN DE LOS MOTORES SEGÚN SU EFICIENCIA

Con el fin de determinar las condiciones de operación de un motor, se han desarrollado a lo largo de los años distintas normas técnicas que buscan ser la base para estandarizar las metodologías de prueba, las condiciones de medición y los métodos de cálculo. Sin embargo, como el desarrollo tecnológico no ha sido igual en todas las regiones del mundo, se han desarrollado en paralelo distintas normas técnicas.

Por lo anterior, a continuación se hace un análisis detallado de la normativa más importante para la evaluación de la eficiencia de los motores, y más concretamente de los motores de inducción, que es el enfoque de este trabajo.

Clasificación según norma MEMA MG1

De acuerdo con esta norma, los motores se clasifican en tres categorías, que se han tomado como referencia en las regulaciones americanas, más exactamente las que sirvieron como base para la regulación de los Estados Unidos conocida como EPACT 92, y más recientemente para la restricción del uso de los motores únicamente con nivel de eficiencia “Premium” (ver enseguida la definición).

Las categorías consideradas en esta norma son:

- *Estándar*. Son todos los motores cuya eficiencia está por debajo de los valores establecidos para los motores de energía eficiente (Energy efficient), considerados en la Tabla 2 para motores abiertos y en la Tabla 3 para motores cerrados.
- *Energía eficiente*. A este grupo pertenecen aquellos motores trifásicos, jaula de ardilla, con tensión nominal 600 V o menor cuya eficiencia medida como establece la norma misma, es igual o superior a los valores dados en las tablas 2 y 3 para motores abiertos y cerrados respectivamente.
- *Eficiencia premiada NEMA (NEMA premium)*. En este grupo la norma establece a su vez dos subgrupos: motores con tensión nominal 600 V o menos, y motores de media tensión hasta 5000 V. Para el primer grupo se establecen los valores mínimos de eficiencia que se muestran en las tablas 4 y 5 para motores abiertos y cerrados respectivamente; y para el segundo grupo se establece valores mínimos de eficiencia indicados en la tabla 6, la cual incluye motores abiertos y cerrados.

HP	2POLOS		4POLOS		6POLOS		8POLOS	
	Nominal	Mínima	Nominal	Mínima	Nominal	Mínima	Nominal	Mínima
1.0			82.5	80.0	80.0	77.0	74.0	70.0
1.5	82.5	90.0	84.0	81.5	84.0	81.5	75.5	72.0
2.0	84.0	81.5	84.0	81.5	85.5	82.5	85.5	82.5
3.0	84.0	81.5	86.5	84.0	86.5	84.0	86.5	84.0
5.0	85.5	82.5	87.5	85.5	87.5	85.5	87.5	85.5
7.5	87.5	85.5	88.5	86.5	88.5	86.5	88.5	86.5
10.0	88.5	86.5	89.5	87.5	90.2	88.5	89.5	87.5
15.0	89.5	87.5	91.0	89.5	90.2	88.5	89.5	87.5
20.0	90.2	88.5	91.0	89.5	91.0	89.5	90.2	88.5
25.0	91.0	89.5	91.7	90.2	91.7	90.2	90.2	88.5
30.0	91.0	89.5	92.4	91.0	92.4	91.0	91.0	89.5
40.0	91.7	90.2	93.0	91.7	93.0	91.7	91.0	89.5
50.0	92.4	91.0	93.0	91.7	93.0	91.7	91.7	90.2
60.0	93.0	91.7	93.6	92.4	93.6	92.4	92.4	91.0
75.0	93.0	91.7	94.1	93.0	93.6	92.4	93.6	92.4
100.0	93.0	91.7	94.1	93.0	94.1	93.0	93.6	92.4
125.0	93.6	92.4	94.5	93.6	94.1	93.0	93.6	92.4
150.0	93.6	92.4	95.0	94.1	94.5	93.6	93.6	92.4
200.0	94.5	93.6	95.0	94.1	94.5	93.6	93.6	92.4
250.0	94.5	93.6	95.4	94.5	95.4	94.5	94.5	93.6
300.0	95.0	94.1	95.4	94.5	95.4	94.5		
350.0	95.0	94.1	95.4	94.5	95.4	94.5		
400.0	95.4	94.5	95.4	94.5				

Tabla 2. Eficiencia a plena carga de motores Energy Efficient abiertos⁵

⁵ NEMA MG1, 2005, Tabla 12-11

HP	2POLOS		4POLOS		6POLOS		8POLOS	
	Nominal	Mínima	Nominal	Mínima	Nominal	Mínima	Nominal	Mínima
1,0			82,5	80,0	80,0	77,0	74,0	70,0
1,5	82,5	90,0	84,0	81,5	84,0	81,5	75,5	72,0
2,0	84,0	81,5	84,0	81,5	85,5	82,5	85,5	82,5
3,0	84,0	81,5	86,5	84,0	86,5	84,0	86,5	84,0
5,0	85,5	82,5	87,5	85,5	87,5	85,5	87,5	85,5
7,5	87,5	85,5	88,5	86,5	88,5	86,5	88,5	86,5
10,0	88,5	86,5	89,5	87,5	90,2	88,5	89,5	87,5
15,0	89,5	87,5	91,0	89,5	90,2	88,5	89,5	87,5
20,0	90,2	88,5	91,0	89,5	91,0	89,5	90,2	88,5
25,0	91,0	89,5	91,7	90,2	91,7	90,2	90,2	88,5
30,0	91,0	89,5	92,4	91,0	92,4	91,0	91,0	89,5
40,0	91,7	90,2	93,0	91,7	93,0	91,7	91,0	89,5
50,0	92,4	91,0	93,0	91,7	93,0	91,7	91,7	90,2
60,0	93,0	91,7	93,6	92,4	93,6	92,4	92,4	91,0
75,0	93,0	91,7	94,1	93,0	93,6	92,4	93,6	92,4
100,0	93,0	91,7	94,1	93,0	94,1	93,0	93,6	92,4
125,0	93,6	92,4	94,5	93,6	94,1	93,0	93,6	92,4
150,0	93,6	92,4	95,0	94,1	94,5	93,6	93,6	92,4
200,0	94,5	93,6	95,0	94,1	94,5	93,6	93,6	92,4
250,0	94,5	93,6	95,4	94,5	95,4	94,5	94,5	93,6
300,0	95,0	94,1	95,4	94,5	95,4	94,5		
350,0	95,0	94,1	95,4	94,5	95,4	94,5		
400,0	95,4	94,5	95,4	94,5				
450,0	95,8	95,0	95,8	95,0				
500,0	95,8	95,0	95,8	95,0				

Tabla 3. Eficiencia a plena carga de motores Energy Efficient cerrados⁶

HP	2 POLOS		4 POLOS		6 POLOS	
	Nominal	Mínima	Nominal	Mínima	Nominal	Mínima
1,0	77,0	74,0	85,5	82,5	82,5	80,0
1,5	84,0	81,5	86,5	84,0	86,5	81,5
2,0	85,5	82,5	86,5	84,0	87,5	81,5
3,0	85,5	82,5	89,5	84,0	88,5	86,5
5,0	86,5	84,0	89,5	84,0	89,5	87,5
7,5	88,5	86,5	91,0	89,5	90,2	88,5
10,0	89,5	87,5	91,7	90,2	91,7	90,2
15,0	90,2	88,5	93,0	91,7	91,7	90,2
20,0	91,0	89,5	93,0	91,7	92,4	91,0
25,0	91,7	90,2	93,6	92,4	93,0	91,7
30,0	91,7	90,2	94,1	93,0	93,6	92,4
40,0	92,4	91,0	94,1	93,0	94,1	93,0
50,0	93,0	91,7	94,5	93,6	94,1	93,0
60,0	93,6	92,4	95,0	94,1	94,5	93,6
75,0	93,6	92,4	95,0	94,1	94,5	93,6
100,0	93,6	92,4	95,4	94,5	95,0	94,1
125,0	94,1	93,0	95,4	94,5	95,0	94,1
150,0	94,1	93,0	95,8	95,0	95,4	94,5
200,0	95,0	94,1	95,8	95,0	95,4	94,5
250,0	95,0	94,1	95,8	95,0	95,4	94,5
300,0	95,4	94,5	95,8	95,0	95,4	94,5
350,0	95,4	94,5	95,8	95,0	95,4	94,5
400,0	95,8	95,0	95,8	95,0	95,8	95,0
450,0	95,8	95,0	96,2	95,4	96,2	95,4
500,0	95,8	95,0	96,2	95,4	96,2	95,4

Tabla 4. Eficiencia a plena carga motores abiertos Premium Efficiency con tensión nominal 600V ó menos⁷

⁶ NEMA MG1, 2005, Tabla 12-11

⁷ NEMA MG1,2005, Tabla 12-12

HP	2POLOS		4POLOS		6POLOS	
	Nominal	Mínima	Nominal	Mínima	Nominal	Mínima
1,0	77,0	74,0	85,5	82,5	82,5	80,0
1,5	84,0	81,5	86,5	84,0	87,5	85,5
2,0	85,5	82,5	86,5	84,0	88,5	86,5
3,0	86,5	84,0	89,5	87,5	89,5	87,5
5,0	88,5	86,5	89,5	87,5	89,5	87,5
7,5	89,5	87,5	91,7	90,2	91,0	89,5
10,0	90,2	88,5	91,7	90,2	91,0	89,5
15,0	91,0	89,5	92,4	91,0	91,7	90,2
20,0	91,0	89,5	93,0	91,7	91,7	90,2
25,0	91,7	90,2	93,6	92,4	93,0	91,7
30,0	91,7	90,2	93,6	92,4	93,0	91,7
40,0	92,4	91,0	94,1	93,0	94,1	93,0
50,0	93,0	91,7	94,5	93,6	94,1	93,0
60,0	93,6	92,4	95,0	94,1	94,5	93,6
75,0	93,6	92,4	95,4	94,5	94,5	93,6
100,0	94,1	93,0	95,4	94,5	95,0	94,1
125,0	95,0	94,1	95,4	94,5	95,0	94,1
150,0	95,0	94,1	95,8	95,0	95,8	95,0
200,0	95,4	94,5	96,2	95,4	95,8	95,0
250,0	95,8	95,0	96,2	95,4	95,8	95,0
300,0	95,8	95,0	96,2	95,4	95,8	95,0
350,0	95,8	95,0	96,2	95,4	95,8	95,0
400,0	95,8	95,0	96,2	95,4	95,8	95,0
450,0	95,8	95,0	96,2	95,4	95,8	95,0
500,0	95,8	95,0	96,2	95,4	95,8	95,0

Tabla 5. Eficiencia a plena carga motores cerrados Premium Efficiency con tensión nominal 600V o menos

MOTORES						
HP	2 POLOS		4 POLOS		6 POLOS	
	Nominal	Mínima	Nominal	Mínima	Nominal	Mínima
250,0	94,5	93,6	95,0	94,1	95,0	94,1
300,0	94,5	93,6	95,0	94,1	95,0	94,1
350,0	94,5	93,6	95,0	94,1	95,0	94,1
400,0	94,5	93,6	95,0	94,1	95,0	94,1
450,0	94,5	93,6	95,0	94,1	95,0	94,1
500,0	94,5	93,6	95,0	94,1	95,0	94,1

MOTORES						
HP	2 POLOS		4 POLOS		6 POLOS	
	Nominal	Mínima	Nominal	Mínima	Nominal	Mínima
250,0	95,0	94,1	95,0	94,1	95,0	94,1
300,0	95,0	94,1	95,0	94,1	95,0	94,1
350,0	95,0	94,1	95,0	94,1	95,0	94,1
400,0	95,0	94,1	95,0	94,1	95,0	94,1
450,0	95,0	94,1	95,0	94,1	95,0	94,1
500,0	95,0	94,1	95,0	94,1	95,0	94,1

Tabla 6. Eficiencia a plena carga de motores Premium Efficiency para motores con tensión nominal 5000V ó menos

BENEFICIOS DE LOS MOTORES DE ALTA EFICIENCIA

Los motores eficientes poseen otros beneficios adicionales, como:

- Mayor cantidad de cobre, lo cual reduce las pérdidas de Joule (pérdidas en el estator)
- Bajas pérdidas, por lo cual se reduce significativamente la elevación de energía.

- Son más resistentes a las variaciones de tensión que los motores convencionales.
- Son más silenciosos que los motores convencionales.
- Adicionalmente, muchos fabricantes ofrecen garantías extendidas para motores de alta eficiencia.

DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE CARGA Y EFICIENCIA POR EL MÉTODO DE DESLIZAMIENTO⁸

Lo primero que se debe hacer es calcular el deslizamiento a plena carga y el deslizamiento en operación de la siguiente forma:

Deslizamiento a plena carga:

$$\text{velocidad de deslizamiento}_{\text{plenacarga}} = N_s - N_{\text{placa}} \quad (10)$$

Deslizamiento medido en operación (ecuación 2):

$$\text{velocidad de deslizamiento} = N_s - N_{\text{medido}}$$

Conociendo el deslizamiento a plena carga y el de operación se procede a calcular el factor de carga:

$$\text{Factor de carga} = \frac{\text{velocidad de deslizamiento}}{\text{velocidad de deslizamiento}_{\text{plenacarga}}} \quad (11)$$

La potencia de salida o en el eje del motor se obtiene de la siguiente ecuación

$$P_{\text{salida}} = \text{Factor de carga} * HP_{\text{placa}} \quad (12)$$

Mientras que la eficiencia se determina como la relación entre la potencia de salida y la potencia demandada de la red por el motor (ver ecuación 7).

Los motores de alta eficiencia pueden proporcionar importantes ventajas, como ayudar a reducir los costos energéticos y a eliminar las emisiones de carbonos. Para diseñar y fabricar motores fiables, con corrientes de arranque relativamente bajas y un buen funcionamiento, se debe lograr un equilibrio entre diversos factores, no sólo la eficiencia y los costos, sino también el diseño de cojinetes, ranuras y ventilador, el aumento de la temperatura, la vibración y el ruido. Sólo un equilibrio adecuado dará como resultado motores de alta calidad, eficientes y confiables, con peso óptimo y larga vida útil.

⁸IEEE Std. 739-1995 sección 6.16, con IEEE Std. 112-1996 y NEMA MG-1 rev. 2004

CÁLCULO DE COSTOS DE OPERACIÓN DE UN MOTOR

Los costos de operación para un motor de inducción, estándar, eficiente o eficiencia premiada, se pueden calcular con la siguiente ecuación:

$$\Delta\$ = 0.746 * HP L N C \left(\frac{1}{\eta} \right) \quad (13)$$

Donde:

HP: Es la potencia de salida del motor

L: Porcentaje de carga del motor

N: Número de horas de operación

C: Costo de la energía

η : Eficiencia del motor al porcentaje de carga

Cálculo de ahorro

Este cálculo es comúnmente utilizado cuando se tiene pensado sustituir un motor estándar o un motor reparado por uno nuevo de mayor eficiencia.

$$\$_{1-2} = 0.746 * HP L N C \left(\frac{1}{\eta_2} - \frac{1}{\eta_1} \right) \quad (14)$$

η_1 : motor con mejor rendimiento

η_2 : motor con menor rendimiento

Como ejemplo se tiene un motor estándar de 10 HP, diseño B, con una eficiencia de 0.80, el cual tiene un precio de \$899, por otro lado se tiene un motor Premium de la misma capacidad pero con una eficiencia de 0.94 y un costo de \$1101. Suponiendo que los motores operan 4735 horas al año, los costos de operación y el ahorro que resultaría por cambiar el motor estándar por el Premium se muestran a continuación

Para el motor estándar se tiene:

$$\Delta\$ = 0.746 * HPLNC \left(\frac{1}{\eta} \right)$$

$$\Delta\$ = 0.746(10)(1)(4745)(0.183518) \left(\frac{1}{0.8} \right)$$

$$\Delta\$ = \$8120.14$$

Mientras que para el motor Premium resulta:

$$\Delta\$ = 0.746 * HPLNC \left(\frac{1}{\eta} \right)$$

$$\Delta\$ = 0.746(10)(1)(4745)(0.183518) \left(\frac{1}{0.94} \right)$$

$$\Delta\$ = \$6910.76$$

Al hacer una comparación de ahorro al utilizar el motor Premium en lugar del motor estándar, se obtendría un ahorro anual de:

$$\$_{1-2} = 0.746 * HP L NC \left(\frac{1}{\eta_2} - \frac{1}{\eta_1} \right)$$

$$\$_{1-2} = 0.74(10)(1)(4745)(0.183518) \left(\frac{1}{0.94} - \frac{1}{0.8} \right)$$

$$\$_{1-2} = \$1209.38$$

Cuando se considera la posibilidad de compra de un motor nuevo se debe evaluar económicamente la rentabilidad de pagar un costo adicional por adquirir un motor de alta eficiencia frente al ahorro obtenido por un menor consumo energético.

Para lograr una mayor reducción de pérdidas y máximo ahorro económico, es primordial seleccionar motores de alta eficiencia en la etapa inicial de todo proyecto.

SIMULACIÓN DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN

SIMULINK

Para observar el comportamiento de un motor asíncrono se realizó la simulación utilizando SIMULINK, Matlab. Se espera conocer el torque, la corriente de estator y la velocidad del motor, en el dominio del tiempo. Los parámetros más importantes del motor simulado son mostrados a continuación.

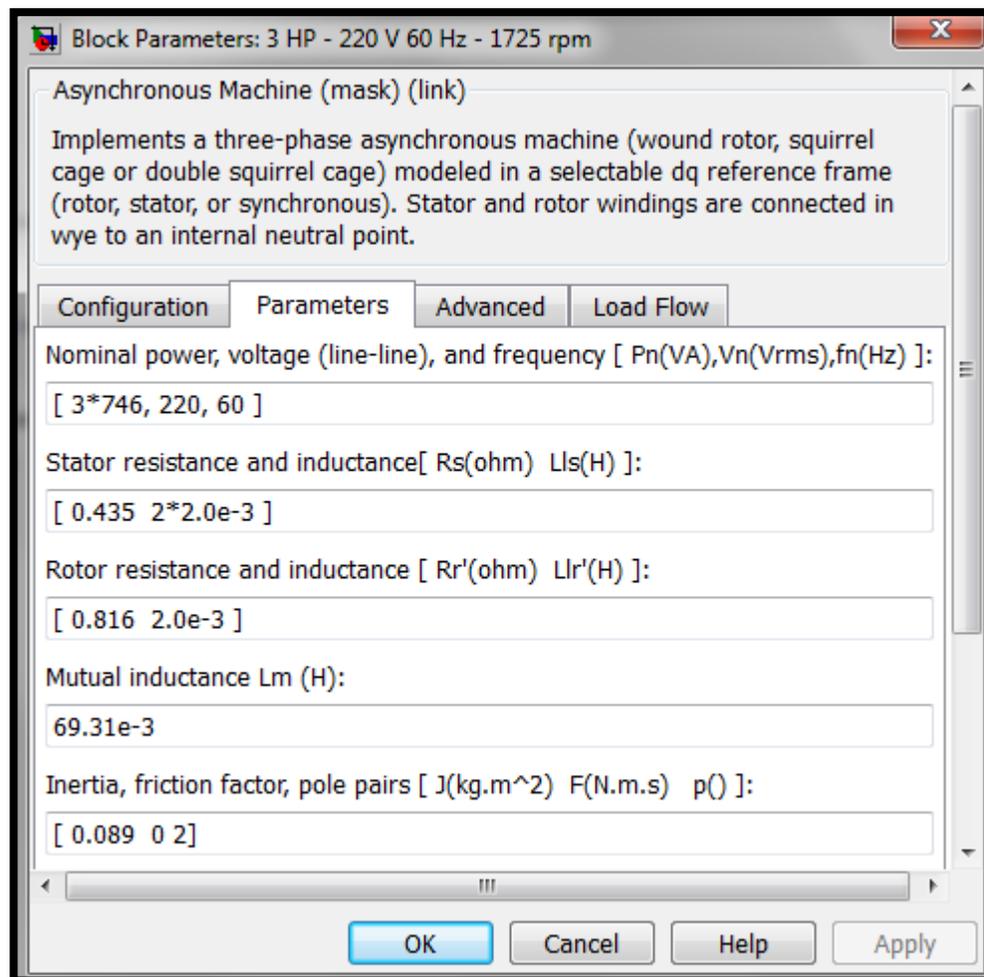


Figura 2. Motor trifásico de inducción, 1725 RPM

ANÁLISIS DE RESULTADOS DE ARRANQUE DEL MOTOR

Se debe tomar en cuenta que la mayoría de las máquinas rotatorias eléctricas presentan un estado transitorio en su arranque, en este estado las corrientes del devanado de estator se elevan por encima de la corriente nominal de 5 a 8 veces, traduciendo este aumento en un mayor torque electromagnético en el eje del rotor, dicho torque permitirá vencer la inercia propia de la máquina.

ARRANQUE EN VACÍO

El arranque en vacío consiste básicamente en alimentar el estator con la tensión de la placa y no acoplar ninguna carga al eje del rotor.

El comportamiento de un motor asíncrono trifásico se suele representar mediante las curvas características, que son la representación gráfica de las relaciones entre los diversos parámetros de la máquina. En el gráfico 3 se muestra el torque en función del tiempo, el cual se acerca a la carga en este caso cero, aproximadamente a los 0.72s después del arranque.

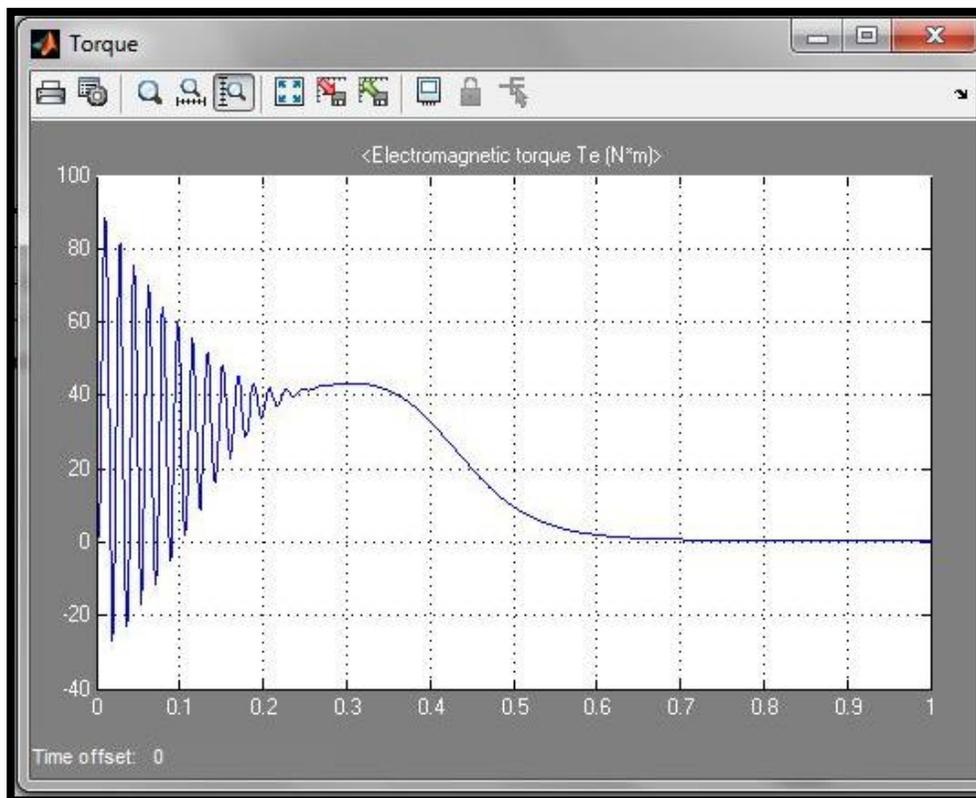


Gráfico 3. Torque-Tiempo, arranque en vacío

El torque está relacionado directamente con la corriente aplicada en los devanados del estator, tal como se ve en el gráfico 4, en el instante del arranque la corriente toma un valor de 76.75A, esto representa aproximadamente 11 veces más la corriente del motor una vez que se estabiliza el sistema (6.79A).

