

UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA



**PROPUESTA DE COMPENSACIÓN REACTIVA DE UN MOTOR
ASÍNCRONO DE INDUCCIÓN EN FUNCIÓN DE SU CIRCUITO
EQUIVALENTE**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICO

AUTOR

LUIS MIGUEL RIVERA CARDOSO

ASESOR

Ing. ALEXANDER QUEREVALÚ MORANTE

Chiclayo, 2019

DEDICATORIA

**A la memoria de mis siempre amados padres, Segundo y Aurora,
inspiración de vida.**

AGRADECIMIENTOS

**A Dios, mi señor, por su inmensa bondad en los regalos de amor y vida que me ha
dado.**

A mí querida esposa y a mi linda hija por su amor y paciencia

A mi entrañable familia por su constante cariño

Al cuerpo docente de la USAT.

A los amigos de jornada.

RESUMEN

En el presente trabajo de tesis se ha investigado acerca de la utilidad del circuito equivalente de un motor eléctrico asíncrono de inducción en el dimensionamiento del capacitor adecuado para la compensación individual de su factor de potencia. A partir de la configuración del circuito equivalente de un motor dado, utilizando Matlab, se ha procedido a graficar todas las curvas características del motor, en especial las curvas del factor de potencia y de la potencia reactiva consumida en el rango de carga normal de la máquina. Después de un análisis gráfico, dadas las características del comportamiento de la potencia reactiva inductiva que consume el motor, se ha determinado que la potencia reactiva del capacitor trifásico necesario para la compensación individual puede ser de un valor fijo y que el valor de esa potencia reactiva se puede calcular a partir de la potencia aparente que consume el motor durante su marcha en vacío. De igual manera, una vez determinado el tamaño del capacitor, se ha investigado sobre la incidencia que tiene su ubicación dentro de su circuito derivado de alimentación en la necesidad de corregir el dimensionamiento de la protección y del cableado; encontrándose que para instalaciones existentes lo más recomendable es su colocación aguas arriba del dispositivo de protección del motor.

Palabras claves: Circuito equivalente, motor asíncrono, compensación del factor de potencia, potencia reactiva, curvas características, capacitor trifásico.

ABSTRACT

This investigation deals with the usefulness of the equivalent circuit of a synchronous induction electrical motor on the sizing of the capacitor suitable for individual compensation of its reactive power. Beginning with the characteristics of the equivalent circuit of a given motor, and then identifying the main formulae, all of the characteristic curves of the motor have been plotted using Matlab, especially the power factor vs. load factor and the reactive power vs. load factor. After a careful analysis of these graphics, realizing of the reactive power behavior that the motor consumes along the load range, the sizing of the suitable capacitor has been made.

It has been found that reactive power of the capacitor can be of a fixed value, that there is no necessity of a variable capacitor. In the same way, it has been found that the sizing of the capacitor could be done knowing the apparent power that the unit consumes when turning with no load.

Once the size of the capacitor has been determined, the author has investigated about the effect of the capacitor position inside the circuit on the necessity for resizing the protection devices and wiring. It has been determined that, for existing facilities, is advisable to place the capacitor upstream of the magnetic protective device.

Keywords: Equivalent circuit, synchronous induction motor, power factor compensation, characteristic curves, three-phase capacitor.

ÍNDICE

	Pag.
DEDICATORIA.....	2
AGRADECIMIENTO.....	3
RESUMEN.....	4
ABSTRACT.....	5
ÍNDICE.....	6
LISTA DE TABLAS.....	9
LISTA DE FIGURAS.....	10
I. INTRODUCCIÓN.....	12
1.1 Realidad Problemática.....	12
1.2 Enunciado del Problema.....	15
1.3 Hipótesis.....	15
1.4 Justificación.....	15
1.5 Objetivos.....	15
1.6 Esquema de Investigación.....	16
II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	17
2.1 El Motor Asíncrono Polifásico de Inducción.....	17
2.1.1 Principios Básicos del Motor Asíncrono de Inducción.....	17
2.1.2 Circuito Equivalente por Fase.....	20
2.1.3 Formulas Derivadas del Circuito Equivalente.....	21
2.1.4 Flujo de Energía y Potencia.....	26
2.1.5 Curvas Características del Motor de Inducción.....	27
2.1.6 Carga Mecánica Acoplada y Factor de Carga.....	30
2.2 EL FACTOR DE POTENCIA Y SU COMPENSACIÓN.....	34
2.2.1 Naturaleza de la Energía Reactiva.....	34
2.2.2 El Factor de Potencia de una Carga Eléctrica.....	35
2.2.3 Causas de un Bajo Factor de Potencia en una Instalación Eléctrica.....	36
2.2.4 Consecuencias de un Bajo Factor de Potencia.....	37
2.2.5 El Capacitor.....	39

2.2.6 Capacitor para la Compensación de Potencia Reactiva.....	41
2.2.7 Compensación del Factor de Potencia de una Carga Eléctrica.....	42
2.2.8 Tipos de Compensación de Instalaciones Eléctricas.....	44
2.2.9 Efectos de la Contaminación Armónica sobre los Capacitores.....	48
2.2.10 La Compensación de los Motores Eléctricos.....	52
2.2.11 Problemas Asociados con la Compensación de Motores Eléctricos.....	55
2.2.12 Cálculo de la Potencia Reactiva de Capacitores para Motores Eléctricos.....	59
2.2.13 Protección y Cableado de los Circuitos Derivados para Capacitores.....	60
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	62
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	64
4.1 Características del Motor Seleccionado.....	64
4.2 Curvas Características antes de la Compensación.....	65
4.3 Dimensionamiento de la Potencia Reactiva del Capacitor.....	70
4.4 Curvas de Factor de Potencia y Potencia Reactiva después de la Compensación.....	72
4.5 Selección y Ubicación de Capacitor.....	74
4.6 Contrastación contra la Potencia Reactiva recomendada por Fabricantes.....	76
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	78
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80
ANEXOS.....	81

LISTA DE TABLAS

	Pag.	
Tabla 2.1	Cargas eléctricas y su factor de potencia típico.	36
Tabla 2.2	Utilización de filtro en función de contaminación armónica	52
Tabla 4.1	Datos nominales del motor eléctrico seleccionado	64
Tabla 4.2	Impedancias de circuito equivalente de motor eléctrico seleccionado	64
Tabla 4.3	Selección de componentes para instalación de capacitor de 25 KVAR – 440 VAC – 50 Hz.	75
Tabla 4.4	Resumen del cálculo de la potencia reactiva del capacitor.	77

LISTA DE FIGURAS

		Pag.
Figura 2.1	Componentes de un motor de inducción tipo jaula de ardilla.	17
Figura 2.2	Frecuencia del voltaje inducido en el rotor en función del deslizamiento S	20
Figura 2.3	Circuito equivalente por fase del motor de inducción.	21
Figura 2.4	Circuito equivalente aproximado por fase del motor de inducción	23
Figura 2.5a	Circuito equivalente de Thevenin por fase	24
Figura 2.5b	Voltaje equivalente de Thevenin	24
Figura 2.5c	Circuito para hallar la impedancia equivalente de Thevenin	24
Figura 2.6	Flujo de potencia en un motor de inducción	26
Figura 2.7	Par inducido en función de la velocidad.	27
Figura 2.8	Potencia mecánica bruta en función de la velocidad	28
Figura 2.9	Eficiencia en función de la velocidad.	28
Figura 2.10	Factor de Potencia en función de la velocidad.	29
Figura 2.11	Corriente de línea en función de la velocidad.	29
Figura 2.12	Zonas de carga en el diagrama Par vs. Velocidad	31
Figura 2.13	Zonas de carga en el diagrama Potencia Mecánica Útil vs. Velocidad	31
Figura 2.14	Eficiencia, deslizamiento, factor de potencia y corriente en función del factor de carga (%) para motor de 50 HP – 220 VAC – 60 Hz – 4 polos	33
Figura 2.15	Factor de potencia y potencias eléctricas (activa, reactiva y aparente) en función del factor de carga	33
Figura 2.16	Diagrama fasorial de un circuito eléctrico R - L	34
Figura 2.17	Triangulo de Potencias P, Q, S.	35
Figura 2.18	Para una misma P, variaciones de Q y S con el factor de potencia	36
Figura 2.19	Estructura interna del capacitor	39
Figura 2.20	Características constructivas de un capacitor puro	39

Figura 2.21	Diagrama fasorial de un capacitor puro.	41
Figura 2.22	Capacitor para compensación de potencia reactiva	42
Figura 2.23	Potencia reactiva capacitiva y potencia reactiva inductiva	42
Figura 2.24	Diagrama fasorial de la compensación del Factor de Potencia.	43
Figura 2.25	Potencias P y Q antes y después de la compensación	43
Figura 2.26	Esquema de compensación fija	44
Figura 2.27	Esquema de compensación variable	45
Figura 2.28	Tipos de compensación por ubicación del capacitor.	47
Figura 2.29	Circuito equivalente por fase del motor asíncrono con capacitor en paralelo.	47
Figura 2.30	Onda corriente distorsionada y su respectivo espectro armónico	48
Figura 2.31	Circuitos simplificados (a) resonancia paralelo y (b) resonancia serie	50
Figura 2.32	Principio de funcionamiento del filtro pasivo	51
Figura 2.33	Principio de funcionamiento del filtro activo	51
Figura 2.34	Principio de funcionamiento del filtro híbrido	52
Figura 2.35	Circuito Equivalente por fase del motor asíncrono con motor en paralelo	53
Figura 2.36	Ubicaciones del capacitor para motores pequeños y medianos	54
Figura 2.37	Compensación fija de un motor	55
Figura 2.38	Comportamiento típico de la corriente de inserción en capacitores	56
Figura 2.39	Reactancia de choque para limitar corrientes de inserción	56
Figura 2.40	Compensación fija con contactores	58
Figura 3.1	Flujograma de la contratación de la hipótesis.	63
Figura 4.1	Circuito Equivalente por fase – Motor 100 hp.	65
Figura 4.2	Curva Par Mecánico Bruto vs. Velocidad - Motor 100 hp.	66
Figura 4.3	Curva Potencia Mecánica Neta (o útil) vs. Velocidad – Motor 100 hp	66

Figura 4.4	Potencias eléctricas: activa P, reactiva Q y aparente S vs. Velocidad – Motor 100 hp	67
Figura 4.5	Corrientes: total, resistiva, inductiva vs. Velocidad ($s \leq 10\%$) – Motor 100hp	67
Figura 4.6	Factor de potencia vs. Velocidad – Motor 100 hp	68
Figura 4.7	Eficiencia vs. Velocidad – Motor 100 hp	68
Figura 4.8	Factor de Potencia y Eficiencia vs. Factor de Carga – Motor 100 hp	69
Figura 4.9	Potencias eléctricas: activa P, reactiva Q y aparente S vs. Factor de Carga – Motor 100 hp	69
Figura 4.10	Esquema de instalación de motor y capacitor	71
Figura 4.11	Circuito equivalente por fase del motor compensado	71
Figura 4.12	Potencias eléctricas: activa P, reactiva Q y aparente S vs. Factor de Carga después de compensación– Motor 100 hp	73
Figura 4.13	Factor de Potencia y Eficiencia vs. Factor de Carga después de la compensación – Motor 100 hp	73
Figura 4.14	Instalación de componentes para compensación del factor de potencia	75

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 REALIDAD PROBLEMÁTICA

El motor asíncrono polifásico de inducción es la máquina eléctrica más utilizada a nivel mundial debido a su simplicidad, confiabilidad, bajo costo y escaso mantenimiento. En los últimos años, con el avance de la electrónica de potencia, su empleo se ha extendido a campos en los que anteriormente se encontraba limitado, tales como son las aplicaciones donde se requiere control de velocidad y arranque controlado. Se le puede encontrar en todos los sectores productivos tanto en la industria pesada: hidrocarburos y petroquímica, como en la industria liviana: las empresas de la agroindustria y de alimentos y bebidas. Su gama de aplicaciones es muy vasta: se le puede encontrar en el accionamiento del más diverso tipo de máquinas como compresoras, bombas, máquinas herramientas, maquinaria minera, fajas transportadoras, molinos, etc.