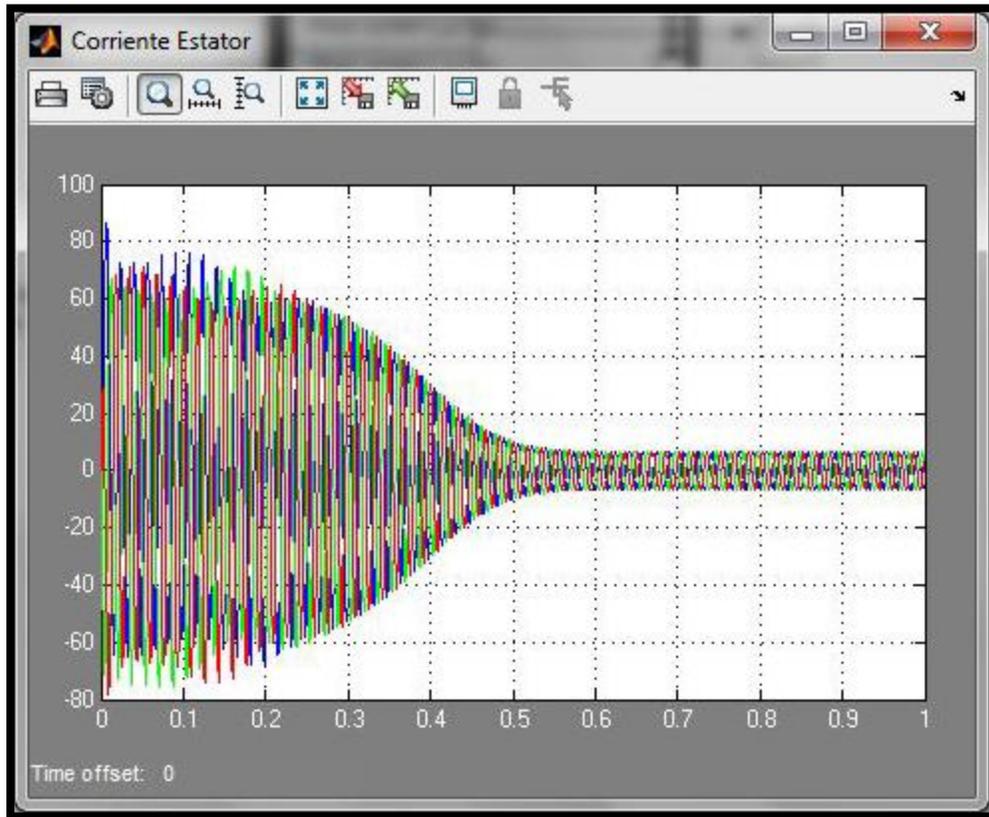


Gráfico 4. Corriente de estator-tiempo, arranque en vacío

ARRANQUE A PLENA CARGA (CONSTANTE)

Para este caso el motor tiene una carga conectada en el eje, para fines de análisis se colocó 12N-m que es el valor nominal de carga en un motor de 3HP trifásico.

En el gráfico de torque en función del tiempo se confirma que el motor tarda más en alcanzar la estabilidad, para este caso se logra a los 0.86s, tal como se muestra en el gráfico 5. Lo mismo sucede con la corriente en el estator, el motor tarda un poco más de tiempo en estabilizarse, gráfico 6, y lo hace aproximadamente en 12 A.

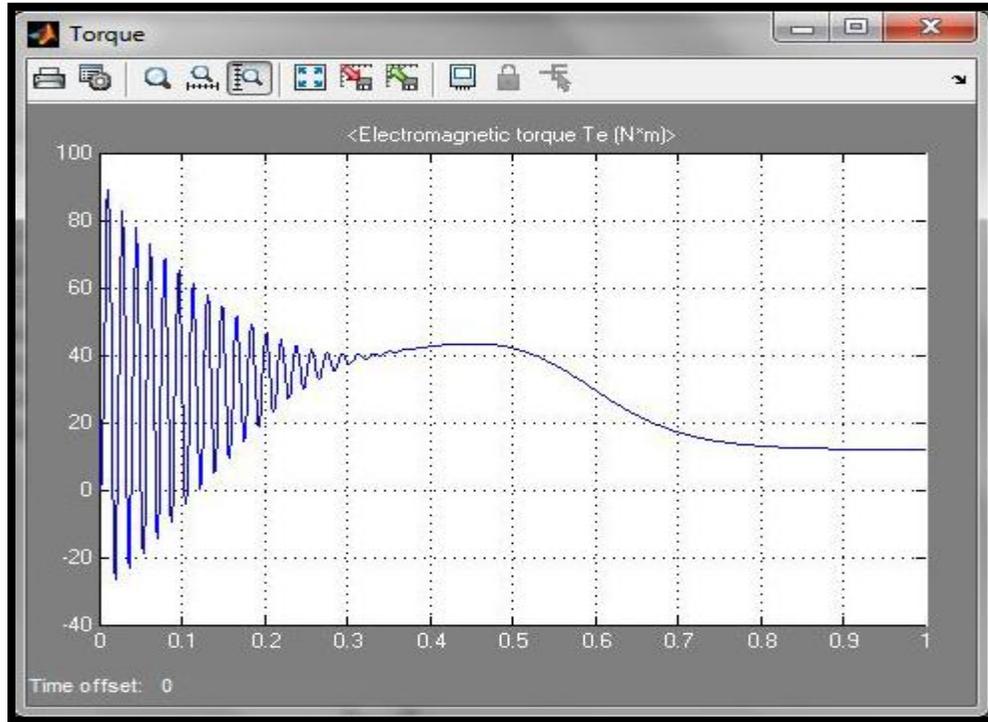


Gráfico 5. Torque-Tiempo, carga constante

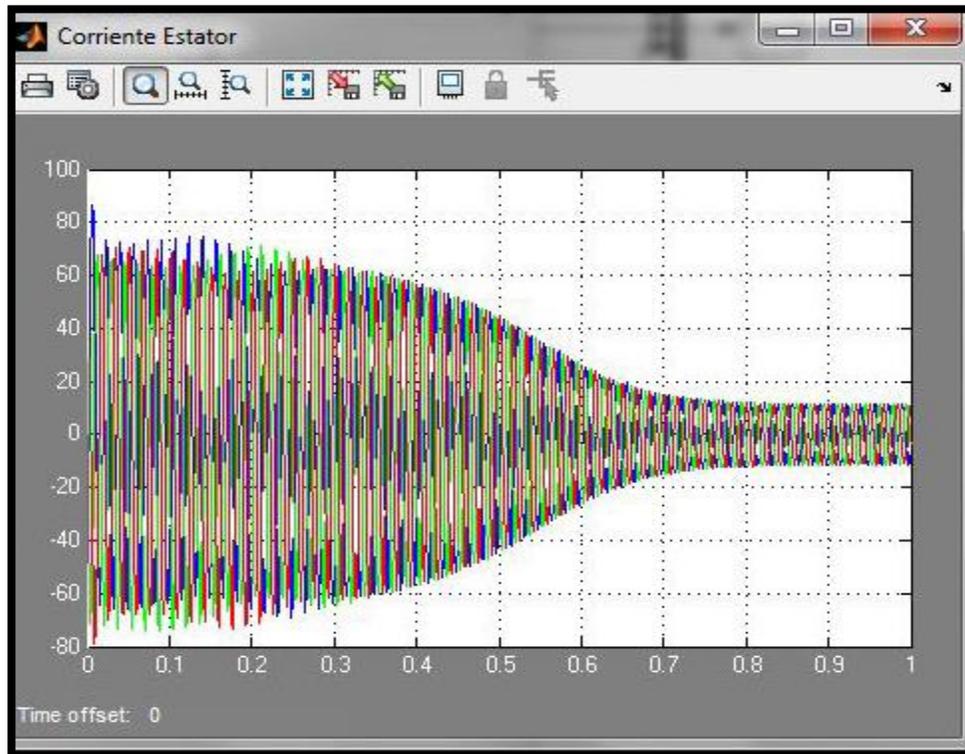


Gráfico 6. Corriente estator-tiempo, carga constante

Los gráficos del 3 al 5 muestran resultados cuando el motor es alimentado con su tensión nominal, 220 V.

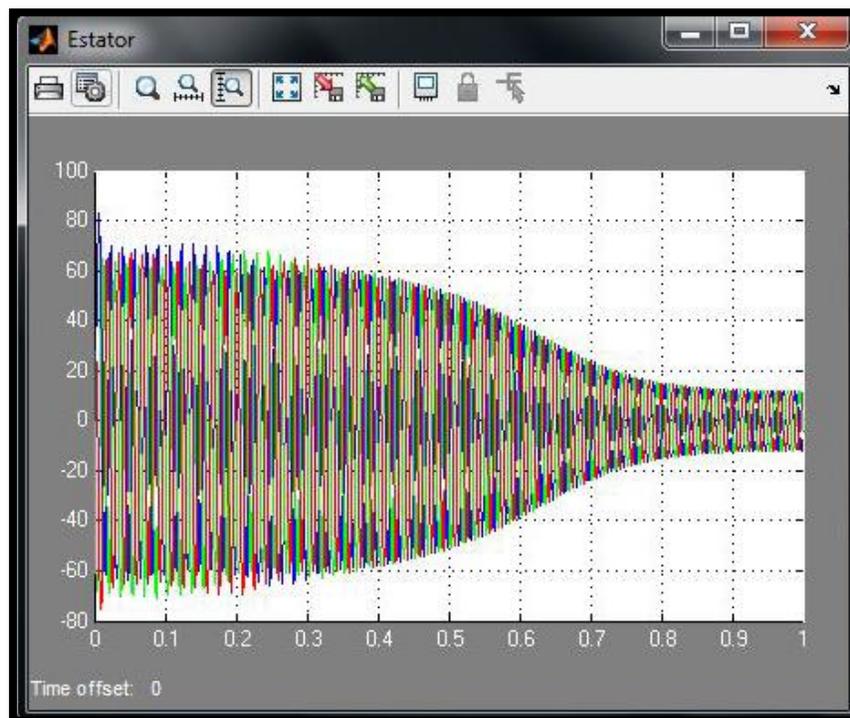


Gráfico 7. Corriente del estator a 230V.

Cuando al motor se lo conecta a una tensión ligeramente mayor se produce una reducción en la corriente de entrada. El gráfico 8 hace una comparación de estos resultados.

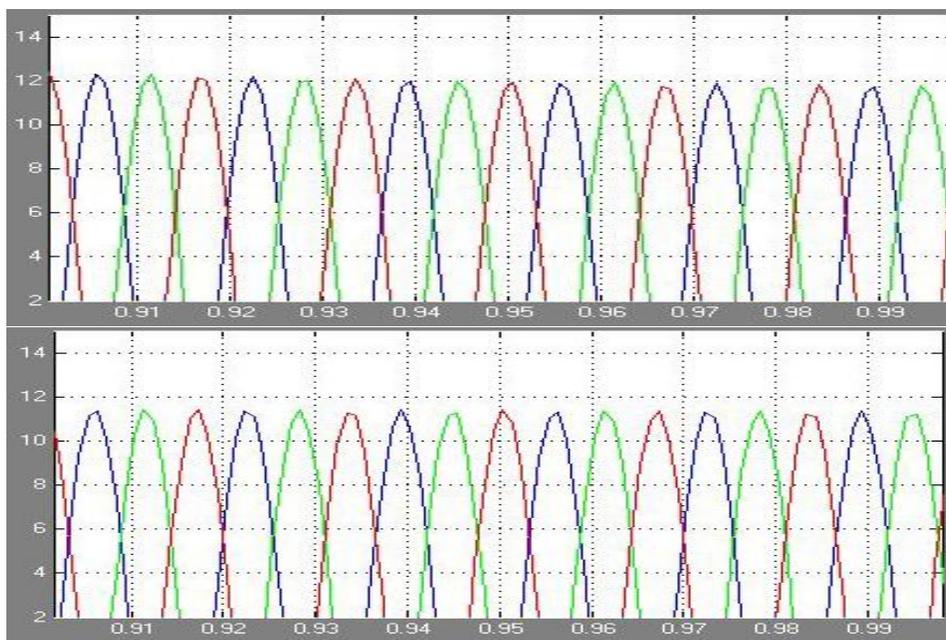


Gráfico 8. Arriba, a tensión nominal, abajo, incremento de tensión a 230V.

RESULTADOS DE LA VELOCIDAD AL VARIAR EL TORQUE DE CARGA

Los motores son diseñados para operar a un determinado torque nominal, este es mostrado en la placa de datos de un motor, la tabla 7 muestra el torque a plena carga para diferentes tamaños de motores de inducción.

HP	Torque plena carga (Nm)
3	12
15	60.33
25	104.94
50	199.71
75	299.36
100	399.96
125	500.29

Tabla 7. Torques a plena carga⁹

Al realizar la simulación para un motor de 3 HP, 4 polos, velocidad de placa 1725 RPM, se obtienen los siguientes resultados:

Torque de Carga (Nm)	Velocidad de Operación (RPM)	Deslizamiento de Operación
0	1800	0
5	1767	1.83
10	1733	3.72
12	1720	4.44
15	1695	5.83
20	1630	9.44

Tabla 8. Velocidad de motor de 3 HP variando el torque de carga

Como se muestra en la tabla anterior cuando al motor se le demanda su valor de torque nominal, la velocidad de operación se acerca más a la velocidad de placa, y se obtiene un valor aproximado de 5% de deslizamiento. Para obtener un mayor par, proporcionalmente tendrá que ser mayor la diferencia de velocidades entre rotor y el campo giratorio en el estator para que las corrientes inducidas y los campos producidos sean mayores, por lo tanto el deslizamiento será mayor tal como se muestra en la tabla 8. Por lo tanto, en la medida que la carga aumenta, baja la velocidad de rotación del motor. Cuando la carga es cero (motor en vacío) el rotor va a girar prácticamente en la rotación síncrona, para el caso de la simulación el deslizamiento es cero.

⁹Motor-Master International, Energy Efficiency and Renewable Energy

CALIDAD DE LA TENSIÓN

DESBALANCE DE TENSIONES

Un sistema trifásico de tensiones está balanceado cuando las magnitudes de fase o de línea son iguales y están desfasadas 120° eléctricos entre sí, como lo muestra la figura 4:

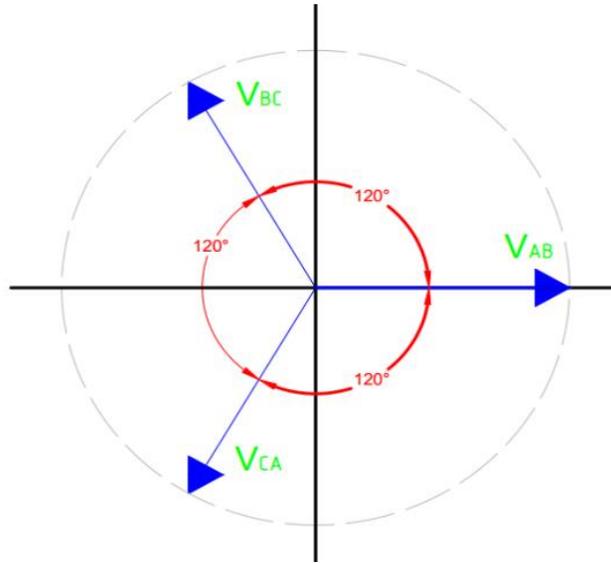


Figura 4. Diagrama fasorial de un sistema trifásico balanceado

En la práctica, un sistema perfectamente balanceado es imposible de conseguir, y la causa más común es la conexión de cargas monofásicas al sistema ya que provocan desequilibrio porque cada una demanda un valor de potencia diferente. Para cuantificar el desbalance de tensión de un sistema trifásico, NEMA e IEEE utilizan la misma definición.

Se define el desbalance de tensión en porcentaje como

$$\% \text{ desbalance} = \frac{\text{máxima desviación de tensión de línea respecto del valor de línea promedio}}{\text{tensión de línea promedio}} \times 100 \quad (15)$$

A manera de ejemplo se calcula el porcentaje de desbalance con los siguientes valores de tensión de línea de un sistema trifásico:

$$V_{AB} = 457.9 \text{ V}$$

$$V_{BC} = 461.2 \text{ V}$$

$$V_{CA} = 462.3 \text{ V}$$

Se calcula el promedio de estas tres tensiones:

$$V_{prom} = 460.5 \text{ V}$$

La máxima variación se calcula restando el valor de tensión que más se aleja del valor promedio:

$$V_{desv\ max} = 2.6\ V$$

El porcentaje viene dado por:

$$\% \text{ desbalance} = \frac{2.6\ V}{460.5\ V} \times 100 = 0.56 \quad (16)$$

NEMA recomienda no operar un motor trifásico de inducción por encima de un 5% de desbalance de la tensión que lo alimenta¹⁰. Entre 1% y 5%, los HP nominales del motor deben ser multiplicados por el factor que se muestra en el gráfico 9, para reducir la posibilidad de dañar la máquina. Se aprecia, por ejemplo que a un 3% de desbalance, no se debe forzar al motor a que entregue su potencia nominal, en cambio se corrige su potencia para que sea menor, en un factor de aproximadamente 0.88.

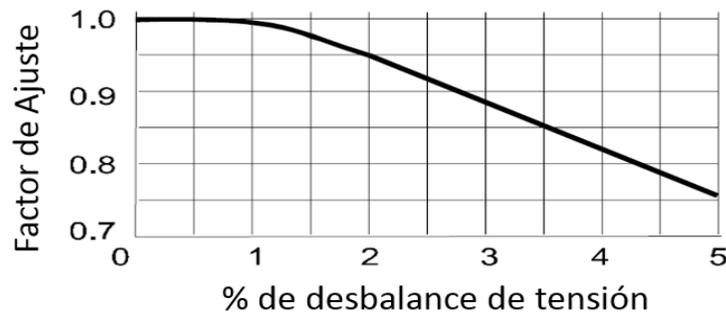


Gráfico 9. Factor de ajuste de los HP de un motor debido al desbalance

Según la norma IEEE STD 1159, se recomienda no rebasar un porcentaje de desbalance de 2%. Esta norma no considera ajustar la potencia nominal, en cambio se limita a recomendar la operación dentro de un margen que no afecte el funcionamiento del motor.

El desbalance de tensión provoca efectos negativos sobre los motores trifásicos de inducción. Los bobinados del estator, ya sean en delta o en estrella, carecen de neutro, por lo que un sistema desbalanceado provocará corrientes de secuencia negativa. El torque total transmitido quedará compuesto por un torque positivo más un torque de menor intensidad en sentido contrario equivalente a un freno eléctrico.

El flujo magnético con sentido rotacional inverso provoca:

¹⁰ NEMA MG1 2009. Sección 20.24

- Calentamiento adicional en el bobinado del estator.
- Pérdidas adicionales de potencia activa en el estator.
- Aumento de corrientes inducidas en los arrollamientos y rotor, provocando aumento de pérdidas también en rotor.
- Vibraciones mecánicas.

Si aumentan las pérdidas tanto en el rotor como en el estator, la potencia que demanda la máquina incrementa. Si la potencia de entrada incrementa, la eficiencia disminuye. Se puede expresar la potencia de entrada como:

$$P_{Entrada} = P_h + P_f + P_{est} + P_{rot} + P_{salida} \quad (17)$$

Y sustituyendo en (7):

$$\eta = \frac{P_{salida}}{P_h + P_f + P_{est} + P_{rot} + P_{salida}} \quad (18)$$

Al aumentar las pérdidas en el estator y en el rotor, P_{est} y P_{rot} respectivamente, el denominador de la ecuación crece, mientras el numerador permanece constante debido a que únicamente depende de la carga conectada en el eje. Claramente se observa que si el denominador de esta expresión crece, la eficiencia se verá reducida.

La tabla 9 muestra la variación que sufren algunos de los parámetros del motor, en condiciones de tensión desbalanceada. Cabe resaltar, que son valores generales, que pueden variar de acuerdo al diseño del motor.

% Tensión Desbalanceada	% Eficiencia Plena Carga	Factor de Potencia Plena Carga	% Corriente Plena Carga	% Temperatura
1	Disminuye 2	Disminuye 5-6%	Aumenta 1.5	Aumenta 2
2	Disminuye 8	Disminuye 7%	Aumenta 3	Aumenta 8

Tabla 9. Efectos del desbalance de tensión en motores trifásicos de inducción¹¹

En El Salvador, la SIGET no establece un valor máximo de desbalance de tensión, sin embargo, por los efectos antes mencionados se debe ajustar el desbalance en la instalación antes de intentar aplicar la metodología de reducción de pérdidas propuesta en este documento.

¹¹Norma IEEE 739. Tabla 6-6.

REGULACIÓN DE TENSIÓN

Una nueva técnica para reducir las pérdidas presentes en una instalación donde operan motores trifásicos de inducción es aumentar la tensión de operación del motor, por encima de su valor de placa. El fundamento teórico de esta aseveración es el siguiente: la potencia que el motor entrega en el eje es siempre determinada por la carga que tenga conectada, ese valor de potencia junto con la eficiencia del motor determinan la potencia que el motor demanda a la red, P_{ent} .

$$P_{ent} = \sqrt{3}V_L I_L \cos \varphi \text{ (kW)} \quad (19)$$

En la ecuación 19 se puede observar que si la carga establece la potencia que el motor debe tomar de la red, el valor será constante. Si se aumenta la tensión de operación del motor, para que la potencia permanezca constante, la corriente deberá disminuir.

La disminución de esa corriente, que circula por los conductores de la instalación trae como resultado la disminución de las pérdidas óhmicas en los mismos, como se demostrara posteriormente, así como también la disminución en las pérdidas del estator y del rotor (ecuaciones 4 y 5).

El incremento en la tensión de operación no debe ser excesivo. Cuando la tensión en los terminales del equipo de utilización se desvía del valor en la placa de características del equipo, el rendimiento y la vida útil de los equipos se ven afectados.

El efecto puede ser leve o grave, dependiendo de las características del equipo y la cantidad de la desviación de la tensión de la placa de identificación. De acuerdo a NEMA los motores de corriente alterna pueden tener una variación de tensión del $\pm 10\%$ de su tensión nominal¹². Sin embargo se recomienda tener una variación lo más cercano posible del valor nominal, para evitar sobrepasar los extremos permitidos que podrían ocasionar daños en el motor.

El gráfico 10 muestra la variación de los parámetros del motor de inducción cuando la tensión de operación disminuye o aumenta.