A nivel global se conoce que los motores eléctricos de inducción consumen aproximadamente el 60 % de la producción mundial de energía eléctrica, por esta razón los organismos supranacionales, orientados a impulsar un consumo eficiente de la energía, recomiendan a sus países miembros la adopción de medidas tendientes a lograr la explotación eficiente de este tipo de máquinas. Dentro de estas medidas se considera que una selección correcta del tipo de motor, un dimensionamiento apropiado y una instalación funcional son de mucha importancia para lograr este propósito. Adicionalmente recomiendan también otras medidas complementarias orientadas a optimizar el consumo de energía como son: el empleo de motores de alta eficiencia, el uso de variadores de velocidad, un mejor diseño de los sistemas de control y mando, la adopción de políticas apropiadas de mantenimiento y reparación y, finalmente, un nivel aceptable de la calidad de la alimentación eléctrica.

A nivel empresarial también es importante determinar cuáles son las implicancias de un correcto dimensionamiento y una apropiada instalación de los motores eléctricos en la economía de las organizaciones. Dos son los conceptos asociados al costo económico de operar un motor dentro de una instalación industrial: el costo de la energía eléctrica activa, cuyo monto se calcula multiplicando la energía eléctrica consumida (KWH), sea en hora punta y en hora fuera de punta, por sus respectivas tarifas expresadas en \$./KWH; y el costo de la energía eléctrica reactiva, la cual solo es facturable si su monto excede el 30% de la energía activa consumida en el mismo periodo de facturación. La tarifa de la energía reactiva se expresa en \$./KVARH

Estos dos conceptos económicos están vinculados directamente a dos parámetros operativos del motor: la energía eléctrica activa se vincula a la eficiencia de la máquina, la cual nos indica la cantidad de energía mecánica entregada en el eje de la máquina por cada

unidad de energía eléctrica activa que consume y la energía eléctrica reactiva, que se encuentra asociada al factor de potencia al que se encuentra operando la máquina, el cual, al relacionar la energía eléctrica activa con la energía eléctrica aparente, es también un indicativo indirecto de la energía reactiva por unidad de energía activa consumida de la red. Entonces, si se establece una secuencia lógica de consumo de energía de un motor eléctrico esta sería la siguiente: para una cantidad dada de energía mecánica que entrega la máquina en su eje, la cantidad de energía activa asociada se encuentra determinada por el valor puntual de la eficiencia del motor y la cantidad de energía reactiva consumida se encuentra asociada al valor puntual del factor de potencia. En general, para una operación económica en una determinada aplicación, los motores eléctricos de inducción deben operar en condiciones que signifiquen un alto valor de eficiencia y un alto valor del factor de potencia. Tales condiciones se logran si el motor, habiendo sido adecuadamente seleccionado, también es correctamente dimensionado.

Es crucial entonces, con el propósito de lograr la mayor eficiencia operativa de la máquina, dimensionar al motor de manera apropiada: este debe operar lo más cerca posible a su valor nominal de potencia para asegurar valores altos tanto de eficiencia como de factor de potencia. Definiendo el factor de carga de un motor como el cociente entre la potencia mecánica actual de operación y la potencia mecánica nominal (o de placa), un motor correctamente dimensionado debe tener un factor de carga cercano al valor de uno cuando se encuentre en operación. Motores sobredimensionados, es decir aquellos que operan con un bajo factor de carga, tienen eficiencias y factores de potencia bajos por lo tanto el costo de explotación en soles por unidad de energía mecánica útil será alto.

En general, para que la energía eléctrica reactiva asociada a la operación de una instalación industrial no sea facturable, el factor de potencia promedio durante el período de facturación debe ser al menos 0.96 inductivo (de esta manera se asegura que la energía reactiva no sea mayor al 30% de la energía activa consumida). En particular, cuando se opera con un bajo factor de potencia, adicionalmente a la facturación del excedente de energía reactiva, hay otros problemas técnicos como son: mayores pérdidas de energía por efecto joule, mayor caída de tensión y una disminución de la capacidad de los conductores de la instalación debido a la componente reactiva de la corriente total que alimenta al motor.

Sin embargo, en la vida práctica es frecuente encontrar casos en los cuales, habiendo sido dimensionado correctamente el motor para la carga mecánica nominal de una máquina conducida, las fluctuaciones de carga que esta máquina experimenta cuando se encuentra en operación significa que el motor operará durante ciertos periodos en condiciones de bajo factor de carga significando que se tendrá una baja eficiencia y un bajo factor de potencia. Si esta condición es frecuente, para evitar los problemas económicos y técnicos anteriormente mencionados, es conveniente considerar la opción de la corrección del factor de potencia de la máquina.

En general, la corrección o compensación del factor de potencia en una instalación industrial se logra mediante capacitores instalados en paralelo con la carga eléctrica. Esta corrección puede ser individual, parcial o global según se compense una sola máquina, un grupo de máquinas o toda la instalación respectivamente.

En lo que concierne a un motor eléctrico, cuanto mayor es la potencia nominal del motor, mayor es la necesidad de corregir individualmente el factor de potencia. El fabricante de equipamiento eléctrico WEG [1] considera que a partir de los 10 HP de potencia nominal se debe contemplar esta posibilidad. Puesto que la mayoría de los motores de inducción presenta un factor de potencia nominal en el rango de 0.8 a 0.9 inductivo es necesario, para evitar los problemas ocasionados por exceso de energía reactiva, corregir el factor de potencia. El también fabricante Schneider Electric [2] recomienda corregir individualmente el factor de potencia del motor de inducción a un valor suficientemente alto y posteriormente complementar la corrección mediante una compensación global automática en barras de la instalación con el propósito de obtener el mencionado 0.96

En lo referente al dimensionamiento de un capacitor necesario para compensar individualmente el factor de potencia de un motor eléctrico dado, en la ingeniería práctica se siguen recomendaciones dadas por los fabricantes, los cuales suelen publicar fórmulas empíricas o tablas en las que, a partir de la potencia nominal del motor o de la potencia reactiva consumida en marcha en vacío, se estiman la potencia reactiva capacitiva del banco.

Por otro lado, en el estudio teórico de las máquinas eléctricas, el comportamiento de las mismas se modela mediante los llamados circuitos equivalentes, así el circuito equivalente de un motor de inducción es un modelo físico que, incorporando elementos pasivos lineales, permite predecir su comportamiento eléctrico y construir sus curvas de operación características. Del circuito equivalente por fase dicen Fitzgerald et al [3] “puede utilizarse para determinar una amplia variedad de características del desempeño de máquinas de inducción polifásicas en condiciones de estado estable. Estas incluyen variaciones de corriente, velocidad y pérdidas a medida que cambian tanto los requerimientos de carga (par de torsión), como también el par de arranque y el par máximo”.

Dentro de las curvas características que se pueden trazar a partir del circuito equivalente por fase destacan: el par mecánico, la potencia mecánica, la corriente estatórica, las diferentes potencias eléctricas (activa, reactiva y aparente), la eficiencia y el factor de potencia. Todas estas curvas son obtenidas en función de la variable *deslizamiento*, que es una expresión de la velocidad relativa del motor respecto de la velocidad de su campo magnético giratorio. Sin embargo, también es posible obtener el comportamiento de estas curvas en función de la variable *factor de carga* lo cual puede llegar a ser más didáctico desde el punto de vista del dimensionamiento de la máquina.

En el presente estudio se pretende averiguar la utilidad de la información proporcionada por el circuito equivalente del motor eléctrico de inducción para el dimensionamiento de la potencia reactiva de un banco de capacitores destinado a corregir su factor de potencia haciendo énfasis en el análisis del motor cuando opera en condiciones de carga variable.

DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

El presente estudio se aplica a la compensación individual del motor eléctrico de inducción trifásico con rotor tipo jaula de ardilla, de baja tensión, por arranque a tensión reducida, que no incorpore sistemas de control de velocidad por variación de frecuencia y cuyo sistema de alimentación se encuentre libre de contaminación armónica.

1.2 ENUNCIADO DEL PROBLEMA

¿Proporciona el circuito equivalente de un motor eléctrico asíncrono de inducción información válida que permita establecer una propuesta de dimensionamiento del capacitor necesario para la compensación de su potencia reactiva?

1.3 HIPÓTESIS

El circuito equivalente de un motor eléctrico asíncrono de inducción proporciona información válida que permite establecer una propuesta de dimensionamiento del capacitor necesarios para la compensación de su potencia reactiva.

1.4 JUSTIFICACIÓN

TECNOLÓGICA

Los conocimientos derivados de este estudio permitirán a la comunidad técnica entender y sustentar, a partir de un modelo físico, los algoritmos de dimensionamiento de banco de capacitores destinados a la corrección individual del factor de potencia de motores eléctricos.

ECONÓMICA

Los conocimientos derivados de este estudio permitirán a la industria nacional la posibilidad de adoptar medidas para obtener mejoras en la eficiencia energética de la explotación de motores eléctricos de inducción y por lo tanto de mejorar su competitividad a través de la optimización de sus recursos económicos.

1.5 OBJETIVOS

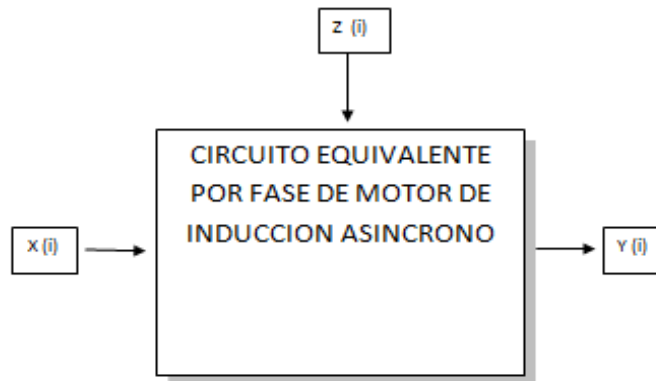
1.5.1 OBJETIVO GENERAL

- Demostrar la validez del circuito equivalente del motor asíncrono eléctrico de inducción para establecer una propuesta de dimensionamiento del capacitor necesario para la compensación de su potencia reactiva.

1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar de manera gráfica el comportamiento de la potencia reactiva inductiva del motor eléctrico de inducción en función del factor de carga mecánica.
- Establecer el valor de referencia de la potencia reactiva del capacitor en función de la potencia reactiva del motor, de tal manera que permita obtener un factor de potencia que no sea facturable.
- Determinar la incidencia de la posición del capacitor dentro del circuito derivado en la necesidad de corregir el dimensionamiento de la protección y del cableado del motor eléctrico.

1.6 ESQUEMA DE INVESTIGACIÓN



X(i) Variable independiente	Tensión de alimentación eléctrica: baja o media tensión
	Clase NEMA
	Potencia mecánica nominal
	Numero de polos
	Frecuencia de alimentación
	Tipo de arranque
Carga mecánica acoplada	

Y (i) Variable dependiente	Potencia reactiva de capacitor
	Tipo de instalación del banco
	Características de contactores del banco

Z (i) Variable no controlable	Perdidas por efecto joule
	Perdidas por flujo magnético disperso
	Contaminación armónica
	Calidad de la energía: tensión y frecuencia.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 EL MOTOR ASÍNCRONO POLIFÁSICO DE INDUCCIÓN

2.1.1 PRINCIPIOS BÁSICOS DEL MOTOR ASÍNCRONO DE INDUCCIÓN

a) Características constructivas

Los elementos constructivos de los motores asíncronos de inducción con jaula de ardilla, al igual que cualquier otro dispositivo de conversión electromagnética de energía de tipo rotativo, están constituidos básicamente por un estator, un rotor, las tapas y los elementos de fijación.

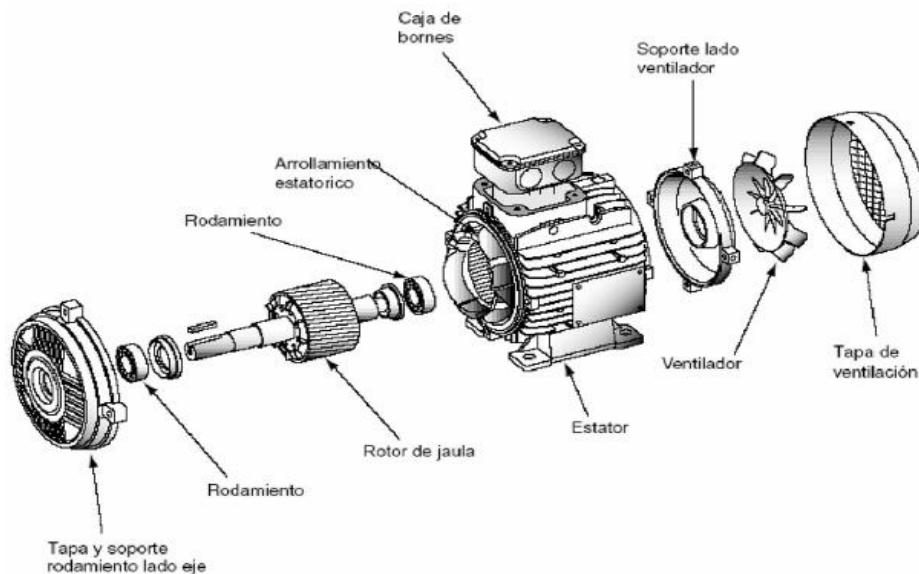


Figura 2.1: Componentes de un motor de inducción tipo jaula de ardilla.