¹² MG 1-2009 Motor and generator

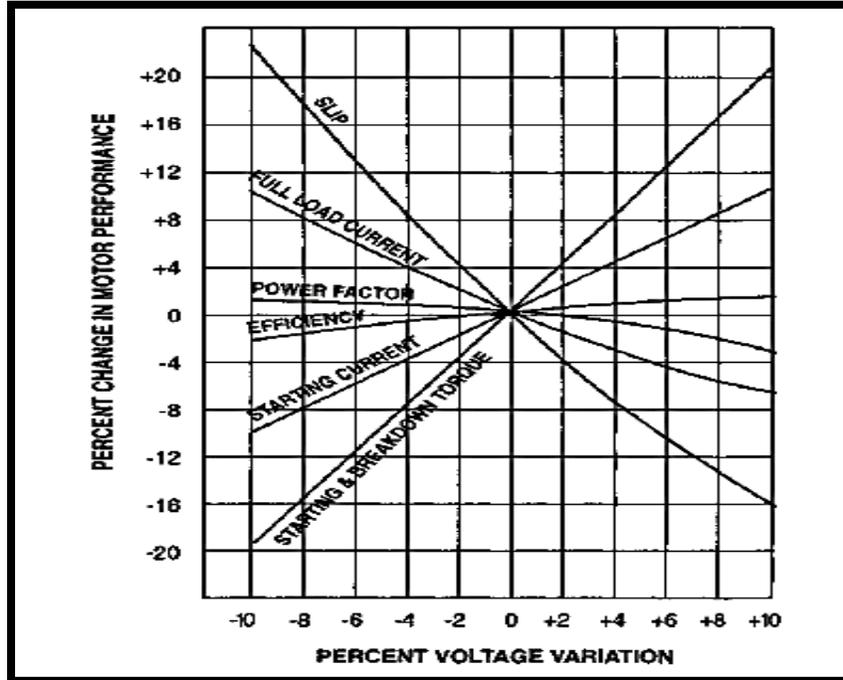


Gráfico 10. Características y pérdidas del motor¹³

Y la siguiente tabla cuantifica los cambios de los parámetros de un motor de inducción, para variaciones de la tensión de operación, en sus límites permitidos de acuerdo a NEMA.

Característica	Proporcional	Variación de Voltaje	
		90% placa	110% placa
Torque de arranque	Voltaje al cuadrado	-19%	+21%
Porcentaje de deslizamiento	$(1/voltaje)^2$	+23%	-19%
Velocidad a Plena Carga	Deslizamiento	-0.2 a -1.0%	+0.2 a 1.0%
Corriente de arranque	Voltaje	-10%	+10%
Corriente a Plena Carga	Varia con el diseño	+5 a +10%	-5 a -10%
Corriente Sin Carga	Varia con el diseño	-10 a -30%	+10 a +30%
Aumento de la Temperatura	Varia con el diseño	+10 a +15%	-10% a -15%
Eficiencia a plena carga	Varia con el diseño	-1 a -3%	+1 a +3%
Factor de Potencia a Plena Carga	Varia con el diseño	+3 a +7%	-2 a -7%
Ruido Magnético	Varia con el diseño	Ligera Disminución	Ligero Aumento

Tabla 10. Efectos de variación de tensión sobre las características de un motor¹⁴.

¹³General Electric Co. GET-6812B

La variación de tensión produce también cambios en las características de un motor, tal como se mostró en la tabla 16. Las tensiones aplicadas al motor por debajo de su valor de placa provocan una reducción en el par de arranque y una mayor subida de la temperatura a plena carga.

Las tensiones aplicadas al motor por encima de su valor de placa producen un aumento en el par del motor, mayor corriente de arranque, y una disminución del factor de potencia. Al incrementar el par de arranque aumentarán las fuerzas de aceleración en los acoplamientos y el equipo accionado. Por otro lado se obtendrá una reducción de la corriente a plena carga lo cual provoca una menor caída de tensión en el circuito de alimentación, estas dos últimas variaciones son las que se están buscando poner en práctica en este estudio para disminuir las pérdidas óhmicas en los alimentadores.

En general, las tensiones ligeramente por encima del valor de placa del motor tienen menos distorsiones en el rendimiento del motor que tensiones ligeramente por debajo de su valor de placa.

La Tabla 17 muestra los valores de tensión de placa para los motores asíncronos estándar y las tensiones nominales del sistema, como se especifica en NEMA MG 1-2009.¹⁵ En dicha tabla se muestra la tensión nominal a la cual se puede conectar el motor.

Tensión Nominal del Sistema (V)	Tensión de Placa (V)
Motores Monofásicos	
120	115
240	230
Motores Trifásicos	
Motores Trifásicos	
208	200
240	230
480	460
600	575
2400	2300
4160	4000
4800	4600
6900	6600
13800	13200

Tabla 11. Tensión de placa de motores de inducción estándar.

¹⁴ IEEE std 141-1993

¹⁵ NEMA MG 1-1978, IEEE std 141-1993

Se recomienda conectar el motor a la tensión inmediata superior disponible, siempre y cuando no exceda un 5% del valor nominal de tensión de la máquina. Así, por ejemplo, un motor con dato de placa de 460V se conectará a 480V ya que

$$\%V = \frac{480 - 460}{480} \times 100 = 4.16 \%$$

EL FACTOR DE POTENCIA

El factor de potencia es la relación entre la potencia activa y la aparente. Si la onda de corriente alterna es perfectamente senoidal el fp y $\cos \phi$ serán iguales. Siendo ϕ , el desfase entre la tensión y la corriente, o en otras palabras el retraso en el tiempo que sufren la onda de tensión y de corriente al pasar por un punto determinado.

$$\text{fp} = \frac{P}{|S|} \quad (20)$$

En la ecuación 20, P es la magnitud de la potencia activa y S es la magnitud de la potencia aparente.

Mientras más grande es el desfase entre la tensión y la corriente que demanda algún usuario, menor será el factor de potencia. Un bajo factor de potencia implica una magnitud baja de la potencia activa P comparada contra la potencia aparente S , la potencia reactiva Q tiene una magnitud alta en esa misma condición.

En la figura 5 se muestra el triángulo de potencia, en los cuales la potencia activa tiene el mismo valor, mientras que la potencia reactiva tiene valores diferentes en cada caso. Por eso se ilustra el hecho de que un aumento en la magnitud de la potencia reactiva, provoca la disminución del factor de potencia.

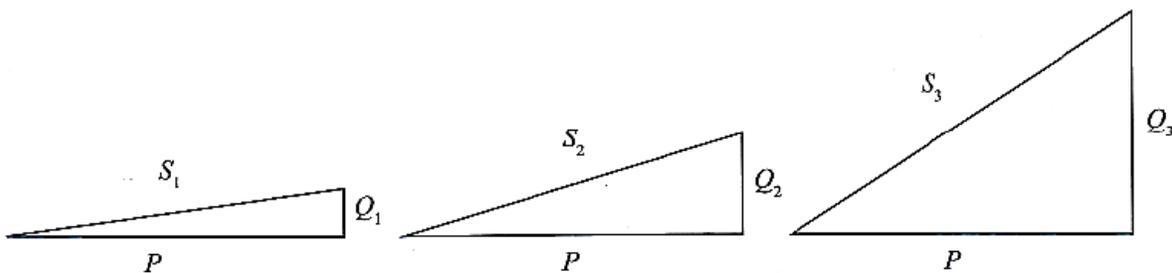


Figura 5. Triángulos de potencias diferentes

En el triángulo de la izquierda, la potencia reactiva Q_1 tiene un valor pequeño, mientras que la potencia aparente S_1 tiene una magnitud ligeramente mayor a la de la potencia activa P . Si la potencia reactiva es cero, entonces la potencia activa y la aparente tienen el mismo valor.

En el triángulo del centro, la potencia reactiva Q_2 tiene un valor mayor, mientras que la potencia aparente S_2 también se incrementa. En el triángulo de la derecha, la potencia reactiva Q_3 tiene una magnitud considerable, mientras que la potencia aparente S_3 también se incrementa considerablemente con el aumento de Q_3 , sin importar que la potencia activa haya conservado la misma magnitud. Entonces para este último caso decimos que se tiene el factor de potencia menor.

Las compañías suministradoras en muchas partes del mundo establecen cuotas de penalización para aquellas industrias o usuarios que no mantienen sus cargas en el rango del fp requerido. En El Salvador, según el documento Términos y Condiciones publicado por la SIGET¹⁶ define que: “los contratos de suministro deberán incluir recargos cuando el factor de potencia inductivo sea inferior a 0.90. Cuando el contrato de suministro no contemple lo anterior, o el suministro se realice de conformidad con el presente pliego tarifario, el Distribuidor podrá aplicar los siguientes recargos:

- 1) Si el fp es igual o mayor que 0.75 y menor que 0.90, el cargo por energía será aumentado en 1% por cada centésima que el FP sea inferior a 0.90;
- 2) Si el fp es igual o mayor que 0.60 y menor que 0.75, el cargo por energía será aumentado en 15% más el 2% por cada centésima que el fp sea inferior a 0.75;
- 3) Si el fp fuese inferior a 0.60, el Distribuidor podrá suspender el suministro hasta tanto el usuario final adecúe sus instalaciones a fin de superar dicho valor límite.

La eficiencia y el factor de potencia son parámetros encontrados, esto significa que al disminuir uno el otro aumenta, y viceversa. Para el caso de motores de muy alta eficiencia (o eficiencia premiada), se tiene un relativo bajo factor de potencia. Según la hoja de datos de un motor Westinghouse W22 Super Premium Efficiency, operando a plena carga (100 HP) con una eficiencia del 96.2%, su factor de potencia es de 0.84 (ver anexo).

En la mayoría de los casos, la aplicación de capacitores tiene como único objetivo corregir el factor de potencia para evitar la penalización monetaria de parte de la distribuidora. Sin embargo, el enfoque de este documento es aplicar los capacitores para reducir las pérdidas óhmicas.

¹⁶ Anexo II, Términos y Condiciones Generales al Consumidor Final, Art. 53, SIGET 2014

En los motores y en los transformadores, el calentamiento de los devanados depende del valor eficaz de la corriente. Esto ocurre sin importar que la carga tenga una componente activa $I\cos(\phi)$ y una componente reactiva $I\sin(\phi)$. Cuando la máquina absorbe potencia reactiva (en el caso de los motores) o hay flujo de potencia reactiva a través de ellos (caso de transformadores), se desperdicia capacidad, en cuanto a la potencia activa se refiere, ya que el calentamiento en los devanados depende de la combinación de la potencia reactiva y de la potencia activa (Ras, 1991)¹⁷. Éste y otros beneficios se detallan en secciones posteriores.

Los capacitores deben cumplir con todas las especificaciones a continuación mencionadas. Dichos capacitores deben colocarse lo más cerca posible a las cargas que provocan el bajo factor de potencia, para así liberar la carga reactiva que tiene el transformador de la instalación y eliminar el flujo de corriente reactiva por toda la instalación. En los sistemas industriales los capacitores son ubicados en gabinetes de forma individual o por grupos.

CARACTERÍSTICAS, PARÁMETROS Y CONFIGURACIONES DE LOS CAPACITORES

CONDICIONES DE SERVICIO

Todos los capacitores de potencia deben operar bajo una serie de requerimientos para no sufrir ningún tipo de daño, la norma IEEE STD 18-2002 proporciona una serie de condiciones a las que puede y a las que no debe estar expuesto un capacitor, así como también la información mínima que debe contener cada capacitor. A continuación se enuncian las principales características de los condensadores de potencia.

CONDICIONES NORMALES DE SERVICIO

Los capacitores operarán adecuadamente a sus valores nominales cuando:

- a) La temperatura ambiente esté dentro de los límites especificados a continuación. (Los capacitores puedan estar expuestos a los rayos directos del sol)
Los capacitores se deben diseñar para operar continuamente y para operaciones en las cuales estos entran y salen frecuentemente, con ventilación sin obstrucción o sin ventilación, y sometidos a la luz directa del sol para las temperaturas ambiente máximas por cada tipo de instalación mostrada en la tabla 12.

¹⁷ Ras, E (1991). Transformadores de potencia, de medida y de protección. México: Alfaomega, Marcombo.

Tipo de instalación	Temperatura ambiente del aire, °C
	4 h Promedio*
Capacitor aislado	46
Una fila de condensadores	46
Múltiples filas y niveles de capacitores	40
Bajo envolvente metálico o equipos alojados	40

*Tabla 12. Valores máximos de temperatura. *La media aritmética de las cuatro lecturas consecutivas horarias más altas durante el día que se espera esté más caliente en esa ubicación*

Los capacitores deben ser capaces tanto de operar continuamente como de operar alternamente a una temperatura ambiente mínima de -40°C.

- a) La altitud no supere los 1800 m sobre el nivel del mar.
- b) Se pretende que los capacitores operen a su tensión nominal o cierto porcentaje debajo de ella. Los capacitores deberán ser capaces de operar continuamente bajo un sistema de contingencia y conectados en bancos de manera tal que no excedan las siguientes limitaciones: 110% de la tensión nominal RMS; 120% de la tensión nominal pico; 135% de la corriente RMS nominal basada en la tensión y los kVAR nominales; 135% de los kVAR nominales.
- c) La tensión de impulso aplicada entre cada terminal y la cubierta no exceda el nivel básico de aislamiento al impulso (BIL) de esa terminal.
- d) La frecuencia de operación sea igual a la frecuencia nominal.

CONDICIONES ANORMALES DE SERVICIO

Si se requiere que los capacitores operen bajo condiciones anormales de servicio, como las siguientes, se debe informar de la aplicación al fabricante:

- a) Exposición a humos o vapores dañinos.
- b) Exposición a polvo conductivo o explosivo.
- c) Exposición a golpes o vibraciones mecánicas anormales, incluyendo terremotos.
- d) Montaje y/o cualquier tipo de arreglo que impida una ventilación adecuada.
- e) Operación en temperaturas ambiente fuera del rango especificado en tabla 12.
- f) Altitudes mayores que 1800 m sobre el nivel del mar.
- g) Condiciones de servicio que no aparezcan contempladas en la sección anterior.

PARÁMETROS ESTÁNDAR

La norma IEEE 18-2002 establece los siguientes parámetros para capacitores:

- a) Tensión, RMS (entre los terminales).
- b) Clase de aislamiento entre un terminal y la estructura (o tierra).
- c) Potencia reactiva.
- d) Número de fases.
- e) Frecuencia.

TOLERANCIA CAPACITIVA

La capacitancia de una unidad no deberá variar más que el rango establecido entre el 0% y +10% del valor nominal basado en los kVAR, frecuencia y tensión nominales, medidos a una temperatura uniforme de 25°C, tanto de la estructura como interna.

VALORES TÍPICOS NOMINALES DE TENSIÓN, POTENCIA REACTIVA Y BIL PARA CAPACITORES

Los valores típicos nominales de tensión, potencia reactiva y nivel de impulso básico de aislamiento (BIL) de los capacitores se presentan en la tabla 13. Los capacitores no deben entregar menos de su potencia reactiva nominal a una frecuencia y una tensión sinusoidal nominales, y no más que el 110% de este valor, medido a una temperatura uniforme de 25°C. Los capacitores de potencia se diseñan para operar con los valores nominales de frecuencia de 50 Hz o 60 Hz.

CAPACIDAD PARA SOPORTAR SOBRETENSIÓN Y SOBRE CORRIENTE

Los capacitores deben ser capaces de soportar, sin alterar su vida útil, transitorios alternos con una tensión de cresta de hasta dos veces el pico de la tensión nominal del capacitor, y otras sobretensiones, también deben soportar corrientes transitorias normalmente asociadas con la operación de los capacitores de potencia en paralelo en sistemas eléctricos de potencia como se describe en la norma IEEE 1036-1992.

Las capacidades de sobretensión momentánea y sostenida de cualquier elemento capacitivo o unidad capacitiva se deberán considerar como una fracción de la capacidad de tensión total de la unidad.

Tensión, RMS (Terminal a Terminal)	kVAR	Número de fases	BIL kV*
216	5, 7 1/2, 13 1/3, 20 y 25	1 y 3	30**
240	2.5, 5, 7 1/2, 10, 15, 20, 25, y 50	1 y 3	30**
480, 600	5, 10, 15, 20, 25, 35, 50, 60 y 100	1 y 3	30**
2400	50, 100, 150, 200, 300, y 400	1 y 3	75, 95, 125, 150, y 200
2770	50, 100, 150, 200, 300, 400 y 500	1 y 3	75, 95, 125, 150, y 200
4160, 4800	50, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700 y 800	1 y 3	75, 95, 125, 150, y 200
6640, 7200, 7620, 7960, 8320, 9540, 9960, 11400, 12470, 13280, 13800, 14400	50, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700, y 800	1	95, 125, 150 y 200
15125	50, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700, y 800	1	125, 150 y 200
19920	100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700, y 800	1	125, 150 y 200
20800, 21600, 22800, 23800, 24940	100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700, y 800	1	150200

Tabla 13. Valores típicos nominales de tensión y potencia reactiva

INFORMACIÓN DE PLACA DEL CAPACITOR

Cada capacitor de potencia deberá estar provisto con una placa permanente que incluya por lo menos la siguiente información:

1. Nombre del fabricante.
2. Número de serie único.
 - a) Tipo, modelo, estilo o número de catálogo según el fabricante.
 - b) Año de fabricación.
 - c) Potencia reactiva nominal.
3. Tensión nominal, RMS.
4. Número de fases.
5. Frecuencia nominal.

6. BIL (si aplica). Para los capacitores que tienen bushings con diferentes valores de BIL, la placa deberá mostrar ambos valores, por ejemplo 150/95 kV BIL.
7. Clasificación de inflamabilidad y el volumen del fluido aislante.
8. Una declaración de que el capacitor contiene un dispositivo interno de descarga.

ESPECIFICACIONES DE LOS CONDUCTORES PARA CONECTARSE AL MOTOR¹⁸

✓ 600 voltios nominales, e inferiores.

Capacidad de corriente. La ampacidad de los conductores del circuito del condensador no deberá ser inferior a 135 por ciento de la corriente especificada del condensador. La ampacidad de los conductores que conectan un condensador a los bornes de un motor o de los conductores del circuito del motor no podrá ser inferior a un tercio de la capacidad de corriente de los conductores del circuito del motor y en ningún caso será inferior a 135 por ciento de la corriente nominal del condensador.

✓ Más de 600 voltios nominales.

Corriente de carga. Los interruptores de operación en grupo se utilizaran para la conmutación de condensadores y deberán ser capaces de lo siguiente:

1. Llevar de forma continua no menos del 135 por ciento de la corriente indicada de la instalación de condensadores.
2. Interrumpir la corriente continua máxima de carga de cada condensador, banco de condensadores, o la instalación de condensadores que se encienden como una unidad.
3. Soportarla máxima corriente de irrupción, incluidas las contribuciones de las instalaciones de condensadores adyacentes.
4. Llevar las corrientes debido a las fallas de los interruptores en el lado del capacitor.

¹⁸ National Electrical Code 2011

CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA

Para corregir el factor de potencia de una instalación, se requiere conocer la siguiente información sobre la operación actual:

- Potencia activa de la instalación, P
- Factor de potencia de la instalación, fp_1

Con estos datos se obtienen los demás componentes del triángulo de potencias de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$S_1 = \frac{P}{fp_1} \quad (21)$$

$$Q_1 = \sqrt{S_1^2 - P^2} \quad (22)$$

$$\varphi_1 = \cos^{-1}(fp_1) \quad (23)$$

En la figura 6 se muestra el triángulo de potencias, cuyos catetos son la potencia activa P y la potencia reactiva Q_1 ; la hipotenusa es la potencia aparente S_1 y el ángulo de la impedancia es φ_1 .

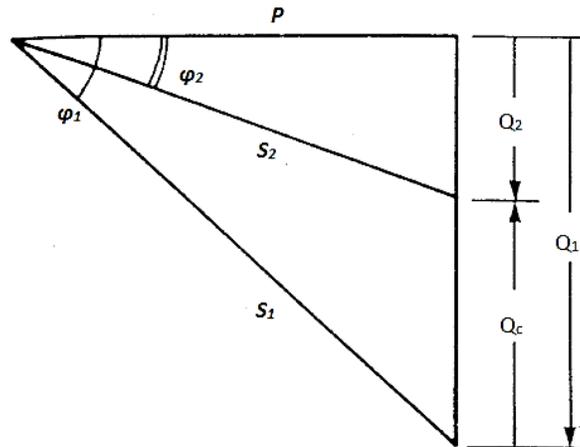


Figura 6. Triángulos utilizados para la corrección del factor de potencia¹⁹

Para hacer la corrección del factor de potencia, es necesario conocer el factor de potencia 1 deseado para la instalación del factor de potencia 2.

Como se muestra en la figura 6, observamos dos triángulos sobrepuestos; el mayor representa las condiciones actuales de operación de la instalación eléctrica, formado por los lados P, Q_1, S_1 , mientras que el triángulo menor representa las condiciones en las que

¹⁹IEEE.STD 1036-1992, pág.9

operará el sistema una vez que se haya alcanzado el factor de potencia deseado. Este triángulo está formado por los lados P, Q_2, S_2 .

La potencia reactiva Q_2 es la que la instalación absorberá del suministro eléctrico una vez que se haya corregido el factor de potencia. Se requiere entonces que el propio usuario aporte una potencia reactiva de corrección Q_c .

Observando la figura, se tiene que Q_c es:

$$Q_c = Q_1 - Q_2 \quad (24)$$

En ambos triángulos la potencia reactiva se relaciona con el ángulo y con la potencia activa por las expresiones:

$$Q_1 = P \tan(\varphi_1) \quad (25)$$

$$Q_2 = P \tan(\varphi_2) \quad (26)$$

Sustituyendo estas relaciones para obtener la potencia reactiva de corrección, se tiene:

$$Q_c = Q_1 - Q_2 = P(\tan(\varphi_1) - \tan(\varphi_2)) \quad (27)$$

La ecuación 27 proporciona el valor de la potencia reactiva que necesita suministrar el dispositivo de corrección para llegar al factor de potencia deseado. Si se requiere compensar para factor de potencia unitario, entonces la ecuación 28 se transforma en:

$$Q_c = P \tan(\varphi_1) \quad (28)$$

Para aplicar los conceptos, considérese un motor operando a un fp de 0.83. Se hicieron mediciones y la potencia de entrada trifásica fue de 123.5kVA. Para evitar un recargo por bajo factor de potencia de parte de la distribuidora se requiere corregir el fp a 0.90

De (21):

$$\begin{aligned} P &= 123.5 \text{ kVA} * 0.83 = 102.5 \text{ kW} \\ Q_1 &= 102.5 \text{ kW} * \tan(\cos^{-1} 0.83) = 80.98 \text{ kVAR} \\ Q_2 &= 102.5 \text{ kW} * \tan(\cos^{-1} 0.9) = 58.36 \text{ kVAR} \\ Q_c &= 80.98 - 58.36 = 22.5 \text{ kVAR} \end{aligned}$$

EFFECTOS DE LA APLICACIÓN DE CAPACITORES

LIBERACIÓN DE LA CAPACIDAD DE POTENCIA DEL TRANSFORMADOR

La potencia reactiva total Q_1 requerida por la carga no tiene que fluir por el transformador, ya que el banco de capacitores se encarga de aportar una cantidad de potencia reactiva Q_c , de tal forma que a través del transformador únicamente se tiene una cantidad de potencia reactiva Q_2 , tal como se ve en la figura 7.