El estator o inductor está formado por un conjunto de láminas de hierro al silicio, aisladas entre sí mediante barnices aislantes. El laminado del circuito magnético permite reducir las pérdidas por corrientes parásitas e histéresis. Este laminado dispone de unas ranuras en su periferia interior en las que se ubica los devanados de cobre de tres fases independientes entre sí los cuales se conectan convenientemente en la caja de bornes. Estos devanados son alimentados por un sistema trifásico de corrientes del mismo valor eficaz pero desfasadas 120° eléctricos entre sí. Esta configuración de las fases y las corrientes permite obtener en el espacio interior del estator un campo magnético giratorio de magnitud constante. Constructivamente el estator está rodeado por una carcasa metálica aleteada, disponiéndose en ésta tanto las partes de fijación y los cáncamos de elevación, así como la caja de bornes. El aleteado de la carcasa facilita la disipación de calor hacia el exterior, refrigerando la unidad.

El rotor o inducido está constituido también por un conjunto de láminas que se ensamblan formando un cilindro, el cual alberga un grupo de barras (que pueden ser de cobre o aluminio) que se colocan en cortocircuito mediante dos anillos extremos en lo que asemeja a una jaula de ardilla (razón de su nombre: motor jaula de ardilla).

El conjunto del motor se completa con los rodamientos, el ventilador y las tapas tal como puede apreciarse en la Figura 2.1

b) Principios Básicos

El devanado del estator está constituido por tres arrollamientos desfasados espacialmente 120° entre sí; al introducir a través de ellos corrientes de una red trifásica de corrientes de igual magnitud, desfasadas 120° eléctricos entre sí y todas de una misma frecuencia f_e , se produce una onda rotativa de fuerza magnetomotriz distribuida senoidalmente por la periferia del entrehierro, que produce un campo magnético giratorio \vec{B}_s cuya velocidad viene expresada por:

$$n_{sinc} = \frac{60f_e}{p} \quad [2.1]$$

Donde:

f_e : Frecuencia del sistema de corrientes, Hertz.

p : Número de pares de polos de la máquina.

n_{sinc} : Velocidad angular del campo magnético giratorio (sincronismo), RPM

Este campo magnético generado por el estator \vec{B}_s , cuya magnitud es constante y rotacional en el espacio, "corta" las barras del rotor e induce un voltaje en ellas.

El voltaje inducido en una barra determinada del rotor e obedece a ley de Faraday y está determinado por la siguiente ecuación:

$$e = \vec{v} \times \vec{B}_s \cdot \vec{l} \quad [2.2]$$

Donde:

\vec{v} : Velocidad de la barra, relativa al campo magnético.

\vec{B}_s : Vector de densidad de flujo magnético.

\vec{l} : Longitud del conductor dentro del campo magnético.

Al estar las barras en cortocircuito, circula corriente por ellas desarrollando una fuerza de origen magnético (acción motor). Esta fuerza permite a su vez generar un par con respecto al eje de giro del motor y, por lo tanto, un campo magnético del rotor \vec{B}_R . El par inducido $\vec{\tau}_{ind}$ hace girar al rotor y a su campo magnético \vec{B}_R ; y está determinado por la siguiente expresión, en la cual k es una constante de la máquina:

$$\vec{\tau}_{ind} = k \vec{B}_R \times \vec{B}_s \quad [2.3]$$

Un motor de inducción puede acelerar hasta alcanzar una velocidad cercana a la velocidad de sincronismo, pero nunca a la misma velocidad de sincronismo, ya que si lo hiciera el voltaje inducido en el rotor sería cero puesto que la velocidad relativa de la barra sería cero y por lo tanto ya no habría par inducido.

Puesto que el motor siempre deberá desarrollar par (aun cuando gira en vacío, para vencer la resistencia de la fricción en los rodamientos y para impulsar el aire de refrigeración), la velocidad de giro del rotor n_m es siempre menor comparada con la velocidad angular del campo magnético giratorio n_{sinc} , denominándose a esta diferencia *velocidad de deslizamiento* que viene a ser la velocidad relativa entre el rotor y campo magnético giratorio B_s .

$$n_{des} = n_{sinc} - n_m \quad [2.4]$$

Donde:

n_{des} : Velocidad de deslizamiento de la máquina, RPM.

n_{sinc} : Velocidad de los campos magnéticos, RPM.

n_m : Velocidad mecánica del eje del motor, RPM.

El deslizamiento s se define como el movimiento relativo del rotor respecto del campo magnético y puede ser expresada según:

$$s = \frac{n_{sinc} - n_m}{n_{sinc}} (x100) \quad [2.5]$$

Se puede deducir a partir de esta ecuación que si el rotor gira a una velocidad igual a la velocidad sincrónica entonces $s = 0$ y si el rotor está bloqueado (o al momento del arranque) se tiene que $s = 1$ o 100% entonces todas las velocidades posibles del motor caen dentro de este conjunto $[0,1)$ ó $[0, 100]$.

A partir de la ecuación [2.5] es posible expresar la velocidad mecánica del eje del rotor en términos de la velocidad sincrónica y el deslizamiento obteniéndose:

$$n_m = (1 - s)n_{sinc} \quad [2.6]$$

c) Frecuencia Eléctrica del Voltaje Inducido en el Rotor

Este tipo de motores eléctricos basa su funcionamiento en el fenómeno de inducción tal y como sucede en el transformador, tanto así que se le llama también transformador giratorio (Chapman [4]). Pero a diferencia de un transformador normal la frecuencia del voltaje inducido en el rotor f_r no siempre es la misma que la frecuencia del estator f_e . Si el motor se encuentra bloqueado (o en la condición de arranque inicial), la frecuencia del rotor sería la misma que en el estator; por el contrario, si el rotor se encontraría a velocidad sincrónica, la frecuencia sería cero. Es decir, se cumplirá lo siguiente:

$$\text{Si } n_m = 0 \text{ rev/min} \rightarrow f_r = f_e \text{ y } s = 1$$

$$\text{Si } n_m = n_{sinc} \rightarrow f_r = 0 \text{ Hz y } s = 0$$

Tomando en cuenta estas consideraciones es posible construir la figura No. 2.2 que nos muestra la relación entre el voltaje inducido en el rotor respecto al deslizamiento s .

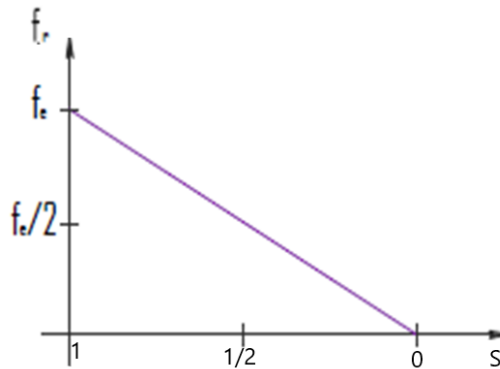


Figura 2.2: Frecuencia del voltaje inducido en el rotor en función del deslizamiento s .

De la figura 2.2 se deduce que la frecuencia del rotor f_r es directamente proporcional a la diferencia entre la velocidad del campo magnético n_{sinc} y la velocidad del rotor n_m , (lo que es el deslizamiento s) resultando la siguiente ecuación:

$$f_r = s f_e \quad [2.7]$$

2.1.2 CIRCUITO EQUIVALENTE POR FASE

El circuito equivalente por fase de un motor de inducción es un modelo físico de naturaleza eléctrica (contiene solo elementos pasivos lineales: resistencias y reactancias inductivas) que permite reproducir su comportamiento eléctrico estable bajo cualquier régimen de carga mecánica, siendo que la carga mecánica se expresa en el circuito mediante el valor del deslizamiento s . Asimismo, el circuito equivalente por fase brinda información respecto a los flujos de energía que se presentan al interior de la máquina. [3], [4], [5] y [6]

El circuito equivalente por fase se obtiene a partir de considerar al motor de inducción como un transformador giratorio en el cual el voltaje en el rotor es inducido a partir del flujo magnético generado en el estator. Puesto que la frecuencia de la onda sinusoidal voltaje inducido en el rotor f_r es variable con la velocidad del mismo (ecuación [2.7]), se debe necesariamente considerar la condición de rotor bloqueado, en la cual la frecuencia en el rotor es igual a la frecuencia eléctrica del estator f_e . Asimismo, las impedancias, voltajes y corrientes propias del rotor deben estar referidas al nivel de tensión aplicado al estator.

Basados en estas consideraciones, el circuito equivalente por fase del motor de inducción se representa en la figura 2.3

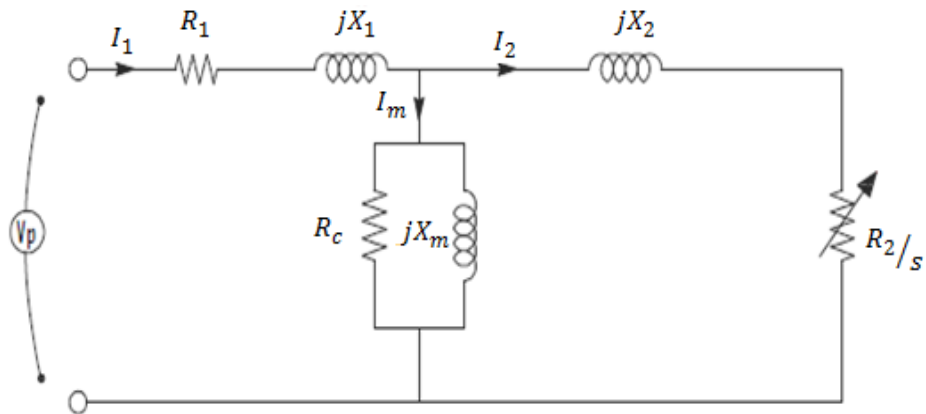


Figura 2.3: Circuito equivalente por fase del motor de inducción

Donde:

- R_1 : Resistencia por fase del estator, Ω
- X_1 : Reactancia de dispersión por fase del estator, Ω
- R_2 : Resistencia por fase del rotor referida al primario, Ω
- X_2 : Reactancia de dispersión por fase del rotor referida al primario Ω
- X_m : Reactancia de magnetización, Ω
- R_c : Resistencia por pérdidas por histéresis y corrientes parasitas, Ω
- s : Deslizamiento
- I_1 : Corriente por fase del estator, A
- I_2 : Corriente por fase del rotor referida al primario, A
- I_m : Corriente de excitación, A
- V_p : Voltaje de fase, V

Para un motor dado, las impedancias del circuito equivalente son determinadas en laboratorio mediante las pruebas de vacío, rotor bloqueado y corriente continua. Los detalles sobre la manera cómo llevar a cabo cada prueba están estipulados en la norma IEEE 112 "Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motor and Generator".

2.1.3 FÓRMULAS DERIVADAS DEL CIRCUITO EQUIVALENTE

A partir del circuito equivalente por fase de la figura 2.3 se pueden deducir las ecuaciones de potencia y par que gobiernan la operación del motor.