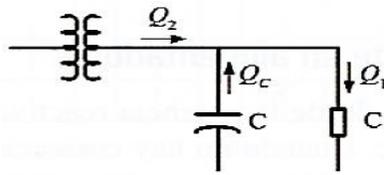


Figura 7. Capacitores para corrección del factor de potencia

El triángulo de potencia se muestra en la figura 8, corresponde a las potencias demandadas por la carga, y son las mismas potencias que fluyen por el transformador antes de agregar el banco de capacitores.

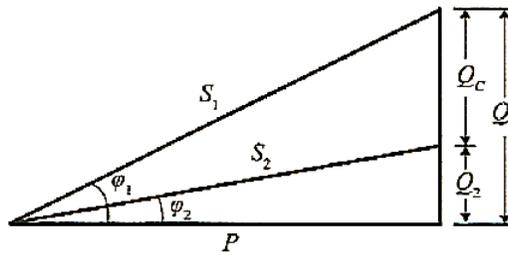


Figura 8. Triángulos de potencia

La aportación de potencia reactiva Q_C del banco de capacitores modifica el triángulo de potencias en el transformador, mismo que se muestra en la figura 9, en donde la potencia reactiva ha disminuido hasta alcanzar un valor Q_2 .

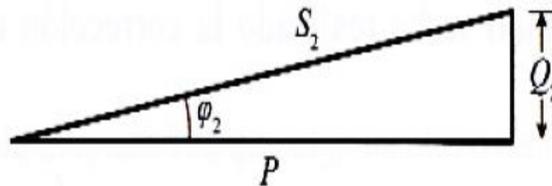


Figura 9. Triángulo de potencia resultante

La potencia aparente S_2 es menor que S_1 debido a que el flujo de potencia reactiva a través del transformador ha disminuido. Cuando no había banco de capacitores para la corrección del factor de potencia, el valor de la potencia aparente en el transformador era S_1 . Esta disminución de la potencia aparente implica una cantidad menor de corriente circulando por los devanados del transformador, y por lo tanto representa una liberación de capacidad en el mismo.

La potencia liberada S_L en el transformador es:

$$S_L = S_1 - S_2 \quad (29)$$

La ecuación anterior expresada en términos de los factores de potencia de la siguiente forma:

$$S_L = \frac{P_{ent}}{fp_1} - \frac{P_{ent}}{fp_2} \quad (30)$$

Un factor de potencia bajo, disminuye la capacidad disponible del transformador de acuerdo al gráfico 11.

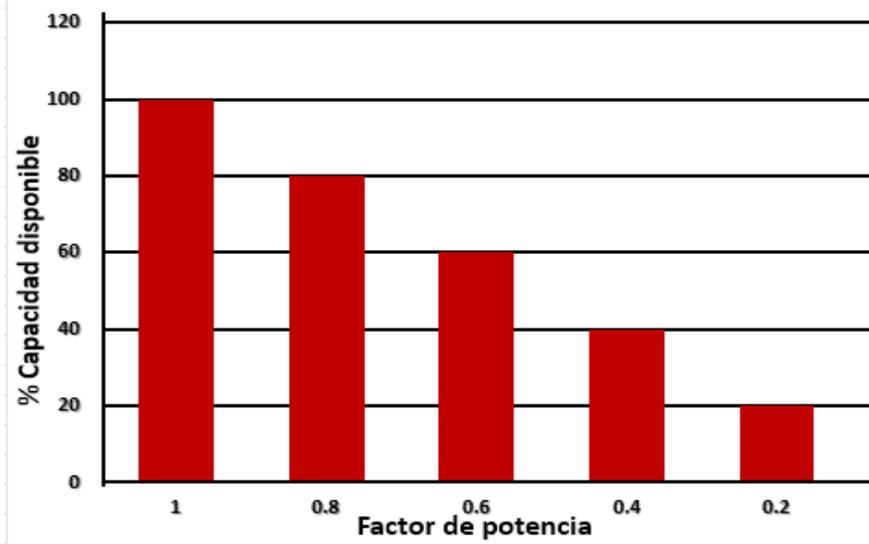


Gráfico 11. Capacidad del transformador de acuerdo con el factor de potencia

REDUCCIÓN DE CORRIENTES EN CONDUCTORES

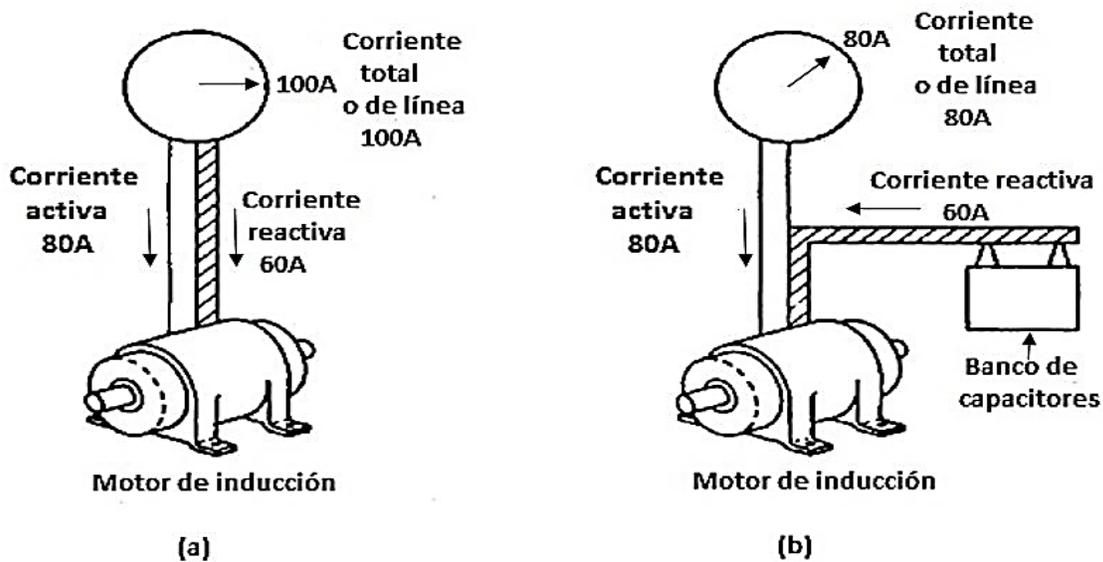


Figura 10 Flujo de corrientes.

Cuando se realiza la corrección del factor de potencia desde la potencia reactiva Q_1 a Q_2 el factor de potencia aumenta, y esto ocasionará una disminución de la corriente en los alimentadores, tal como se muestra en la figura 10. Cabe destacar que si la corriente disminuye las pérdidas óhmicas y la caída de tensión disminuirán ya que son directamente proporcionales.

La corriente del alimentador para la potencia reactiva inicial se determina:

$$I_1 = \frac{P}{\sqrt{3}V_L f p_1 \eta} \quad (31)$$

Ahora bien, cuando se ha realizado la corrección del factor de potencia, la corriente en el alimentador se calcula de la siguiente manera:

$$I_2 = \frac{P}{\sqrt{3}V_L f p_2 \eta} \quad (32)$$

Y considerando que la potencia activa y la tensión entre las líneas son constantes, al hacer la corrección del factor de potencia, la corriente en el alimentador se calcula así:

$$I_2 = \frac{f p_1}{f p_2} I_1 \quad (33)$$

Ahora, si se quiere conocer el porcentaje de reducción de corriente, se tiene entonces:

$$\%_{rc} = \frac{I_1 - I_2}{I_1} * 100 \quad \text{sustituyendo } \%_{rc} = \left(1 - \frac{f p_1}{f p_2}\right) * 100 \quad (34)$$

Este porcentaje expresa la reducción de corriente en el alimentador, después de haber realizado la corrección del factor de potencia. En el gráfico 12 se muestran las curvas del porcentaje de reducción de corriente para distintos valores del factor de potencia actual ($f p_1$) y los distintos valores deseados del factor de potencia ($f p_2$).

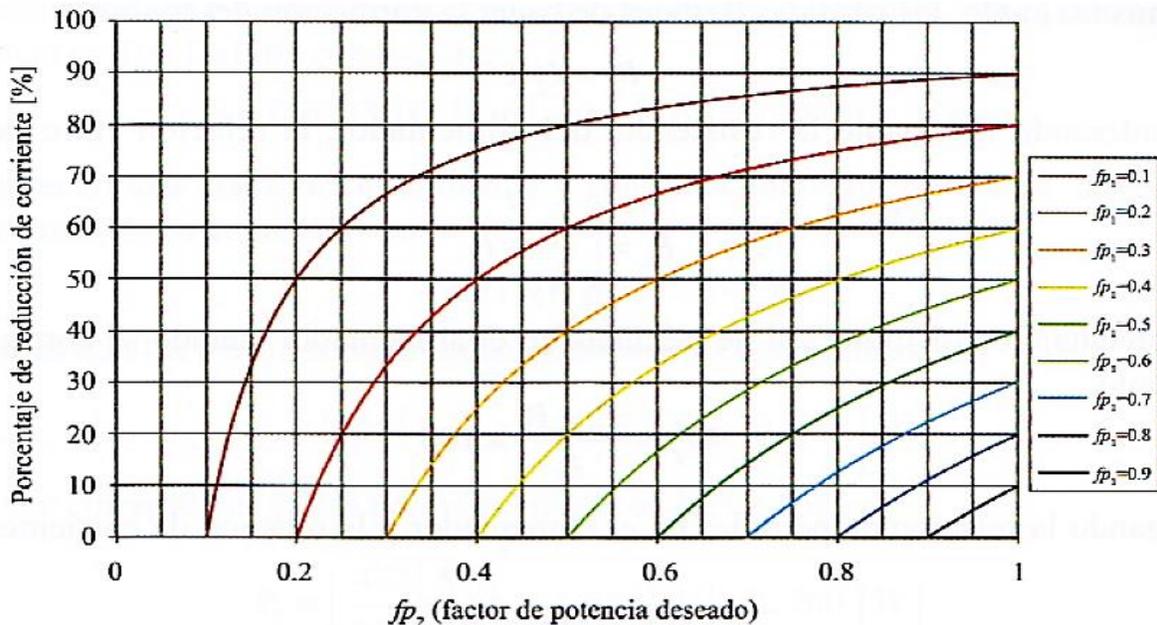


Gráfico 12. Curva de reducción de corriente en alimentadores

REDUCCIÓN DE LA CAÍDA DE TENSION

Para conocer la caída de tensión es necesario conocer el calibre y el tipo de conductor que se utiliza, ya que de esto depende la resistencia y la reactancia del mismo. El cálculo de dicho conductor se basará en la corriente máxima de operación marcada en el motor o en la placa de característica de control, o ambos. Si la corriente de funcionamiento máxima no aparece en la placa de características, su capacidad se basará en el 150 por ciento del valor dado en la tabla 14. Si es necesario se puede interpolar. Los conductores que alimentan a un motor en servicio continuo deberán tener una capacidad no inferior al 125 por ciento de la corriente a plena carga del motor.

The following values of full-load currents are typical for motors running at speeds usual for belted motors and motors with normal torque characteristics.

The voltages listed are rated motor voltages. The currents listed shall be permitted for system voltage ranges of 110 to 120, 220 to 240, 440 to 480, and 550 to 600 volts.

Horsepower	Induction-Type Squirrel Cage and Wound Rotor (Amperes)							Synchronous-Type Unity Power Factor* (Amperes)			
	115 Volts	200 Volts	208 Volts	230 Volts	460 Volts	575 Volts	2300 Volts	230 Volts	460 Volts	575 Volts	2300 Volts
½	4.4	2.5	2.4	2.2	1.1	0.9	—	—	—	—	—
¾	6.4	3.7	3.5	3.2	1.6	1.3	—	—	—	—	—
1	8.4	4.8	4.6	4.2	2.1	1.7	—	—	—	—	—
1½	12.0	6.9	6.6	6.0	3.0	2.4	—	—	—	—	—
2	13.6	7.8	7.5	6.8	3.4	2.7	—	—	—	—	—
3	—	11.0	10.6	9.6	4.8	3.9	—	—	—	—	—
5	—	17.5	16.7	15.2	7.6	6.1	—	—	—	—	—
7½	—	25.3	24.2	22	11	9	—	—	—	—	—
10	—	32.2	30.8	28	14	11	—	—	—	—	—
15	—	48.3	46.2	42	21	17	—	—	—	—	—
20	—	62.1	59.4	54	27	22	—	—	—	—	—
25	—	78.2	74.8	68	34	27	—	53	26	21	—
30	—	92	88	80	40	32	—	63	32	26	—
40	—	120	114	104	52	41	—	83	41	33	—
50	—	150	143	130	65	52	—	104	52	42	—
60	—	177	169	154	77	62	16	123	61	49	12
75	—	221	211	192	96	77	20	155	78	62	15
100	—	285	273	248	124	99	26	202	101	81	20
125	—	359	343	312	156	125	31	253	126	101	25
150	—	414	396	360	180	144	37	302	151	121	30
200	—	552	528	480	240	192	49	400	201	161	40
250	—	—	—	—	302	242	60	—	—	—	—
300	—	—	—	—	361	289	72	—	—	—	—
350	—	—	—	—	414	336	83	—	—	—	—
400	—	—	—	—	477	382	95	—	—	—	—
450	—	—	—	—	515	412	103	—	—	—	—
500	—	—	—	—	590	472	118	—	—	—	—

Tabla 14. Corriente a plena carga, motores trifásicos²⁰

Una vez determinada la corriente, se procede a leer de la tabla 13 el calibre del conductor, así como también el valor de resistencia y de reactancia por unidad de longitud.

²⁰NEC 2011

Calibre	Resistencia Ohm/Km	Reactancia Ohm/Km	Ampacidad
12	6.56	0.177	30
10	3.94	0.164	40
8	2.55	0.171	55
6	1.61	0.167	75
4	1.02	0.157	95
2	0.623	0.148	130
1/0	0.394	0.144	170
2/0	0.328	0.141	195
3/0	0.253	0.138	225
4/0	0.203	0.135	260
250	0.171	0.135	290
300	0.144	0.135	320
350	0.125	0.131	350

Tabla 15. Conductores de cobre THHN cobre, con su correspondiente resistencia, reactancia y ampacidad

Una vez determinada la impedancia del alimentador ($Z_{\text{conductor}}$), la caída de tensión en el alimentador antes de hacer la corrección del factor de potencia se expresa:

$$\Delta V_1 = I_1 Z = I_1 (R \cos \varphi + X \sin \varphi) \quad (35)$$

La caída de tensión en el alimentador después de hacer la corrección es:

$$\Delta V_2 = I_2 Z = I_2 (R \cos \varphi + X \sin \varphi) \quad (36)$$

El porcentaje de reducción de la caída de tensión en el alimentador, después de hacer la corrección del factor de potencia es:

$$\%_{ct} = \frac{\Delta V_1 - \Delta V_2}{\Delta V_1} * 100 \quad \text{sustituyendo} \quad \%_{ct} = \left(1 - \frac{fp_1}{fp_2}\right) * 100 \quad (37)$$

REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS ÓHMICAS EN LOS CONDUCTORES.

Las pérdidas óhmicas en un conductor eléctrico dependen de la resistencia del conductor y del cuadrado de la corriente que lo atraviesa; entre más potencia activa es transmitida más alto es el factor de potencia y más baja es la corriente, al aumentar el factor de potencia disminuyen las pérdidas en los conductores ubicados aguas arriba del punto en el que se llevara a cabo la corrección.

Las pérdidas óhmicas se analizaran para una distancia de 25m a partir del transformador hasta el motor, tal como se muestra en la siguiente figura.

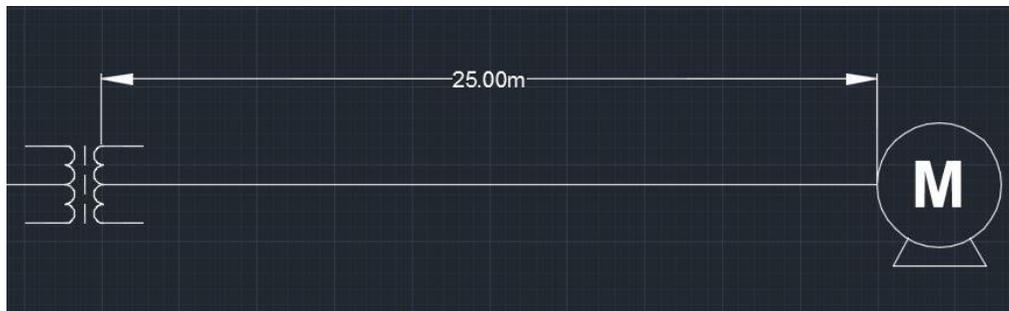


Figura 11. Distancia para la cual se evaluarán las pérdidas óhmicas

Las pérdidas antes de hacer la corrección del factor de potencia se expresan así:

$$P_{conductor\ 1} = I_1^2 R \quad (38)$$

Del mismo modo, las pérdidas después de hacer la corrección del factor de potencia:

$$P_{conductor\ 2} = I_2^2 R \quad (39)$$

Y ahora considerando invariable la resistencia del conductor, la relación entre pérdidas se calcula:

$$P_{conductor\ 2} = \left(\frac{I_2}{I_1}\right) P_{conductor\ 1} \quad (40)$$

El porcentaje de disminución de pérdidas en el conductor cuando se corrige el factor de potencia, se calcula:

$$\begin{aligned} \%_{rp} &= \frac{P_{conductor\ 1} - P_{conductor\ 2}}{P_{conductor\ 1}} * 100 \quad \text{sustituyendo } \%_{rp} \\ &= \left(1 - \left(\frac{fp_1}{fp_2}\right)^2\right) * 100 \quad (41) \end{aligned}$$

Dicha relación establece la proporción de disminución de las pérdidas en el conductor con respecto a las pérdidas sin corrección del factor de potencia. El gráfico 14 muestra las curvas del porcentaje de reducción de pérdidas en conductores para distintos factores de potencia actuales (fp_1) en función del fp deseado.

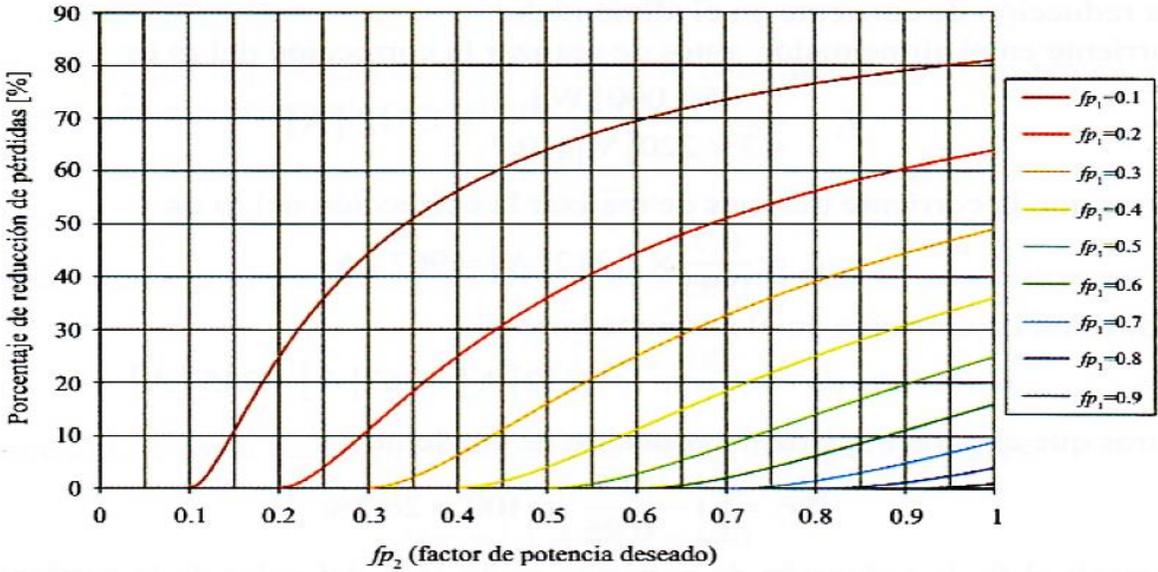


Gráfico 13. Curvas de reducción de pérdidas en alimentadores por corrección del factor de potencia

CÁLCULO DEL BANCO DE CAPACITORES PARA UN MOTOR NEMA PREMIUM DISEÑO B.

Como se explicó los motores NEMA Premium son los que poseen una mayor eficiencia por lo cual es el modelo indicado para iniciar cualquier proyecto industrial. A continuación se desarrolla un ejemplo para el cual se ha seleccionado un motor de alta eficiencia. La placa de datos del motor es obtenida a través de Motor Master²¹, la cual es mostrada a continuación.

Motor Details #1414

Prey Next Print Help Close

General Other Performance

Manufacturer: Baldor-Reliance
 Model: SUPER-E, NEMA Premium
 Catalog: EM2555T-4
 Motor type: NEMA Design B
 Size (HP): 100.0
 Speed (RPM): 1800

Figura 12. Datos generales del motor

Motor Details #1414

Prey Next Print Help Close

General Other Performance

Efficiency (%)

	IEC	IEEE
Full load:	N/A	95.6
75% load:	N/A	95.8
50% load:	N/A	95.4
25% load:	N/A	93.1

Power Factor (%)

Full load:	85.0
75% load:	82.0
50% load:	73.0
25% load:	51.0

Torque (ft-lbs)

Full load:	295.0
Breakdown:	843.0
Pull up:	0.0
Locked rotor:	500.0

Amperage (Amps)

Full load:	115.2
Unloaded:	41.5
Locked rotor:	765.0

Figura 13. Datos de eficiencia y factor de potencia del motor, 460V

²¹ Software Motor-Master International, Energy Efficiency and Renewable Energy

Ejemplo1.