La corriente en el estator estará dada por:

$$\vec{I}_1 = \frac{\vec{V}_p}{Z_{eq}} \quad [2.8]$$

Donde Z_{eq} es la impedancia equivalente del circuito y cuyo valor se determina por:

$$\vec{Z}_{eq} = R_1 + jX_1 + \frac{1}{\frac{1}{R_c} - jB_M + \frac{1}{R_2/s + jX_2}} \quad [2.9]$$

La potencia eléctrica de entrada P_{elect} (ver inciso 2.1.4) se encuentra por:

$$P_{elect} = 3 V_p I_1 \cos\theta \quad [2.10]$$

Donde θ es el ángulo de fase entre \vec{I}_1 y \vec{V}_p

Las pérdidas en el cobre del estator P_{scl} ocurren en R_1 y se determinan por:

$$P_{SCL} = 3I_1^2 R_1 \quad [2.11]$$

Las pérdidas en el núcleo P_{nucleo} se hallan por:

$$P_{núcleo} = 3E_1^2 / R_c \quad [2.12]$$

Por lo tanto, la potencia que cruza el entrehierro llamada justamente potencia de entrehierro P_{AG} es la que llega al rotor y puede calcular por:

$$P_{AG} = P_{elect} - P_{SCL} - P_{núcleo} \quad [2.13]$$

Ó, puesto que toda la potencia que cruza en entrehierro se disipa en R_2/s , también:

$$P_{AG} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s} \quad [2.14]$$

Las pérdidas en el cobre del rotor P_{RCL} ocurren en R_2 y se calculan por:

$$P_{RCL} = 3I_2^2 R_2 \quad [2.15]$$

La potencia convertida P_{conv} (o potencia mecánica bruta) se calcula por:

$$P_{conv} = P_{AG} - P_{RCL} \quad [2.16]$$

Puesto que esta potencia se disipa en R_2 , también se calcula por:

$$P_{conv} = 3I_2^2 R_2 \left(\frac{1-s}{s} \right) = (1-s)P_{AG} \quad [2.17]$$

Por lo tanto, la potencia mecánica neta será:

$$P_{out} = P_{conv} - P_{F\&W} - P_{misc} \quad [2.18]$$

Donde $P_{F\&W}$ y P_{misc} son las pérdidas por fricción y ventilación, y misceláneas respectivamente.

El circuito equivalente por fase puede ser reducido a un *circuito equivalente aproximado* si se considera que las pérdidas de energía en el núcleo (vinculadas a R_c) son tomadas en cuenta conjuntamente con las pérdidas por fricción y ventilación $P_{F\&W}$ en lo que se conoce como las pérdidas rotacionales y que son susceptibles de ser medidas siguiendo

los procedimientos estandarizados de la norma IEEE 112. Las pérdidas rotacionales se definen entonces por:

$$P_{rot} = P_{F\&W} + P_{nucleo} \quad [2.19]$$

Entonces si se retira R_c del circuito equivalente, el circuito que se obtiene es el *circuito equivalente aproximado* que aparece en la figura 2.4

Por lo tanto, de acuerdo al circuito equivalente aproximado las ecuaciones 2.13 y 2.18 se modifican obteniéndose las siguientes expresiones:

$$P_{AG} = P_{elect} - P_{SCL} \quad [2.20]$$

$$P_{out} = P_{conv} - P_{rot} \quad [2.21]$$

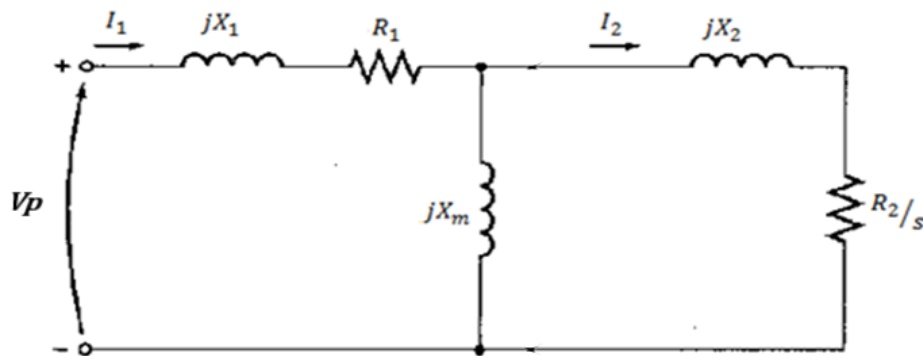


Figura No. 2.4: Circuito equivalente aproximado por fase del motor de inducción

El par inducido τ_{ind} (llamado también par mecánico bruto) en el motor de inducción se define como el par generado por la conversión de potencia interna eléctrica en mecánica y está dado por:

$$\tau_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega_m} = \frac{(1-s)P_{AG}}{(1-s)\omega_{sinc}} = \frac{P_{AG}}{\omega_{sinc}} \quad [2.22]$$

Donde ω_m y ω_{sinc} son la velocidad angular del motor y de sincronismo respectivamente.

La determinación de la corriente rotórica I_2 es muy importante ya que al conocerla también se hallará la potencia en el entrehierro, la potencia convertida y el par inducido. Hay diferentes maneras de hallar I_2 resolviendo el circuito equivalente, una de ellas es hallando el circuito equivalente de Thevenin. El Teorema de Thevenin establece que cualquier circuito lineal que pueda separarse del resto del sistema mediante dos terminales puede remplazarse por una sola fuente de voltaje en serie con una impedancia equivalente tal como se muestra en la figura 2.5a

El voltaje de la fuente llamado voltaje equivalente de Thevenin V_{TH} , es el voltaje aplicado a la "carga eléctrica" y será el voltaje de circuito abierto V_{TH} que se mide en la configuración mostrada en el circuito de la figura 2.5b

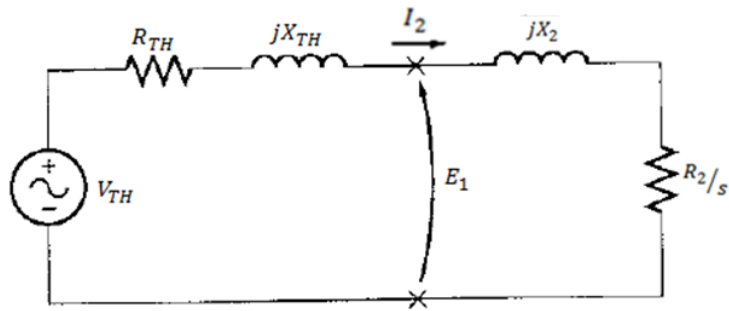


Figura 2.5a: Circuito equivalente de Thevenin por fase.