Con los datos del motor mostrado en las figuras 12 y 13, calcular la capacidad del banco de capacitores para los siguientes factores de potencia 0.94, 0.96, 0.98, 1. También calcular la reducción de la corriente en los alimentadores, reducción de pérdidas generadas en los alimentadores, reducción de la caída de tensión.

$$P_{salida} = 100HP = 74.57 kW$$

$$P_{entrada} = \frac{P_{sal}}{\eta} = 78.0 KW$$

$$\text{Tensión Nominal} = 460V$$

- **Potencia requerida del banco de capacitores para mejorar el factor de potencia de 0.85 a 0.94**

$$\varphi_1 = \cos^{-1}(fp_1) = \cos^{-1}(0.85) = 31.78^\circ$$

$$\varphi_2 = \cos^{-1}(fp_2) = \cos^{-1}(0.94) = 19.94^\circ$$

$$Q_c = Q_1 - Q_2 = P_{ent}[\tan(\varphi_1) - \tan(\varphi_2)] = 78.0KW[\tan(31.78) - \tan(19.94)]$$

$$Q_c = 20.0KVAR$$

Potencia liberada del transformador

$$S_L = \frac{P_{ent}}{fp_1} - \frac{P_{ent}}{fp_2} = 78.0KW \left(\frac{1}{0.85} - \frac{1}{0.94} \right) = 8.78KVA$$

Reducción de corriente en los conductores

$$I_1 = \frac{P_{sal}}{\sqrt{3}V_L fp_1 \eta} = \frac{74.57}{\sqrt{3}(460)(0.85)(0.956)} = 115.17A$$

Calibre del conductor $I_{alim} = 115.17 * 1.5 = 172.75A$ *equivale a un AWG 1/0*

$$I_2 = \frac{P}{\sqrt{3}V_L fp_2 \eta} = \frac{74.57}{\sqrt{3}(460)(0.94)(0.956)} = 104.15A$$

Reducción de pérdidas en los conductores

La resistencia longitudinal de un conductor de 1/0 es $0.394 \Omega/km$ y su reactancia es $0.144 \Omega/km$. Entonces la resistencia en 25m del conductor es:

$$R_{conductor} = 0.394 \Omega/km * 0.025km = 0.00985\Omega$$

$$X_{conductor} = 0.144 \Omega/km * 0.025km = 0.0036\Omega$$

Las pérdidas en el conductor antes de corregir el factor de potencia es:

$$P_{conductor1} = 3I_1^2 R = 3(115.17)^2 * 0.00985 = 391.96 W$$

$$P_{conductor2} = 3I_2^2 R = 3(104.15)^2 * 0.00985 = 320.54 W$$

También se puede estimar el ahorro de energía que se obtiene al reducir las pérdidas en los conductores, de la siguiente manera:

$$\Delta E = \frac{\Delta P \times \text{horas/mes} \times 12 \text{ meses}}{1000} \quad (42)$$

Donde

ΔP : Diferencia de potencias, potencia sin el banco de capacitores menos potencia corregida

horas/mes : Horas de utilización mensuales de la máquina

Asumiendo que el motor funciona trece horas diarias, en horario de 5:00 a.m. a 5:59 p.m. (resto), y cinco horas diarias, en horario de 6:00 p.m. a 10:59 p.m. (punta), el ΔE es:

$$\Delta E = \frac{(391.96 - 320.54) \times 390 \times 12}{1000} = 334.24 kWh$$

$$\Delta E = \frac{(391.96 - 320.54) \times 150 \times 12}{1000} = 128.55 kWh$$

Asumiendo que la distribuidora es CAESS, el cliente recibe el servicio en media tensión con medición horaria y es considerado mediana demanda. De acuerdo al pliego tarifario que entró en vigencia en octubre de 2014 (ver anexos), el costo del kWh es:

$$$/kWh = 0.183518 \quad (\text{resto})$$

$$$/kWh = 0.178932 \quad (\text{punta})$$

El ahorro de dinero anual estimado es:

$$\text{Ahorro} = \$/kWh \times \Delta E = (334.24 \times 0.183518) + (128.55 \times 0.178932) = \$84.34$$

Reducción de la caída de tensión:

$$\Delta V_1 = I_1 Z = I_1(R \cos \varphi + X \sin \varphi) = 115.17(0.00985 * \cos 0.85 + 0.0036 * \sin 0.85)$$

$$\Delta V_1 = 1.14V$$

$$\Delta V_2 = I_2 Z = I_2(R \cos \varphi + X \sin \varphi) = 104.15(0.00985 * \cos 0.94 + 0.0036 * \sin 0.94)$$

$$\Delta V_2 = 1.03V$$

- **Potencia requerida del banco de capacitores para mejorar el factor de potencia de 0.85 a 0.96**

$$\varphi_1 = \cos^{-1}(fp_1) = \cos^{-1}(0.85) = 31.78^\circ$$

$$\varphi_2 = \cos^{-1}(fp_2) = \cos^{-1}(0.96) = 16.26^\circ$$

$$Q_c = Q_1 - Q_2 = P[\tan(\varphi_1) - \tan(\varphi_2)] = 78KW[\tan(31.78) - \tan(16.26)]$$

$$Q_c = 25.57KVAR$$

Potencia liberada del transformador

$$S_L = \frac{P}{fp_1} - \frac{P}{fp_2} = 78KW \left(\frac{1}{0.85} - \frac{1}{0.96} \right) = 10.51KVA$$

Reducción de corriente en los conductores

$$I_1 = \frac{P}{\sqrt{3}V_L fp_1 \eta} = \frac{74.57}{\sqrt{3}(460)(0.85)(0.956)} = 115.17A$$

Calibre del conductor $I_{CON} = 115.17 * 1.5 = 172.75A$ *equivale a un AWG 1/0*

$$I_2 = \frac{P}{\sqrt{3}V_L fp_2 \eta} = \frac{74.57}{\sqrt{3}(460)(0.96)(0.956)} = 101.98A$$

Las pérdidas en el conductor antes de corregir el factor de potencia es:

$$P_{conductor1} = 3I_1^2 R = 3(115.17)^2 * 0.00985 = 391.96 W$$

$$P_{conductor2} = 3I_2^2 R = 3(101.98)^2 * 0.00985 = 307.32 W$$

$$\Delta E = \frac{(391.96 - 307.32) \times 390 \times 12}{1000} = 396.12 \text{ kWh}$$

$$\Delta E = \frac{(391.96 - 307.32) \times 150 \times 12}{1000} = 151.96 \text{ kWh}$$

$$\text{Ahorro} = \$/\text{kWh} \times \Delta E = (396.12 \times 0.183518) + (151.96 \times 0.178932) = \$99.89$$

Reducción de la caída de tensión:

$$\Delta V_1 = I_1 Z = I_1 (R \cos fp + X \sin fp)$$

$$= 115.17(0.00985 * \cos 0.85 + 0.0036 * \sin 0.85)$$

$$\Delta V_1 = 1.14V$$

$$\Delta V_2 = I_2 Z = I_2 (R \cos \varphi + X \sin \varphi) = 101.98(0.00985 * \cos 0.96 + 0.0036 * \sin 0.96)$$

$$\Delta V_2 = 1.01V$$

- **Potencia requerida del banco de capacitores para mejorar el factor de potencia de 0.85 a 0.98**

$$\varphi_1 = \cos^{-1}(fp_1) = \cos^{-1}(0.85) = 31.78^\circ$$

$$\varphi_2 = \cos^{-1}(fp_2) = \cos^{-1}(0.98) = 11.47^\circ$$

$$Q_c = Q_1 - Q_2 = P[\tan(\varphi_1) - \tan(\varphi_2)] = 78KW[\tan(31.78) - \tan(11.47)]$$

$$Q_c = 32.49KVAR$$

Potencia liberada del transformador

$$S_L = \frac{P}{fp_1} - \frac{P}{fp_2} = 78KW \left(\frac{1}{0.85} - \frac{1}{0.98} \right) = 12.17KVA$$

Reducción de corriente en los conductores

$$I_1 = \frac{P}{\sqrt{3}V_L fp_1 \eta} = \frac{74.57}{\sqrt{3}(460)(0.85)(0.956)} = 115.17A$$

Calibre del conductor $I_{CON} = 115.17 * 1.5 = 172.75A$ *equivale a un AWG 1/0*

$$I_2 = \frac{P}{\sqrt{3}V_L f p_2 \eta} = \frac{74.57}{\sqrt{3}(460)(0.98)(0.956)} = 99.89 \text{ A}$$

Las pérdidas en el conductor antes de corregir el factor de potencia es:

$$P_{conductor1} = 3I_1^2 R = 3(115.17)^2 * 0.00985 = 391.96 \text{ W}$$

$$P_{conductor2} = 3I_2^2 R = 3(99.89)^2 * 0.00985 = 294.85 \text{ W}$$

$$\Delta E = \frac{(391.96 - 294.85) \times 390 \times 12}{1000} = 454.47 \text{ kWh}$$

$$\Delta E = \frac{(391.96 - 294.85) \times 150 \times 12}{1000} = 174.80 \text{ kWh}$$

$$\text{Ahorro} = \$/\text{kWh} \times \Delta E = (454.47 \times 0.183518) + (174.80 \times 0.178932) = \$114.68$$

Reducción de la caída de tensión:

$$\Delta V_1 = I_1 Z = I_1 (R \cos fp + X \sin fp) = 115.17(0.00985 * \cos 0.85 + 0.0036 * \sin 0.85)$$

$$\Delta V_1 = 1.14 \text{ V}$$

$$\Delta V_2 = I_2 Z = I_2 (R \cos fp + X \sin fp) = 99.89(0.00985 * \cos 0.98 + 0.0036 * \sin 0.98)$$

$$\Delta V_2 = 0.98 \text{ V}$$

- **Potencia requerida del banco de capacitores para mejorar el factor de potencia de 0.85 a 1**

$$\varphi_1 = \cos^{-1}(fp_1) = \cos^{-1}(0.85) = 31.78^\circ$$

$$\varphi_2 = \cos^{-1}(fp_2) = \cos^{-1}(1) = 0^\circ$$

$$Q_c = Q_1 - Q_2 = P[\tan(\varphi_1) - \tan(\varphi_2)] = 78 \text{ KW}[\tan(31.78) - \tan(0)]$$

$$Q_c = 48.32 \text{ KVAR}$$

Potencia liberada del transformador

$$S_L = \frac{P}{fp_1} - \frac{P}{fp_2} = 78 \text{ KW} \left(\frac{1}{0.85} - \frac{1}{1} \right) = 13.76 \text{ KVA}$$

Reducción de corriente en los conductores

$$I_1 = \frac{P}{\sqrt{3}V_L f p_1 \eta} = \frac{74.57}{\sqrt{3}(460)(0.85)(0.956)} = 115.17 \text{ A}$$

Calibre del conductor $I_{CON} = 115.17 * 1.5 = 172.75 \text{ A}$ *equivale a un AWG 1/0*

$$I_2 = \frac{P}{\sqrt{3}V_L f p_2 \eta} = \frac{74.57}{\sqrt{3}(460)(1)(0.956)} = 97.90 \text{ A}$$

Las pérdidas en el conductor antes de corregir el factor de potencia es:

$$P_{conductor1} = 3I_1^2 R = 3(115.17)^2 * 0.00985 = 391.96 \text{ W}$$

$$P_{conductor} = 3I_2^2 R = 3(97.90)^2 * 0.00985 = 283.21 \text{ W}$$

$$\Delta E = \frac{(391.96 - 283.21) \times 390 \times 12}{1000} = 508.95 \text{ kWh}$$

$$\Delta E = \frac{(391.96 - 283.21) \times 150 \times 12}{1000} = 195.75 \text{ kWh}$$

$$\text{Ahorro} = \$/\text{kWh} \times \Delta E = (508.95 \times 0.183518) + (195.75 \times 0.178932) = \$128.42$$

Reducción de la caída de tensión:

$$\Delta V_1 = I_1 Z = I_1 (R \cos fp + X \sin fp)$$

$$= 115.17(0.00985 * \cos 0.85 + 0.0036 * \sin 0.85)$$

$$\Delta V_1 = 1.14 \text{ V}$$

$$\Delta V_2 = I_2 Z = I_2 (R \cos fp + X \sin fp) = 97.90(0.00985 * \cos 1 + 0.0036 * \sin 1)$$

$$\Delta V_2 = 0.97 \text{ V}$$

Resumen de los datos obtenidos para ejemplo 1

Los datos obtenidos para los diferentes valores del ejemplo 1 son mostrados en la tabla 16, las pérdidas disminuyen al ir aumenta el tamaño del banco de capacitores, las pérdidas en los alimentadores (I^2R) son las que más significativamente disminuyen, cabe destacar que si disminuye la corriente también lo harán las pérdidas. Ya que las pérdidas son directamente proporcionales a la corriente.

fp	Reducción I %	Reducción $P_{conductor}$ %	Reducción ΔV %	KVAR
0.94	9.57	18.22	10.52	20.0
0.96	11.45	21.59	12.85	25.57
0.98	13.26	24.76	15.20	32.49
1	14.99	27.75	17.53	48.32

Tabla 16. Datos obtenidos para ejemplo 1.

Ejemplo 2

Motor NEMA PREMIUM, tipo B

Realizar el ejemplo 1 con la variante de incrementar la tensión de operación de 460 V a 480 V para lograr una reducción en las pérdidas en base a lo analizado en la regulación de la tensión.

Potencia requerida del banco de capacitores para mejorar el factor de potencia de 0.85 a 0,94

$$\varphi_1 = \cos^{-1}(fp_1) = \cos^{-1}(0.85) = 31.78^\circ$$

$$\varphi_2 = \cos^{-1}(fp_2) = \cos^{-1}(0.94) = 19.94^\circ$$

$$Q_c = Q_1 - Q_2 = P[\tan(\varphi_1) - \tan(\varphi_2)] = 78KW[\tan(31.78) - \tan(19.94)]$$

$$Q_c = 20 KVAR$$

Potencia liberada del transformador

$$S_L = \frac{P}{fp_1} - \frac{P}{fp_2} = 78 kW \left(\frac{1}{0.85} - \frac{1}{0.94} \right) = 8.78 kVA$$

Reducción de corriente en los conductores

$$I_1 = \frac{P}{\sqrt{3}V_L fp_1 \eta} = \frac{74.57}{\sqrt{3}(480)(0.85)(0.956)} = 110.37A$$

$$I_2 = \frac{P}{\sqrt{3}V_L fp_2 \eta} = \frac{74.57}{\sqrt{3}(480)(0.94)(0.956)} = 99.81A$$

Reducción de pérdidas en los conductores

La resistencia longitudinal de un conductor de 1/0 es $0.394 \Omega/km$ y su reactancia es $0.144 \Omega/km$ de Entonces la resistencia en 25m del conductor es:

$$R_{conductor} = 0.394 \Omega/km * 0.025km = 0.00985\Omega$$

$$X_{conductor} = 0.144 \Omega/km * 0.025km = 0.0036\Omega$$

Las pérdidas en el conductor antes de corregir el factor de potencia es:

$$P_{conductor1} = 3I_1^2R = 3(110.37)^2 * 0.00985 = 359.96 W$$

$$P_{conductor2} = 3I_2^2R = 3(99.81)^2 * 0.00985 = 294.38 W$$

$$\Delta E = \frac{(359.96 - 294.37) * 390 * 12}{1000} = 306.94 kWh$$

$$\Delta E = \frac{(359.96 - 294.37) * 150 * 12}{1000} = 118.06 kWh$$

$$Ahorro = \$/kWh * \Delta E = (306.94 * 0.183518) + (118.06 * 0.178932) = \$77.45$$

Reducción de la caída de tensión:

$$\Delta V_1 = I_1 Z_{conductor} = I_1 (R \cos fp + X \sin fp)$$

$$\Delta V_1 = 110.37(0.00985 * \cos 0.85 + 0.0036 * \sin 0.85)$$

$$\Delta V_1 = 1.09V$$

$$\Delta V_2 = I_2 Z_{conductor} = I_2 (R \cos fp + X \sin fp)$$

$$\Delta V_2 = 99.81(0.00985 * \cos 0.94 + 0.0036 * \sin 0.94)$$

$$\Delta V_2 = 0.98V$$

Potencia requerida del banco de capacitores para mejorar el factor de potencia de

0.85 a 0.96

$$\varphi_1 = \cos^{-1}(fp_1) = \cos^{-1}(0.85) = 31.78^\circ$$

$$\varphi_2 = \cos^{-1}(fp_2) = \cos^{-1}(0.96) = 16.26^\circ$$

$$Q_c = Q_1 - Q_2 = P[\tan(\varphi_1) - \tan(\varphi_2)] = 78 KW[\tan(31.78) - \tan(16.26)]$$

$$Q_c = 25.6 kVAR$$

Potencia liberada del transformador

$$S_L = \frac{P}{fp_1} - \frac{P}{fp_2} = 78 \text{ kW} \left(\frac{1}{0.85} - \frac{1}{0.96} \right) = 10.51 \text{ kVA}$$

Reducción de corriente en los conductores

$$I_1 = \frac{P}{\sqrt{3}V_L fp_1 \eta} = \frac{74.57}{\sqrt{3}(480)(0.85)(0.956)} = 110.37 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{P}{\sqrt{3}V_L fp_2 \eta} = \frac{74.57}{\sqrt{3}(480)(0.96)(0.956)} = 97.73 \text{ A}$$

Las pérdidas en el conductor antes de corregir el factor de potencia es:

$$P_{conductor1} = 3I_1^2 R = 3(110.37)^2 * 0.00985 = 359.96 \text{ W}$$

$$P_{conductor2} = 3I_2^2 R = 3(97.73)^2 * 0.00985 = 282.24 \text{ W}$$

$$\Delta E = \frac{(359.96 - 282.24) \times 390 \times 12}{1000} = 363.67 \text{ kWh}$$

$$\Delta E = \frac{(359.96 - 282.24) \times 150 \times 12}{1000} = 139.91 \text{ kWh}$$

$$\text{Ahorro} = \$/\text{kWh} \times \Delta E = (363.67 \times 0.183518) + (139.91 \times 0.178932) = \$91.79$$

Reducción de la caída de tensión:

$$\Delta V_1 = I_1 Z_{conductor} = I_1 (R \cos fp + X \sin fp)$$

$$\Delta V_1 = 110.37(0.00985 * \cos 0.85 + 0.0036 * \sin 0.85)$$

$$\Delta V_1 = 1.09 \text{ V}$$

$$\Delta V_2 = I_2 Z_{conductor} = I_2 (R \cos fp + X \sin fp)$$

$$\Delta V_2 = 97.73(0.00985 * \cos 0.96 + 0.0036 * \sin 0.96)$$

$$\Delta V_2 = 0.96 \text{ V}$$

Potencia requerida del banco de capacitores para mejorar el factor de potencia de 0.85 a 0.98

$$\varphi_1 = \cos^{-1}(fp_1) = \cos^{-1}(0.85) = 31.78^\circ$$

$$\varphi_2 = \cos^{-1}(fp_2) = \cos^{-1}(0.98) = 11.47^\circ$$

$$Q_c = Q_1 - Q_2 = P[\tan(\varphi_1) - \tan(\varphi_2)] = 78 \text{ kW}[\tan(31.78) - \tan(11.47)]$$

$$Q_c = 32.49 \text{ kVAR}$$

Potencia liberada del transformador

$$S_L = \frac{P}{fp_1} - \frac{P}{fp_2} = 78 \text{ kW} \left(\frac{1}{0.85} - \frac{1}{0.98} \right) = 12.17 \text{ kVA}$$

Reducción de corriente en los conductores

$$I_1 = \frac{P}{\sqrt{3}V_L fp_1 \eta} = \frac{74.57}{\sqrt{3}(480)(0.85)(0.956)} = 110.37 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{P}{\sqrt{3}V_L fp_2 \eta} = \frac{74.57}{\sqrt{3}(480)(0.98)(0.956)} = 95.73 \text{ A}$$

Las pérdidas en el conductor antes de corregir el factor de potencia es:

$$P_{conductor1} = 3I_1^2 R = 3(110.37)^2 * 0.00985 = 359.96 \text{ W}$$

$$P_{conductor2} = 3I_2^2 R = 3(95.73)^2 * 0.00985 = 270.80 \text{ W}$$

$$\Delta E = \frac{(359.96 - 270.80) \times 390 \times 12}{1000} = 417.28 \text{ kWh}$$

$$\Delta E = \frac{(359.96 - 270.80) \times 150 \times 12}{1000} = 160.49 \text{ kWh}$$

$$\text{Ahorro} = \$/\text{kWh} \times \Delta E = (417.28 \times 0.183518) + (160.49 \times 0.178932) = \$105.29$$

Reducción de la caída de tensión:

$$\Delta V_1 = I_1 Z = I_1 (R \cos fp + X \sin fp)$$

$$\Delta V_1 = 110.37(0.00985 * \cos 0.85 + 0.0036 * \sin 0.85)$$

$$\Delta V_1 = 1.09V$$

$$\Delta V_2 = I_2 Z = I_2 (R \cos fp + X \sin fp)$$

$$\Delta V_2 = 95.73(0.00985 * \cos 0.98 + 0.0036 * \sin 0.98)$$

$$\Delta V_2 = 0.94V$$

Potencia requerida del banco de capacitores para mejorar el factor de potencia de 0.85 a 1

$$\varphi_1 = \cos^{-1}(fp_1) = \cos^{-1}(0.85) = 31.78^\circ$$

$$\varphi_2 = \cos^{-1}(fp_2) = \cos^{-1}(1) = 0^\circ$$

$$Q_c = Q_1 - Q_2 = P[\tan(\varphi_1) - \tan(\varphi_2)] = 78 \text{ kW}[\tan(31.78) - \tan(0)]$$

$$Q_c = 48.32 \text{ kVAR}$$

Potencia liberada del transformador

$$S_L = \frac{P}{fp_1} - \frac{P}{fp_2} = 78 \text{ kW} \left(\frac{1}{0.85} - \frac{1}{1} \right) = 13.76 \text{ kVA}$$

Reducción de corriente en los conductores

$$I_1 = \frac{P}{\sqrt{3}V_L fp_1 \eta} = \frac{74.57}{\sqrt{3}(480)(0.85)(0.956)} = 110.37A$$

$$I_2 = \frac{P}{\sqrt{3}V_L fp_2 \eta} = \frac{74.57}{\sqrt{3}(480)(1)(0.956)} = 93.82A$$

Las pérdidas en el conductor antes de corregir el factor de potencia es:

$$P_{conductor1} = 3I_1^2 R = 3(110.37)^2 * 0.00985 = 359.96 \text{ W}$$

$$P_{conductor2} = 3I_2^2 R = 3(93.82)^2 * 0.00985 = 260.10 \text{ W}$$

$$\Delta E = \frac{(359.96 - 260.10) \times 390 \times 12}{1000} = 467.34 \text{ kWh}$$

$$\Delta E = \frac{(359.96 - 260.10) \times 150 \times 12}{1000} = 179.75 \text{ kWh}$$

$$\text{Ahorro} = \$/\text{kWh} \times \Delta E = (467.34 \times 0.183518) + (179.75 \times 0.178932) = \$117.93$$

Reducción de la caída de tensión:

$$\Delta V_1 = I_1 Z = I_1 (R \cos fp + X \sin fp)$$

$$\Delta V_1 = 110.37(0.00985 * \cos 0.85 + 0.0036 * \sin 0.85)$$

$$\Delta V_1 = 1.09V$$

$$\Delta V_2 = I_2 Z = I_2 (R \cos fp + X \sin fp)$$

$$\Delta V_2 = 93.82(0.00985 * \cos 1 + 0.0036 * \sin 1)$$

$$\Delta V_2 = 0.92V$$

Tensión V	$I_{conductor}(A)$	$P_{conductor}(W)$	$\%r_c$	$\%r_p$
460	99.89	98.28	13.26	24.77
480	95.73	90.28	16.87	30.91

Tabla 17. Operación del motor a su tensión de placa y a una tensión superior, para un factor de potencia de 0.98

Como se ha explicado anteriormente y con los resultados presentados en la tabla anterior, se comprueba que al aumentar la tensión de operación en un motor en un 5% se reducen la corriente y las pérdidas en los alimentadores, dichos parámetros son los que más pérdidas aportan al motor. Por eso es importante hacer un pequeño incremento en la tensión de operación del motor, cabe destacar que el motor puede operar a un máximo de $\pm 10\%$ de su tensión de placa, se debe tener precaución de no exceder dicho porcentaje, de lo contrario se producirían daños en el equipo.

MÉTODOS DE INSTALACIÓN DE CAPACITORES EN BAJA TENSION

El conocimiento de las características de los distintos tipos de bancos de capacitores permitirá una selección correcta. Hasta ahora sólo se ha demostrado el efecto positivo que la corrección del factor de potencia tiene en una instalación, sin ahondar en detalles de cómo y dónde se conectan los capacitores. A continuación se presentan las diferentes configuraciones de bancos, las diferentes ubicaciones dentro de la instalación y se recomiendan las más apropiadas de acuerdo a la aplicación específica.

BANCO FIJO DE CAPACITORES

Los bancos fijos de capacitores son empleados para corregir el factor de potencia de una carga o de un grupo de cargas cuyo consumo de potencia reactiva es constante. Por lo anterior, todos los capacitores que forman parte de un banco fijo, se encuentran conectados a la red eléctrica permanentemente, de tal manera que para dar mantenimiento o reemplazar algunos de sus componentes, es necesario desconectar el banco completo.

La ventaja principal del interruptor termomagnético es que permite la desconexión del banco de capacitores para su revisión y mantenimiento sin necesidad de desconectar el circuito completo. Por lo anterior, es preferible tener un interruptor termomagnético en el banco de capacitores.

El objetivo de un banco de capacitores fijo es que se mantenga conectado mientras el equipo que requiere la compensación esté conectado a la línea de la red eléctrica. Como un banco fijo de capacitores aporta una potencia reactiva constante, se deben utilizar en cargas o instalaciones en donde el consumo de potencia reactiva también sea constante.

Cuando las variaciones en el consumo de potencia reactiva son grandes, pueden ocurrir dos situaciones: o el banco de capacitores fijo no realiza la compensación necesaria para alcanzar el factor de potencia objetivo, o, en algunos casos, sobrecompensa. Este último efecto se caracteriza por elevar la tensión, en el lugar donde se encuentra conectado el banco de capacitores por arriba de su valor nominal.

En el Reglamento Eléctrico para Baja Tensión (REBT) de España se deduce que:

- Se podrá realizar la compensación de la energía reactiva pero en ningún momento la energía absorbida por la red podrá ser capacitiva.
- Se podrá realizar la compensación fija para uno o varios receptores siempre que funcionen por medio de un único interruptor, es decir simultáneamente.

Los factores que limitan el tamaño del banco de capacitores en situaciones en donde el motor se conecta junto con el banco de capacitores son:

- Sobretensiones por autoexcitación.
- Corrientes excesivas de magnetización.
- Torques transitorios.

Respecto a los problemas de sobretensión por autoexcitación, estos se presentan por el uso de bancos de capacitores con potencias muy grandes; supóngase que se tiene un motor de inducción (M), cuya curva de saturación en vacío se muestra en el gráfico 14. Dicha curva relaciona la corriente de vacío con la tensión en sus terminales. Un banco de capacitores cuya potencia es Q_1 , se utiliza para corregir el factor de potencia del motor. El comportamiento del banco se expresa mediante la relación:

$$V_c = X_c I_c \quad (43)$$

La relación anterior se encuentra representada en el gráfico 14, mediante una recta, cuya pendiente es precisamente el valor de la reactancia del banco. Esta recta cruza la curva de saturación en vacío en cierto nivel de tensión, que es la tensión nominal.

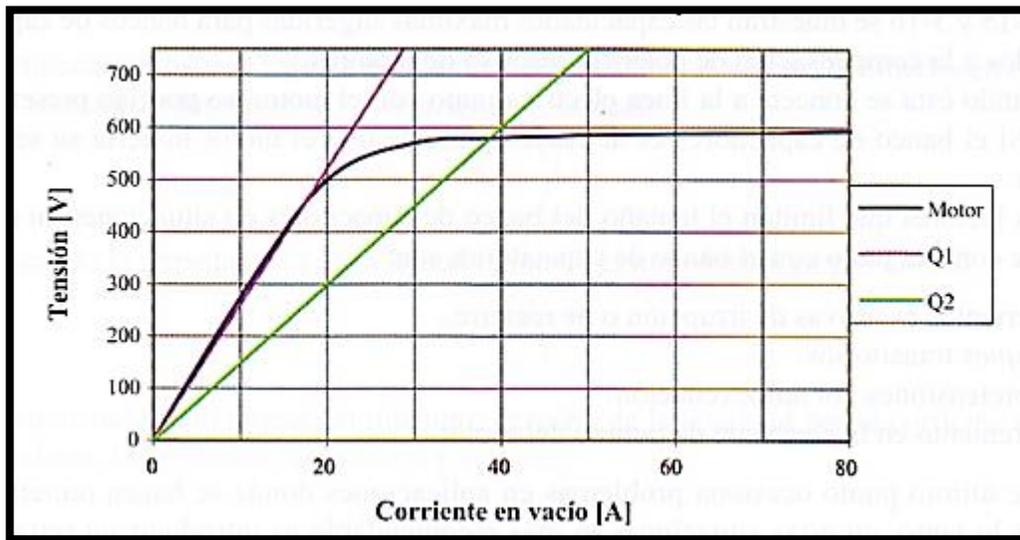


Gráfico 14. Curva de magnetización en vacío de un motor y la curva de comportamiento de dos bancos de capacitores, $Q_1 < Q_2$, que se utilizan para compensar el factor de potencia de M

Supóngase que otro banco de capacitores, cuya potencia es Q_2 , se utiliza para compensar al motor. Con $Q_2 > Q_1$, la pendiente de la recta del comportamiento de este nuevo banco es menor, lo que significa una reactancia más pequeña. Ya que

$$X_c = \frac{V_c^2}{Q_c}$$

La recta referida cruza la curva de saturación en vacío del motor en un valor mayor de tensión. El resultado de esto es que el motor se excita hasta el punto de cruce entre la recta del banco de capacitores y su curva de saturación, lo que genera sobretensiones en el motor. Para evitar este tipo de problemas causados por una posible sobretensión, la IEEE recomienda en su norma 141-1993 no sobrepasar la capacidad de reactivos en kVAR que se muestran en la tabla de los anexos A, B y C de acuerdo a la potencia de salida nominal del motor, número de polos y velocidad síncrona.

Incluso si el condensador ha sido correctamente seleccionado para evitar sobretensión, aún puede ser lo suficientemente grande para producir torques excesivos en ciertas aplicaciones de motores con cargas de alta inercia, tales como grandes compresores y aires acondicionados.

Cuando los capacitores están conmutando junto con motores prolonga la duración de la tensión residual ya que esta baja lentamente después de la des-energización del motor, la tensión en sus terminales no baja a cero rápidamente como sucede cuando se desconecta un motor que no cuenta con capacitores. Esto se debe a que la corriente de descarga de los capacitores mantiene un campo magnético en las bobinas del motor, induciéndose una tensión de auto excitación mientras el motor sigue girando por su propia inercia. Si los capacitores están excedidos en potencia reactiva, esta tensión puede alcanzar valores más altos que el voltaje nominal del motor, poniendo en peligro el aislamiento de éste y de los propios capacitores.

Los pares transitorios altos pueden dañar el motor y equipos, mientras que las sobretensiones pueden ser producidas en el eje y acoplamientos si el motor se vuelve a conectar mientras aún está girando. La magnitud de las tensiones de línea y del motor, el ángulo entre ellos, y la impedancia del motor determinan el valor pico del par eléctrico. En los motores, el par transitorio pico no debe superar el par máximo admisible.

En el IEEE STD 141-1993 se definen las condiciones en las que no puede ser conectado un banco de capacitores a los bornes de un motor de inducción, en dicho estándar se recomiendan que nunca se debe de conectar el capacitor al motor en las condiciones:

- 1) Cuando se utilizan arrancadores de estado sólido.
- 2) Si el motor está sujeto a repetidas conmutaciones.

En estos casos las tensiones de autoexcitación y los picos transitorios de tensión pueden dañar tanto al motor como al capacitor, en el gráfico 15 se puede ver el efecto cuando entra en funcionamiento un banco de capacitores. En las instalaciones que presentan estas condiciones, el capacitor debe conectarse y desconectarse mediante un contactor interconectado con el motor de arranque, se deben utilizar contactores diseñados

especialmente para la maniobra de capacitores, ya que estos tienen la capacidad de reducir las corrientes de conexión transitorias.

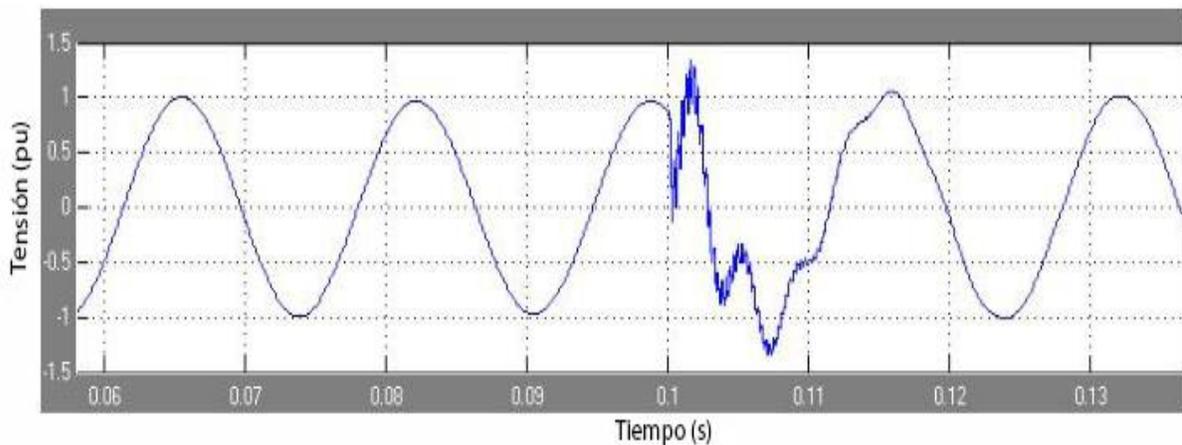


Gráfico 15. Tensión en por unidad a la entrada de un motor cuando conmuta con un banco de capacitores.

Un banco de capacitores es un equipo vulnerable, tanto a fallas como a condiciones anormales de operación. En cualquier instalación de estos es necesaria una protección adecuada. Según el NEC 2011 se deben de utilizar dos tipos de dispositivos para el buen funcionamiento del banco de capacitores:

- Contactor o medio de desconexión.

Este debe cumplir con la función de desconectar las tres fases simultáneamente. Desconectar el capacitor de la línea como un procedimiento normal de funcionamiento. La capacidad de este dispositivo no debe ser inferior al 135% de la corriente nominal del banco de capacitores y como se explicó anteriormente deben de ser especialmente diseñados para la operación de capacitores.

- Interruptor.

Este debe de proteger a los capacitores de las sobrecorrientes, dicho dispositivo debe proteger las tres fases del banco y debe ser programado para no dejar pasar corriente demasiado elevadas. Esta protección no es necesaria cuando el banco se coloca después del relé de sobrecarga del motor. Además deben ser aptos para soportar las corrientes transitorias que tienen lugar con la conexión y desconexión del banco. Estar coordinados con los aparatos de maniobra externos (contactores). Este debe ser dimensionado a un mínimo del 135% de la corriente nominal del banco. La siguiente tabla es una herramienta muy útil para seleccionar las protecciones y los alimentadores que se utilizan en un banco de capacitores.

Tensión	Potencia KVAR	Amps		Amps		Protección		Alimentado r Por fase
		220 V	440 V	240 V	480 V	ITM	Fusible	
240VC A	5	11		12		20	30	12
	10	22		24		40	60	10
	15	33		36		50	60	8
	20	44		48		70	100	6
	25	55		60		100	100	4
	30	66		72		100	150	2
	40	88		96		150	200	0
	50	110		120		175	200	2/0
60	132		145		200	250	3/0	
480VC A	10		11		12	20	30	12
	20		22		24	40	60	10
	30		33		36	50	60	8
	40		44		48	70	100	6
	50		55		60	100	100	4
	60		66		72	100	150	2
	70		77		84	150	150	2
	80		88		96	150	200	0
	100		110		120	175	200	2/0
	110		121		132	200	250	2/0
	120		132		145	200	250	3/0
	130		143		156	250	300	3/0

Tabla 18. Calibres de conductores, fusibles e interruptores termomagnéticos recomendados por GE

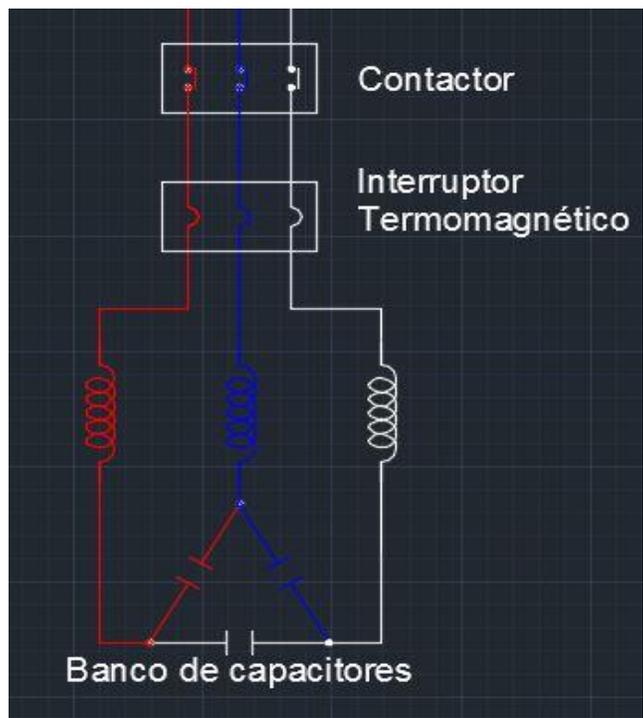


Figura 14. Diagrama de un banco de capacitores con sus respectivas protecciones

Cuando el banco de capacitores se conecta después del relé de sobrecarga del motor como se muestra en la figura 15, se debe considerar redimensionar dicho dispositivo, ya que un porcentaje o toda la corriente reactiva la aportara el banco de capacitores, y como se explicó anteriormente no es necesaria la aplicación del interruptor. Este diagrama aplica para los casos que no se necesita de un control de arranque (motores inferiores o iguales a 3HP). Si el banco se ubica antes del relé de sobrecarga no es necesario cambiarlo.

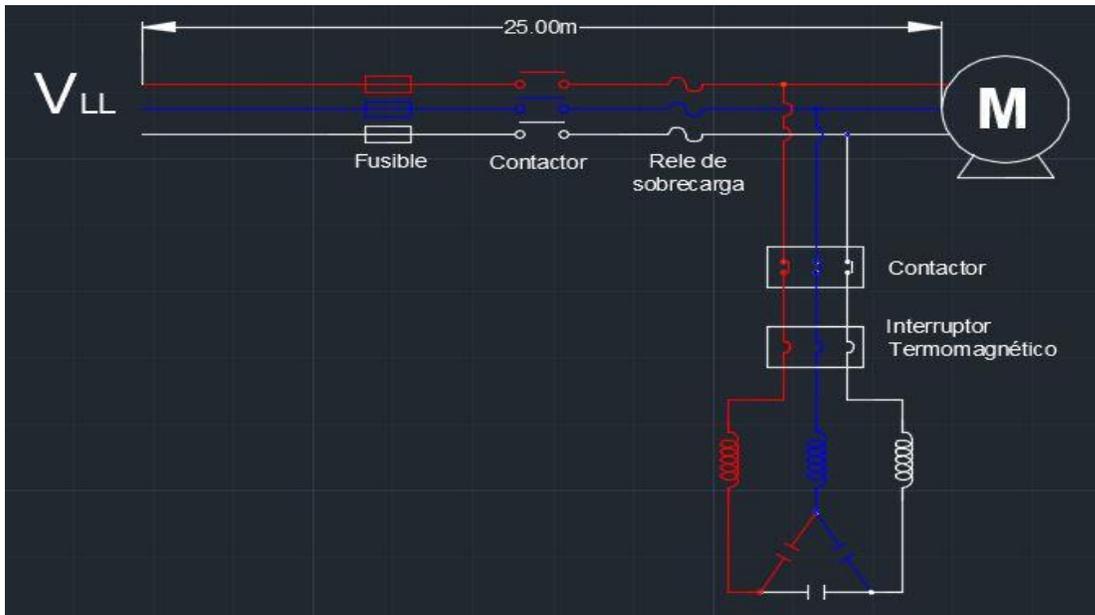


Figura 15. Banco de capacitores ubicado después del relé de sobrecarga

BANCO AUTOMÁTICO DE CAPACITORES

El banco automático de capacitores se caracteriza por tener varios grupos de celdas capacitivas. Las cuales se conectan y desconectan en función de las necesidades de corrección del factor de potencia de la instalación. Este funcionamiento hace que el banco automático de capacitores sea el medio más adecuado para corregir el factor de potencia sobre todo en instalaciones cuya potencia reactiva no es constante. Un banco automático en baja tensión, normalmente basa su principio de operación en un factor de potencia objetivo, el cual se debe alcanzar y mantener mediante la conexión y desconexión de los condensadores.

Es recomendable el uso de este equipo en instalaciones donde, como resultado de la operación normal, en cierto periodo no se requiere compensación, porque el factor de potencia de la carga es casi unitario; pero en otro periodo se requiere forzosamente la corrección gradual mediante la inyección de potencia reactiva. Un equipo de compensación automática está constituido por 3 elementos principales:

- **El regulador:** Cuya función es medir el factor de potencia de la instalación y dar las órdenes a los contactores para intentar aproximarse lo más posible al factor de potencia objetivo, conectando los distintos escalones de potencia reactiva.
- **Los contactores:** Son los elementos encargados de conectar los distintos condensadores que configuran la batería.
- **Los condensadores:** Son los elementos que aportan la energía reactiva a la instalación.

ESQUEMAS DE COMPENSACIÓN CON BANCOS DE CAPACITORES

COMPENSACIÓN INDIVIDUAL

Teóricamente, la compensación individual es la más conveniente, ya que la aportación de potencia reactiva se realiza justo en el punto donde se conecta la carga que requiere compensación. Con este esquema, el flujo de potencia reactiva se limita únicamente a la trayectoria comprendida entre el elemento a ser compensado y el banco de capacitores. De esta forma, se libera cierta capacidad reactiva del sistema, condición que siempre resultará favorable.

Debido a que el requerimiento de potencia reactiva se satisface en el mismo nodo al que se conecta la carga, se tendrá un mejor nivel de tensión en todo el alimentador. Si la compensación se llevara a cabo en forma individual en toda la instalación (figura 16), entonces en todo el sistema eléctrico se tendrían los siguientes beneficios:

- Menor cantidad de corriente circulando por el sistema, alimentadores y circuitos derivados compensados.
- Menores pérdidas en los conductores y en los transformadores dentro de la instalación.
- Menor caída de tensión en los conductores y transformadores dentro de la instalación.
- Liberación de la capacidad en el transformador principal.

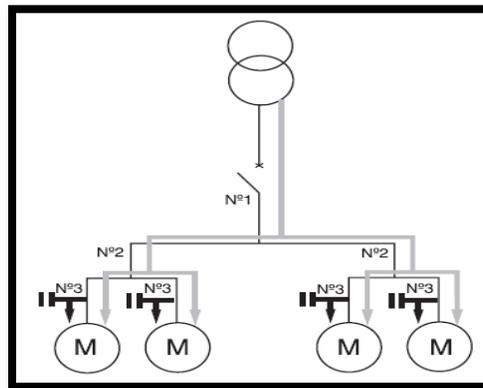


Figura 16. Compensación individual

La principal desventaja de este esquema es su costo, ya que la compensación a nivel individual de todas las cargas reactivas requiere un número muy elevado de bancos de capacitores lo cual la convierte en una solución cara.

COMPENSACIÓN CENTRAL

La compensación central en baja tensión tiene como ventaja principal el uso de un banco único de capacitores para llevar a cabo la corrección del factor de potencia. Esta ventaja se traduce en una serie de beneficios adicionales que son:

- Menor costo que el esquema individual.
- Supervisión fácil y rápida.

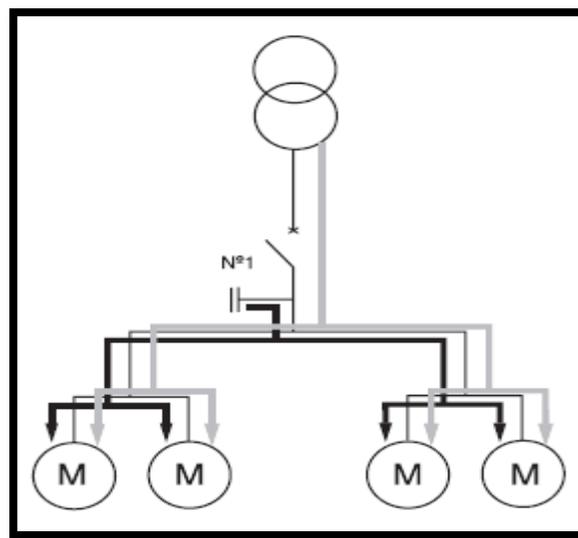


Figura 17. Compensación central

Como se muestra en la figura 17, con la compensación central se tiene flujo de potencia reactiva por toda la instalación desde la carga hasta el punto de compensación.

Con este esquema, se libera un buen porcentaje de la capacidad del transformador principal, ya que el banco de capacitores aporta la potencia reactiva requerida por la carga en el punto óptimo. Habrá que agregar que la corrección del factor de potencia en el secundario del transformador se traduce en una corrección consecuente de las tensiones.

Entre las desventajas de este esquema están: la corriente reactiva está presente en la instalación desde el nivel uno hasta los receptores, las pérdidas por efecto Joule en los cables no quedan disminuidas.

La principal desventaja de este esquema es que no sólo se corre el riesgo de una elevación de la tensión en el secundario del transformador, sino en toda la instalación. Esto ocurriría si la potencia reactiva requerida por la carga disminuye y el banco de capacitores aporta más potencia reactiva de la necesaria.

Se recomienda entonces utilizar compensación individual para reducir así las pérdidas óhmicas en los alimentadores, no sólo en los que van desde el banco hasta el motor, sino también en los alimentadores que vienen desde el transformador principal.

CONEXIONES DE BANCOS DE CAPACITORES

Existen tres configuraciones básicas de bancos de capacitores: estrella aterrizada, estrella sin aterrizar y delta. Los capacitores conectados en delta generalmente sólo se usan en baja tensión, donde una capacidad nominal estándar no está disponible para la conexión en estrella.

BANCOS CONECTADOS EN DELTA

Los bancos conectados en delta se usan generalmente sólo para tensiones de distribución y se configuran con un solo grupo en serie de capacitores especificados para tensión de línea a línea. Los bancos conectados en delta requieren un capacitor de dos terminales o unidades de un solo terminal con "RACKS" aislados. Los bancos conectados en delta se usan frecuentemente solo en bajas tensiones (inferiores a 2400V)²² porque las unidades para la conexión en estrella a 2400V no se encuentran fácilmente disponibles.

No pueden fluir corrientes de secuencia cero o armónicas de tercer orden dentro de un banco de capacitores conectado en delta.

Cuando se usa un grupo en serie por rama, el fusible del capacitor individual debe ser capaz de interrumpir la corriente de falla de cortocircuito entre fases del sistema. Este diseño puede necesitar fusibles limitadores de corriente.

Si se usan unidades de capacitor con fusible interno, se requiere la detección de desbalance para identificar un capacitor con elementos que han fallado. No se puede distinguir a simple vista un fusible fundido. Dos o más grupos en serie se requieren en cada unidad de capacitor para permitir a los fusibles internos interrumpir la corriente de falla.

Los diferentes tipos de conexión se ilustran en la figura 18.

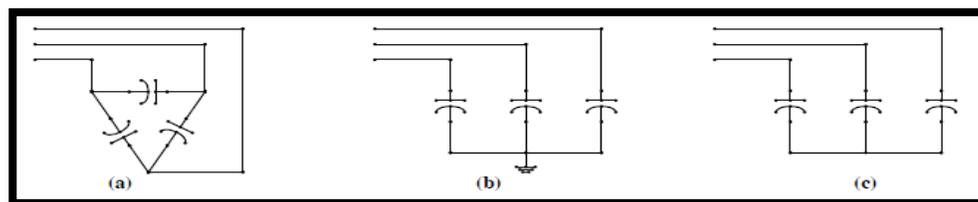


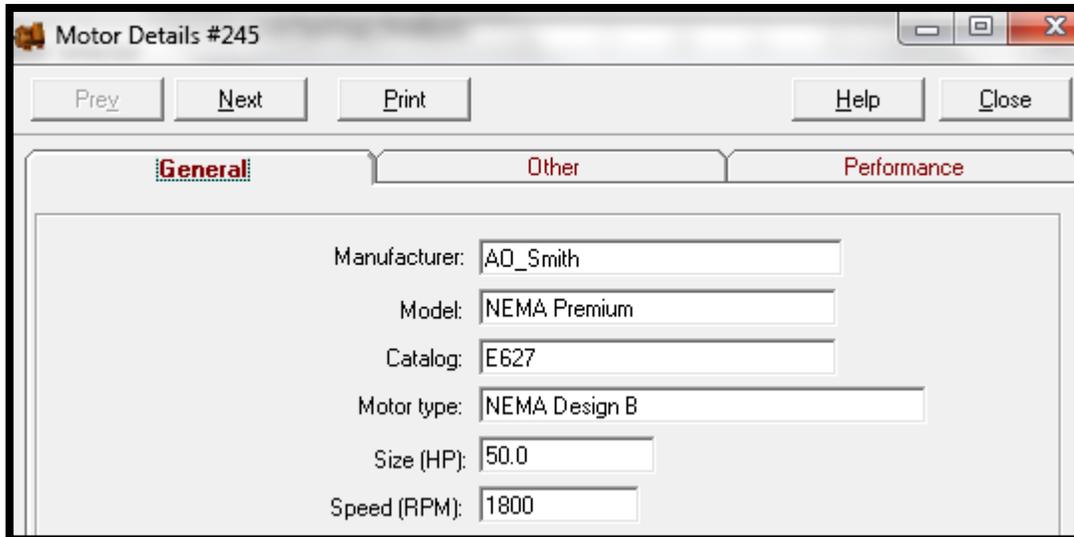
Figura 18. Configuración de los bancos, delta, estrella aterrizada y estrella sin aterrizar²³

²² IEEE std 1036-1992, Guide for application of shunt power capacitor

²³ IEEE std C.37.99-2000

Cálculos para motores de 50, 75, 100 y 125 HP

Motor 50hp

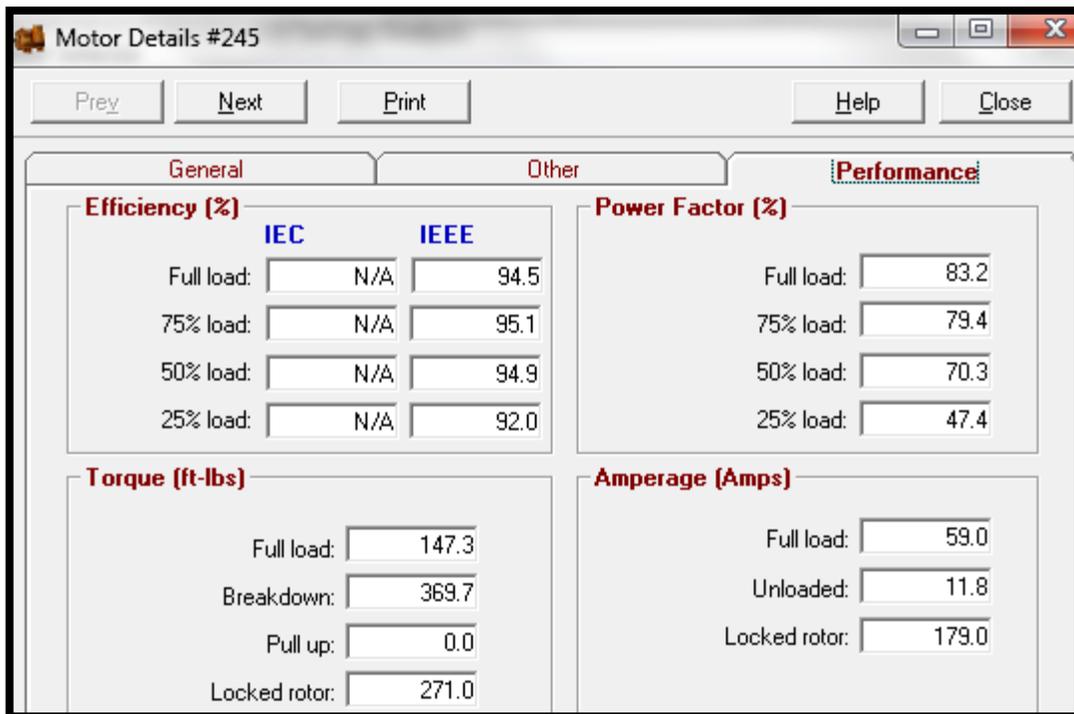


Motor Details #245

Prey Next Print Help Close

General Other Performance

Manufacturer: AO_Smith
Model: NEMA Premium
Catalog: E627
Motor type: NEMA Design B
Size (HP): 50.0
Speed (RPM): 1800



Motor Details #245

Prey Next Print Help Close

General Other **Performance**

Efficiency (%)

	IEC	IEEE
Full load:	N/A	94.5
75% load:	N/A	95.1
50% load:	N/A	94.9
25% load:	N/A	92.0

Power Factor (%)

Full load:	83.2
75% load:	79.4
50% load:	70.3
25% load:	47.4

Torque (ft-lbs)

Full load:	147.3
Breakdown:	369.7
Pull up:	0.0
Locked rotor:	271.0

Amperage (Amps)

Full load:	59.0
Unloaded:	11.8
Locked rotor:	179.0

Figura 19. Datos de placa de un motor de 50 HP

<i>fp deseado</i>	0,960	0,970	0,980	0,990	1,000
<i>I_{carga} (A)</i>	98.245	97.232	96.240	95.268	94.315
<i>P_{conductor} (W)</i>	237.441	232.571	227.849	223.269	218.826
<i>ΔV (V)</i>	0.870	0.856	0.840	0.820	0.770
<i>φ₁ (°)</i>	37.439	37.439	37.439	37.439	37.439
<i>φ₂ (°)</i>	16.260	14.070	11.478	8.110	0.000
<i>Q_c (VAR)</i>	18582.622	20191.760	22056.596	24431.167	30017.732
<i>Q_{comercial}(VAR)</i>	17500.000	20000.000	20000.000	22500.000	30000.000
<i>Capacitores</i>	1*7.5,2*5	2*5, 1*10	2*5, 1*10	3*7.5	3*10
<i>Precio \$</i>	1219.747	1228.558	1228.558	1438.279	1674.725

Tabla 19. Datos para un motor de 50HP, 240V

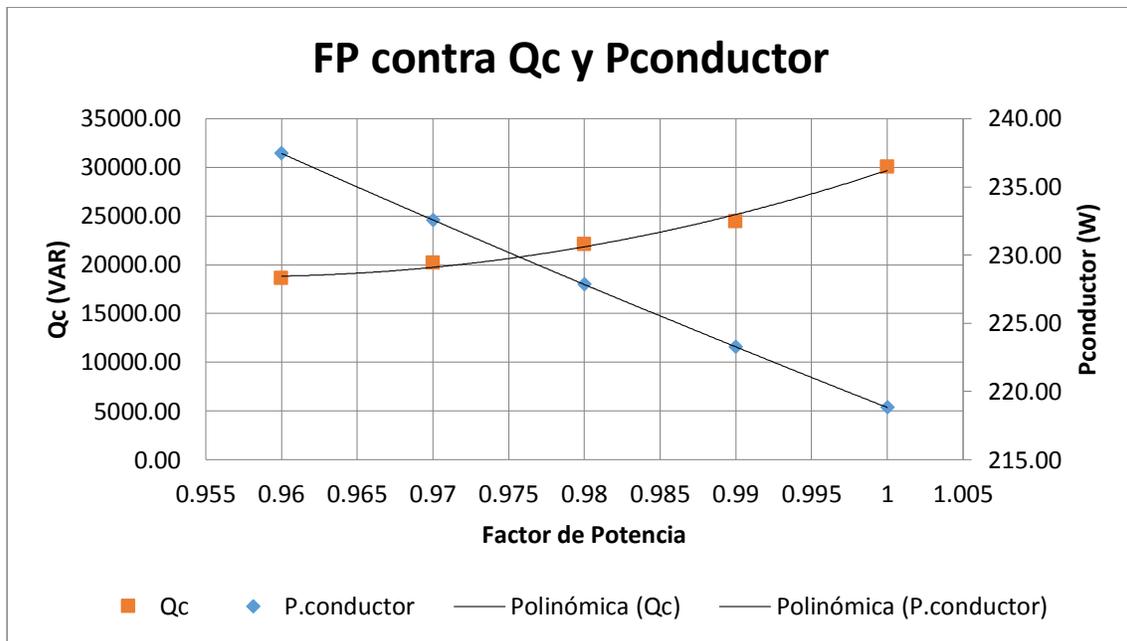
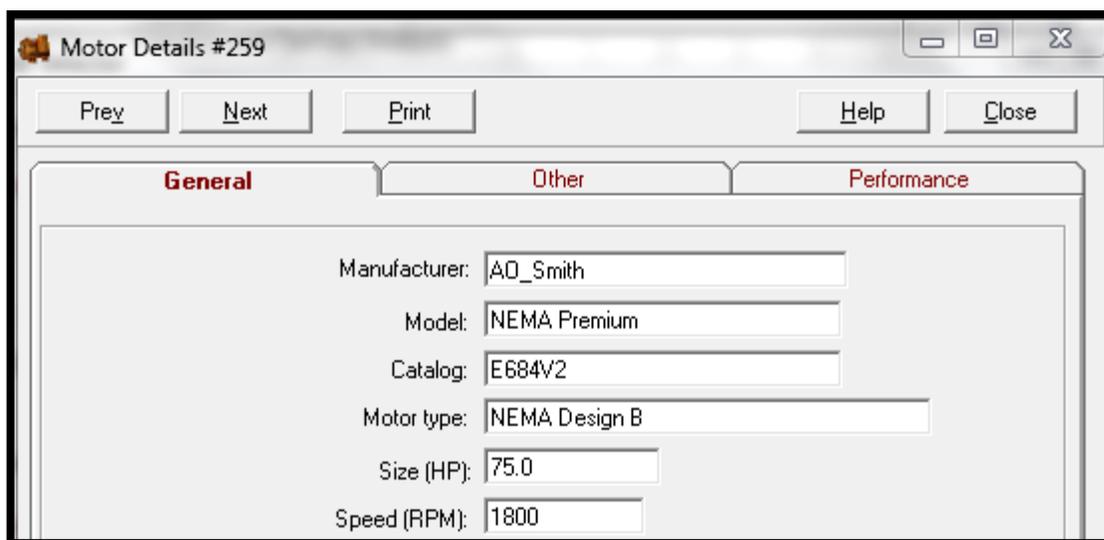


Gráfico 16. Punto de equilibrio para un motor de 50HP

Motor de 75 hp

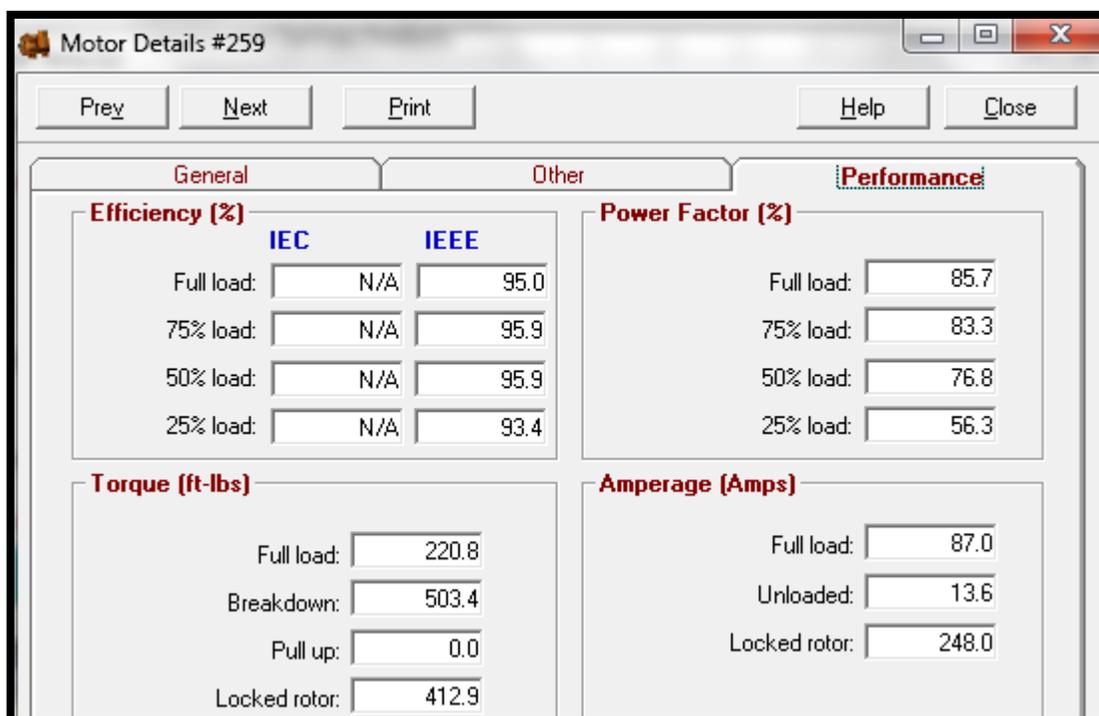


Motor Details #259

Prev Next Print Help Close

General Other Performance

Manufacturer: AD_Smith
 Model: NEMA Premium
 Catalog: E684V2
 Motor type: NEMA Design B
 Size (HP): 75.0
 Speed (RPM): 1800



Motor Details #259

Prev Next Print Help Close

General Other **Performance**

Efficiency (%)

	IEC	IEEE
Full load:	N/A	95.0
75% load:	N/A	95.9
50% load:	N/A	95.9
25% load:	N/A	93.4

Power Factor (%)

Full load:	85.7
75% load:	83.3
50% load:	76.8
25% load:	56.3

Torque (ft-lbs)

Full load:	220.8
Breakdown:	503.4
Pull up:	0.0
Locked rotor:	412.9

Amperage (Amps)

Full load:	87.0
Unloaded:	13.6
Locked rotor:	248.0

Figura 20. Datos de placa de un motor de 75 HP

<i>fp deseado</i>	0.960	0.970	0.980	0.990	1.000
<i>I_{carga} (A)</i>	146.138	144.632	143.156	141.710	140.293
<i>P_{conductor} (W)</i>	325.151	318.481	312.015	305.743	299.659
<i>ΔV (V)</i>	0.850	0.830	0.800	0.779	0.711
<i>φ₁ (°)</i>	33.592	33.592	33.592	33.592	33.592
<i>φ₂ (°)</i>	16.260	14.070	11.478	8.110	0.000
<i>Q_c (VAR)</i>	21725.211	24118.782	26892.702	30424.845	38734.789
<i>Q_{comercial}(VAR)</i>	20000.000	22500.000	25000.000	30000.000	37500.000
<i>Capacitores</i>	2*7.5, 1*5	7.5*3	2*10, 1*5	3*10	2*15,1*7.5
<i>Precio \$</i>	1227.469	1420.505	1430.427	1656.951	2119.418

Tabla 20. Datos de un motor de 75HP, 240V

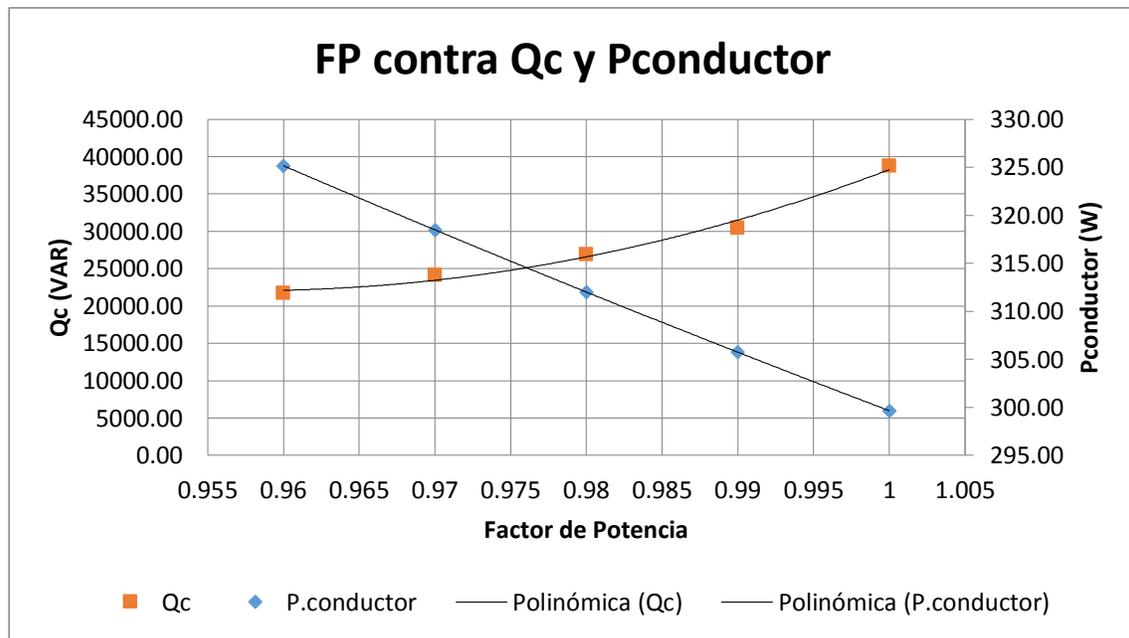


Gráfico 17. Punto de equilibrio para un motor de 75HP

Motor de 100hp

Motor Details #1414

Prey Next Print Help Close

General Other Performance

Manufacturer: Baldor-Reliance
Model: SUPER-E, NEMA Premium
Catalog: EM2555T-4
Motor type: NEMA Design B
Size (HP): 100.0
Speed (RPM): 1800

Motor Details #1414

Prey Next Print Help Close

General Other **Performance**

Efficiency (%)

	IEC	IEEE
Full load:	N/A	95.6
75% load:	N/A	95.8
50% load:	N/A	95.4
25% load:	N/A	93.1

Power Factor (%)

Full load:	85.0
75% load:	82.0
50% load:	73.0
25% load:	51.0

Torque (ft-lbs)

Full load:	295.0
Breakdown:	843.0
Pull up:	0.0
Locked rotor:	500.0

Amperage (Amps)

Full load:	115.2
Unloaded:	41.5
Locked rotor:	765.0

Figura 21. Datos de placa de un motor de 100 HP

<i>fp deseado</i>	0.960	0.970	0.980	0.990	1.000
<i>I_{carga} (A)</i>	195.054	193.043	191.074	189.144	187.252
<i>P_{conductor} (W)</i>	356.683	349.366	342.273	335.393	328.719
<i>ΔV (V)</i>	0.764	0.738	0.710	0.672	0.580
<i>φ₁ (°)</i>	34.915	34.915	34.915	34.915	34.915
<i>φ₂ (°)</i>	16.260	14.070	11.478	8.110	0.000
<i>Q_c (VAR)</i>	31629.010	34823.769	38526.189	43240.630	54332.120
<i>Q_{comercial}(VAR)</i>	30000.000	32500.000	37500.000	42500.000	52500.000
<i>Capacitores</i>	3*10	2*10, 1*12.5	10,12.5, 15	2*15,12.5	3*10,3*7.5
<i>Precio \$</i>	1674.725	1934.896	2136.403	3450.148	3848.893

Tabla 21. Datos motores de 100HP, 240V

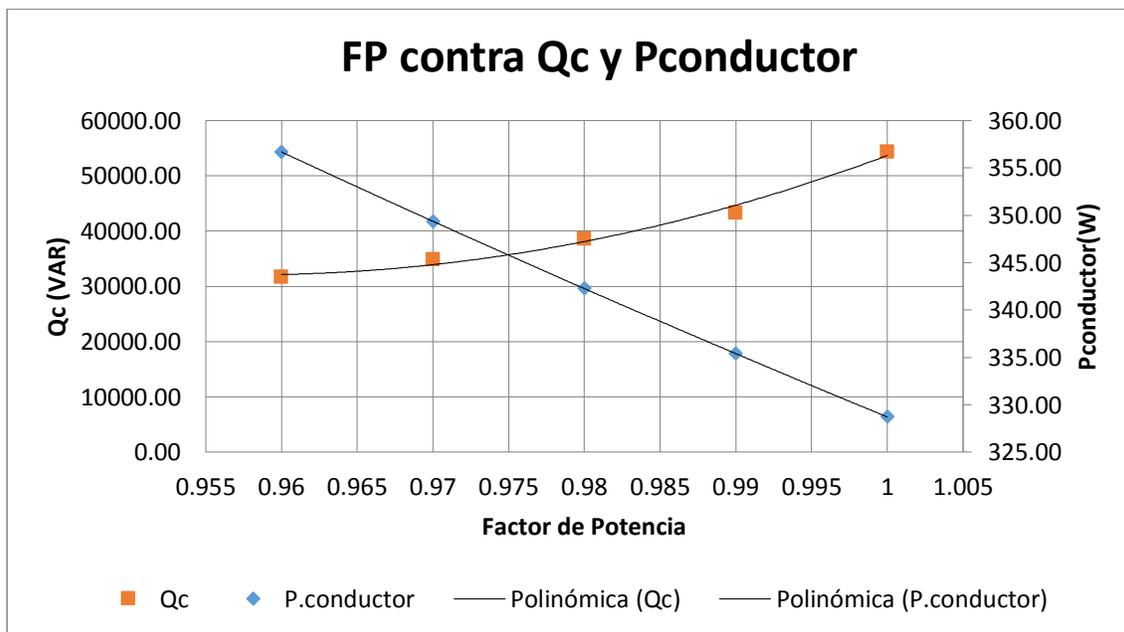
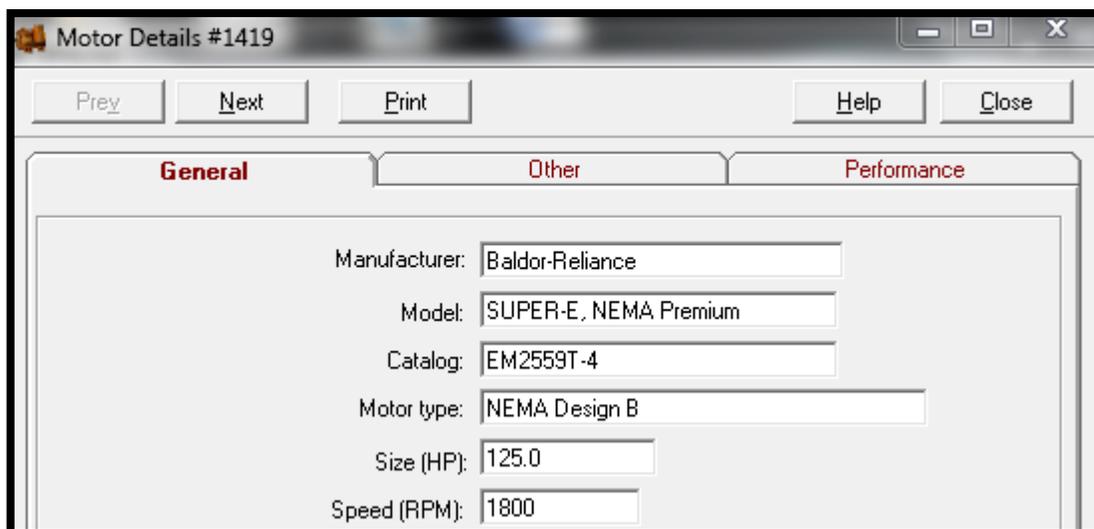


Gráfico 18. Punto de equilibrio para un motor de 100HP

Motor 125hp

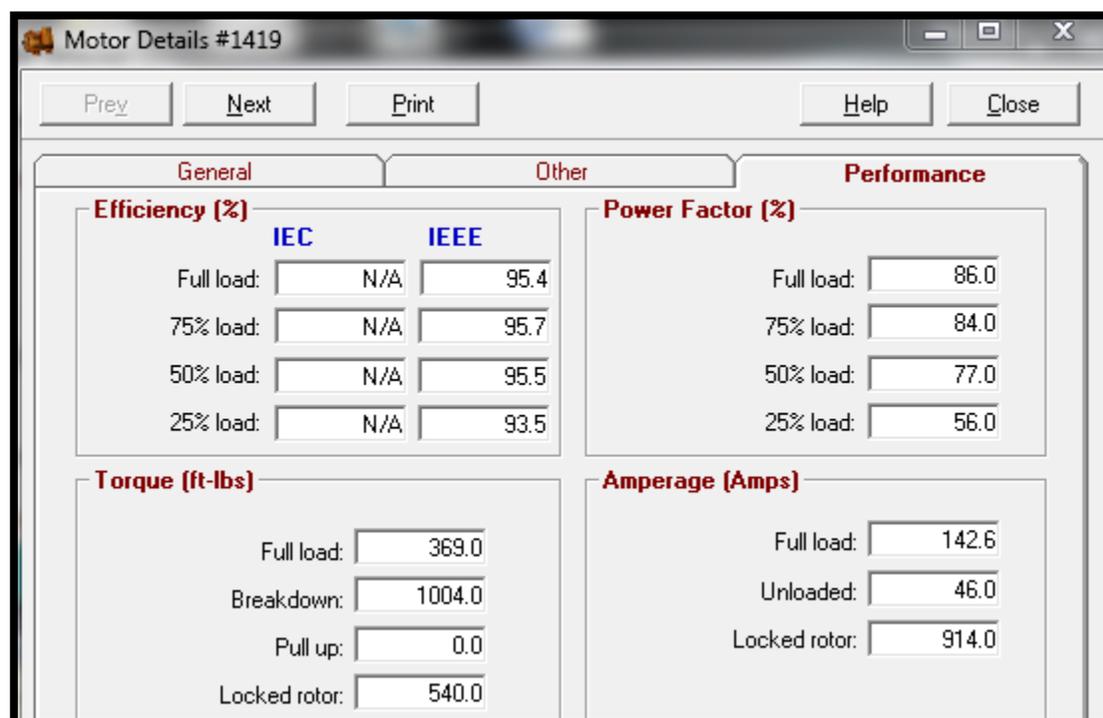


Motor Details #1419

Prey Next Print Help Close

General Other Performance

Manufacturer: Baldor-Reliance
Model: SUPER-E, NEMA Premium
Catalog: EM2559T-4
Motor type: NEMA Design B
Size (HP): 125.0
Speed (RPM): 1800



Motor Details #1419

Prey Next Print Help Close

General Other **Performance**

Efficiency (%)

	IEC	IEEE
Full load:	N/A	95.4
75% load:	N/A	95.7
50% load:	N/A	95.5
25% load:	N/A	93.5

Power Factor (%)

Full load:	86.0
75% load:	84.0
50% load:	77.0
25% load:	56.0

Torque (ft-lbs)

Full load:	369.0
Breakdown:	1004.0
Pull up:	0.0
Locked rotor:	540.0

Amperage (Amps)

Full load:	142.6
Unloaded:	46.0
Locked rotor:	914.0

Figura 22. Datos de placa de un motor de 125 HP

<i>fp deseado</i>	0.960	0.970	0.980	0.990	1.000
<i>I_{carga} (A)</i>	244.073	241.556	239.092	236.676	234.310
<i>P_{conductor} (W)</i>	397.639	389.483	381.575	373.905	366.464
<i>ΔV (V)</i>	0.740	0.709	0.673	0.628	0.521
<i>φ₁ (°)</i>	32.860	32.860	32.860	32.860	32.860
<i>φ₂ (°)</i>	16.260	14.070	11.478	8.110	0.000
<i>Q_c (VAR)</i>	34506.105	38503.726	43136.588	49035.796	62914.646
<i>Q_{comercial}(VAR)</i>	30000.000	37500.000	40000.000	45000.000	60000.000
<i>Capacitores</i>	3*10	10,12.5, 15	2*15, 1*10	3*15	3*20
<i>Precio \$</i>	1674.725	2136.455	2146.003	3459.696	3746.560

Tabla 22. Datos motores de 125HP, 240V

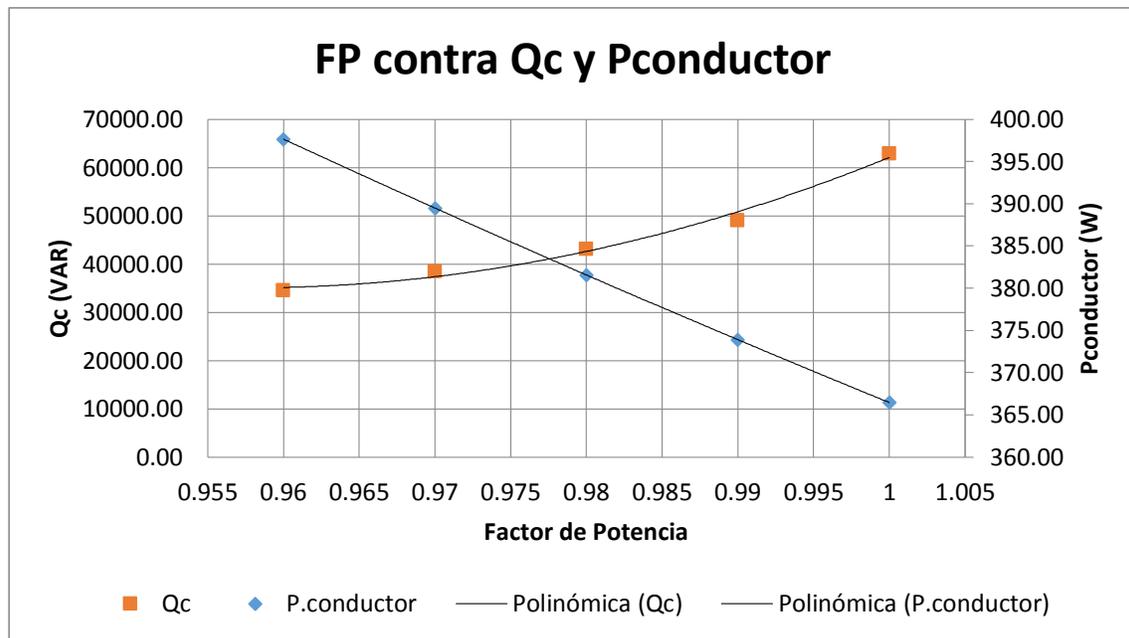


Gráfico 19. Punto de equilibrio para un motor de 125HP

Los diagramas para los motores analizados se muestran en las figuras 23 y 24, como se observa estos motores necesitan de un control de arranque para entrar en operación, ya que son mayores a 3HP, por lo cual los bancos de capacitores se ubican antes de estos dispositivos para evitar variaciones de tensión en las terminales de los capacitores o sobretensiones como lo indica al IEEE STD 141-1993.

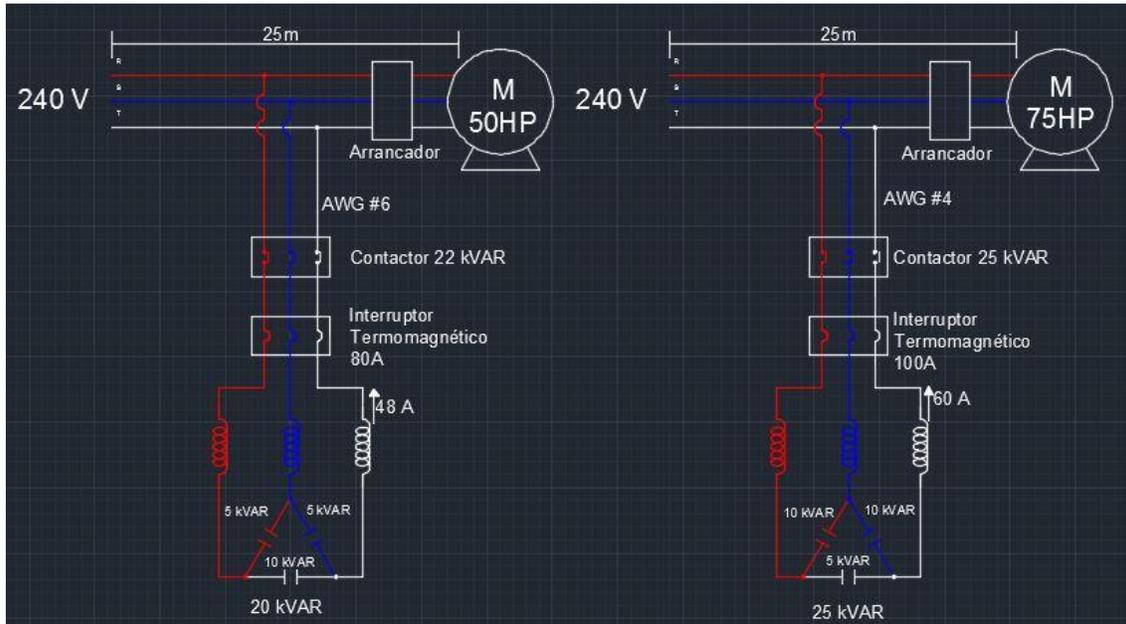


Figura 23. Diagrama de conexión para motores de 50HP y 75HP.

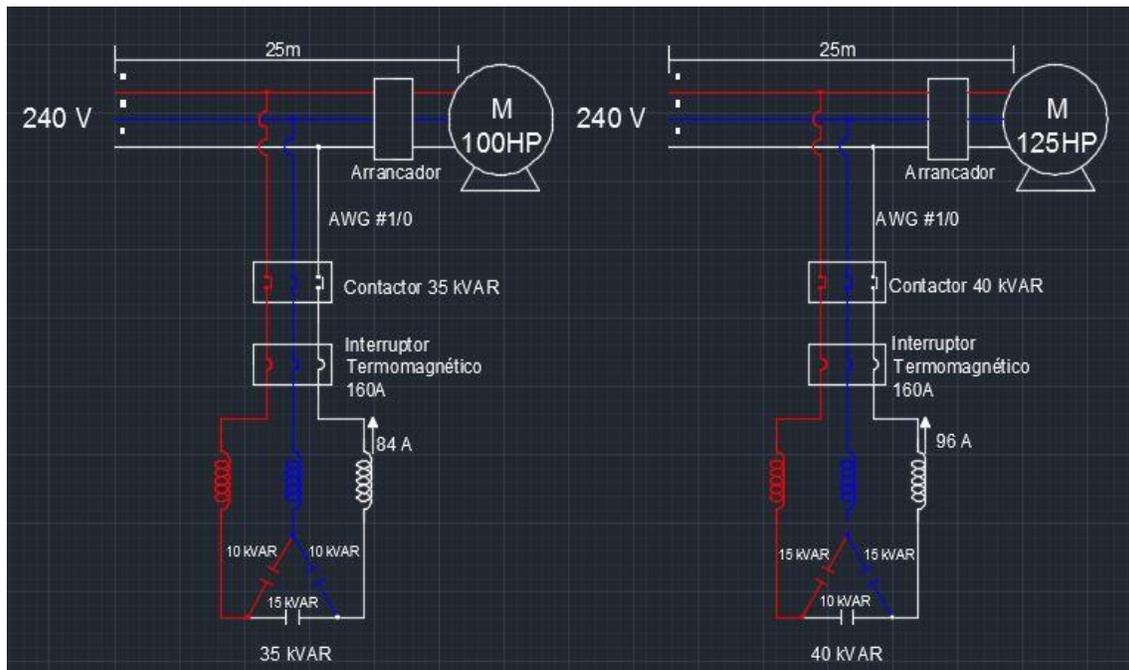


Figura 24. Diagrama de conexión, motores de 100HP y 125HP.

CONCLUSIONES

- Basándose en los resultados arrojados por el cruce de las curvas Q_C contra $P_{conductor}$ de los gráficos 15, 16, 17 y 18 se puede concluir que, independientemente de la potencia de salida del motor que se tenga, el punto óptimo económico entre la reducción de las pérdidas óhmicas y la capacidad del banco necesaria para lograr dicha reducción se encuentra en un factor de potencia de aproximadamente 0.975. Se observa claramente que al aumentar el factor de potencia por encima de este valor, las pérdidas disminuyen drásticamente, traduciéndose en más ahorro de energía. Sin embargo la capacidad del banco aumenta de igual manera, aumentando la inversión necesaria para obtener los elementos que conforman el banco: contactor, interruptor y capacitores.
- La potencia que puede entregar el motor se debe reducir si la instalación eléctrica posee un desbalance de tensión mayor al 2% según IEEE STD 739. Si se quiere demandar la máxima capacidad al motor sin considerar el ajuste necesario debido al desbalance se expone a un sobrecalentamiento interno que va a dañar la máquina y puede sacarla totalmente de funcionamiento.
- La sobrecompensación puede llevar al sistema a una condición de sobreexcitación, la energía residual almacenada en el banco puede dañar el aislamiento tanto del motor como del propio banco de capacitores sacándolos de funcionamiento.
- Para lograr la máxima reducción de pérdidas en los conductores de la instalación, el banco debe conectarse lo más cerca del motor que sea posible, siempre tomando en cuenta las limitaciones proporcionadas por la norma IEEE 141-1993. Al conectar el banco de esta manera, se libera capacidad reactiva del transformador o banco de transformadores que alimentan al sistema y debido a que la corriente reactiva se toma de los capacitores, se evita que ésta circule por los conductores, disminuyendo las pérdidas óhmicas (efecto Joule).

RECOMENDACIONES

- Se recomienda llevar el factor de potencia al valor de equilibrio de 0.975, y dependerá de la cantidad de dinero que se tenga pensado invertir el llevar el factor de potencia a un valor en el que el ahorro de energía sea más grande.
- Si no se puede reducir el desbalance de tensión en el sistema, se debe reducir la carga que se conecta al motor para no forzarlo y evitar así daños permanentes a la máquina.
- Cuando se calcula el banco de capacitores para compensar la potencia reactiva del motor, no se deben exceder los valores recomendados por IEEE, en su norma 141-1993 (ver anexos).
- No someter al banco de capacitores a variaciones de tensión para evitar el efecto transitorio. Si el motor se conecta con un control de arranque, que varía su tensión, se debe evitar conectar el capacitor después de dicho control. Si el motor maneja una carga con gran inercia, el banco de capacitores no debe conmutar al mismo tiempo para evitar sobreexcitación.
- Para un funcionamiento óptimo del banco de capacitores se debe seguir las recomendaciones del estándar 18-2002 del IEEE, que estable los límites de operación de los bancos de capacitores. De la misma manera se debe respetar el límite de distorsión armónica total que establecen las normativas mostradas en el anexo D.

BIBLIOGRAFÍA

- NEMA MG 1-2009, Motors and Generators.
- NEMA CP 1, Shunt Capacitors.
- IEEE Std 18-2002, IEEE Standard for Shunt Power Capacitors.
- IEEE Std 739-1995, IEEE Recommended Practice for Energy Management in Industrial and Commercial Facilities.
- IEEE Std 1036-1992, IEEE Guide for Application of Shunt Power Capacitors.
- IEEE Std C37.99-2000, IEEE Guide for the Protection of Shunt Capacitor Banks.
- IEEE Std 141-1993, IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants.
- NEC 2011, National Electric Code.
- Santiago Barcón, Rafael Guerrero, Iván Martínez, 2011, Calidad de la Energía, México, Mc Graw Hill.
- Ramasamy Natarajan, 2005, Power System Capacitors, Estados Unidos, Taylor & Francis Group.
- General Electric, AC Motor Selection and Application Guide.
- Gilbert McCoy, John Douglass, 2000, Energy Management for Motor Driven Systems, Washington State University.
- ABB Cuaderno de aplicaciones Técnicas #6: Motor Asíncrono Trifásico.
- ABB Cuaderno de Aplicaciones Técnicas #8: Corrección del Factor de Potencia.

ANEXOS

Induction motor horse-power rating	Number of poles and nominal motor speed in rpm											
	2 3600 rpm		4 1800 rpm		6 1200 rpm		8 900 rpm		10 720 rpm		12 600 rpm	
	Capacitor kvar	Current reduction %	Capacitor kvar	Current reduction %	Capacitor kvar	Current reduction %	Capacitor kvar	Current reduction %	Capacitor kvar	Current reduction %	Capacitor kvar	Current reduction %
3	1.5	14	1.5	15	1.5	20	2	27	2.5	35	3	41
5	2	12	2	13	2	17	3	25	4	32	4	37
7.5	2.5	11	2.5	12	3	15	4	22	5	30	6	34
10	3	10	3	11	3	14	5	21	6	27	7.5	31
15	4	9	4	10	5	13	6	18	8	23	9	27
20	5	9	5	10	6	12	7.5	16	9	21	12.5	25
25	6	9	6	10	7.5	11	9	15	10	20	15	23
30	7	8	7	9	9	11	10	14	12.5	18	17.5	22
40	9	8	9	9	10	10	12.5	13	15	16	20	20
50	12.5	8	10	9	12.5	10	15	12	20	15	25	19
60	15	8	15	8	15	10	17.5	11	22.5	15	27.5	19
75	17.5	8	17.5	8	17.5	10	20	10	25	14	35	18
100	22.5	8	20	8	25	9	27.5	10	35	13	40	17
125	27.5	8	25	8	30	9	30	10	40	13	50	16
150	30	8	30	8	35	9	37.5	10	50	12	50	15
200	40	8	37.5	8	40	9	50	10	60	12	60	14
250	50	8	45	7	50	8	60	9	70	11	75	13
300	60	8	50	7	60	8	60	9	80	11	90	12
350	60	8	60	7	75	8	75	9	90	10	95	11
400	75	8	60	6	75	8	85	9	95	10	100	11
450	75	8	75	6	80	8	90	9	100	9	110	11
500	75	8	75	6	85	8	100	9	100	9	120	10

Anexo A. Máxima capacidad de KVAR para motores de alta eficiencia y antiguos pre T-frame²⁴

²⁴ IEEE Std 141-1993

Induction motor horse-power rating	Number of poles and nominal motor speed in rpm											
	2 3600 rpm		4 1800 rpm		6 1200 rpm		8 900 rpm		10 720 rpm		12 600 rpm	
	Capacitor kvar	Current reduction %	Capacitor kvar	Current reduction %	Capacitor kvar	Current reduction %	Capacitor kvar	Current reduction %	Capacitor kvar	Current reduction %	Capacitor kvar	Current reduction %
2	1	14	1	24	1.5	30	2	42	2	40	3	50
3	1.5	14	1.5	23	2	28	3	38	3	40	4	49
5	2	14	2.5	22	3	26	4	31	4	40	5	49
7.5	2.5	14	3	20	4	21	5	28	5	38	6	45
10	4	14	4	18	5	21	6	27	7.5	36	8	38
15	5	12	5	18	6	20	7.5	24	8	32	10	34
20	6	12	6	17	7.5	19	9	23	10	29	12.5	30
25	7.5	12	7.5	17	8	19	10	23	12.5	25	17.5	30
30	8	11	8	16	10	19	15	22	15	24	20	30
40	12.5	12	15	16	15	19	17.5	21	20	24	25	30
50	15	12	17.5	15	20	19	22.5	21	22.5	24	30	30
60	17.5	12	20	15	22.5	17	25	20	30	22	35	28
75	20	12	25	14	25	15	30	17	35	21	40	19
100	22.5	11	30	14	30	12	35	16	40	15	45	17
125	25	10	35	12	35	12	40	14	45	15	50	17
150	30	10	40	12	40	12	50	14	50	13	60	17
200	35	10	50	11	50	11	70	14	70	13	90	17
250	40	11	60	10	60	10	80	13	90	13	100	17
300	45	11	70	10	75	12	100	14	100	13	120	17
350	50	12	75	8	90	12	120	13	120	13	135	15
400	75	10	80	8	100	12	130	13	140	13	150	15
450	80	8	90	8	120	10	140	12	160	14	160	15
500	100	8	120	9	150	12	160	12	180	13	180	15

Anexo B. Máxima capacidad de KVAR para motores NEMA T-frame diseño B²⁵

²⁵ IEEE Std 141-1993

Induction motor rating (hp)	Design C motor		Design D motor 1200 r/min	Wound-rotor motor
	1800 and 1200 r/min	900 r/min		
15	5	5	5	5.5
20	5	6	6	7
25	6	6	6	7
30	7.5	9	10	11
40	10	12	12	13
50	12	15	15	17.5
60	17.5	18	18	20
75	19	22.5	22.5	25
100	27	27	30	33
125	35	37.5	37.5	40
150	37.5	45	45	50
200	45	60	60	65
250	54	70	70	75
300	65	90	75	85

Anexo C. Máxima capacidad de KVAR para motores NEMA diseño C y D²⁶

Norma	Límites de Distorsión Armónica de Tensión en % del voltaje nominal	
	Nivel de tensión en la Acometida	Distorsión armónica total
IEEE 519-1992	$V_n \leq 69\text{kV}$	5.0
SIGET ANEXO 1 DEL ACUERDO No. 320-E-2011	$V_n \leq 600\text{ V}$	8.0

Anexo D. Máxima capacidad de KVAR para motores NEMA diseño C y D²⁷

²⁶ IEEE Std 141-1993

²⁷ IEEE Std 519-1992, SIGET