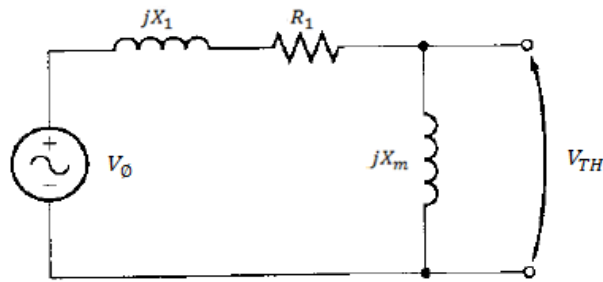


Figura 2.5b: Voltaje equivalente de Thevenin

Entonces el voltaje de Thevenin V_{TH} se calcula según la siguiente ecuación:

$$\vec{V}_{TH} = \frac{jX_m}{R_1 + jX_1 + jX_m} \vec{V}_p \quad [2.23]$$

Evidentemente el módulo del fasor voltaje de Thevenin es el siguiente:

$$V_{TH} = \frac{X_m}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_M)^2}} V_p \quad [2.24]$$

Para encontrar la impedancia de Thevenin ($R_{TH} + jX_{TH}$), se cortocircuita la fuente de voltaje en el circuito original y se encuentra la Z_{eq} del circuito ilustrado en la figura 2.5c.

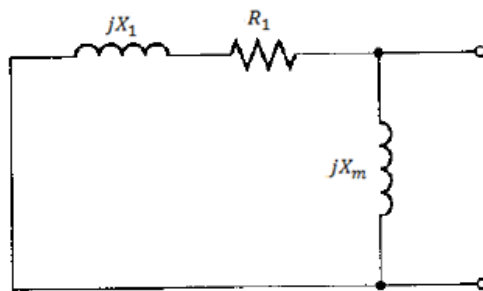


Figura 2.5c: Circuito para hallar la Impedancia equivalente de Thevenin

De la figura 2.5c se tiene que:

$$\vec{Z}_{TH} = R_{TH} + jX_{TH} = \frac{jX_m(R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_m)} \quad [2.25]$$

Y como las evidencias empíricas indican que $X_m \gg X_1$ y $(X_m + X_1) \gg R_1$, los valores finales de la resistencia y la reactancia de Thevenin, R_{TH} y X_{TH} , están dadas aproximadamente por las dos ecuaciones siguientes:

$$R_{TH} \approx R_1 \left(\frac{X_m}{X_1 + X_m} \right)^2 \quad [2.26]$$

$$X_{TH} \approx X_1 \quad [2.27]$$

Del análisis de las ecuaciones 2.24, 2.26 y 2.27 se concluye que, para un motor dado, ante voltaje y la frecuencia de alimentación constantes, los valores del voltaje, de la resistencia y de la reactancia de Thevenin también serán constantes.

Por otro lado, se hace hincapié que la única corriente que circula por el circuito equivalente de Thevenin es la corriente rotórica I_2 , por lo tanto, de la figura 2.5a se deduce que su valor se encuentra dado por la siguiente ecuación:

$$\vec{I}_2 = \frac{\vec{V}_{TH}}{\vec{Z}_{TH} + \vec{Z}_2} = \frac{\vec{V}_{TH}}{R_{TH} + \frac{R_2}{s} + jX_{TH} + jX_2} \quad [2.29]$$

Entonces la magnitud de esta corriente será:

$$I_2 = \frac{V_{TH}}{\sqrt{(R_{TH} + \frac{R_2}{s})^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} \quad [2.30]$$

La potencia en el entrehierro (ver inciso 2.1.4), según la ec. 2.14 estará dada por:

$$P_{AG} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s} = \frac{3V_{TH}^2 \cdot \frac{R_2}{s}}{(R_{TH} + \frac{R_2}{s})^2 + (X_{TH} + X_2)^2} \quad [2.31]$$

La potencia convertida o potencia mecánica bruta se determina por la expresión:

$$P_{conv} = P_{AG} (1 - s) = \frac{3V_{TH}^2 \cdot \frac{R_2}{s} \cdot (1 - s)}{(R_{TH} + \frac{R_2}{s})^2 + (X_{TH} + X_2)^2} \quad [2.32]$$

Y por último, el par inducido o par magnético bruto del rotor está dado por:

$$\tau_{ind} = \frac{P_{AG}}{\omega_{sinc}} = \frac{3V_{TH}^2 \cdot \frac{R_2}{s}}{\omega_{sinc} [(R_{TH} + \frac{R_2}{s})^2 + (X_{TH} + X_2)^2]} \quad [2.33]$$

En las ecuaciones 2.31, 2.32 y 2.33, la única variable presente es el deslizamiento s , la cual, como se ha dicho anteriormente, es el termino dentro del circuito que expresa la magnitud de la carga mecánica a la que se encuentra sometida la máquina. En otras palabras en estas ecuaciones tanto la corriente rotórica I_2 , la potencia de entrehierro P_{AG} , la potencia mecánica bruta P_{conv} y el par mecánico bruto τ_{ind} dependen exclusivamente del deslizamiento s . El resto de los términos que aparecen en las mencionadas ecuaciones son constantes para un motor específico.

2.1.4 FLUJO DE ENERGÍA Y POTENCIA

La potencia de entrada al motor de inducción es potencia eléctrica activa (P_{elect}). Las primeras pérdidas encontradas en la máquina son por efecto joule $I_1^2 R_1$ en los devanados del estator (llamadas pérdidas en el cobre del estator P_{SCL}). Luego alguna cantidad de potencia se pierde por histéresis y por corrientes parásitas en el estator (llamadas pérdidas en el núcleo P_{nucleo}). La potencia remanente en este punto se transfiere al rotor de la máquina a través del entrehierro situado entre el rotor y el estator. Esta potencia es llamada la potencia en el entrehierro (P_{AG}). Después que la potencia a sido transferida al rotor, algo de ella se disipa como pérdidas por efecto joule $I_2^2 R_2$ (pérdidas en el cobre del rotor P_{RCL}). Por último, las pérdidas por rozamiento en los rodamientos y por ventilación ($P_{F\&W}$) y las pérdidas misceláneas P_{misc} se restan. La potencia restante es la de salida del motor o potencia mecánica neta (P_{out}). El flujo de potencia se ilustra en la figura 2.6

Por lo tanto, es posible definir la eficiencia η del motor de inducción, como convertidor de energía, de la siguiente manera:

$$\eta = \frac{\text{Potencia mecánica util}}{\text{Potencia eléctrica}} = \frac{P_{out}}{P_{elect}} \times 100 \quad [2.34]$$

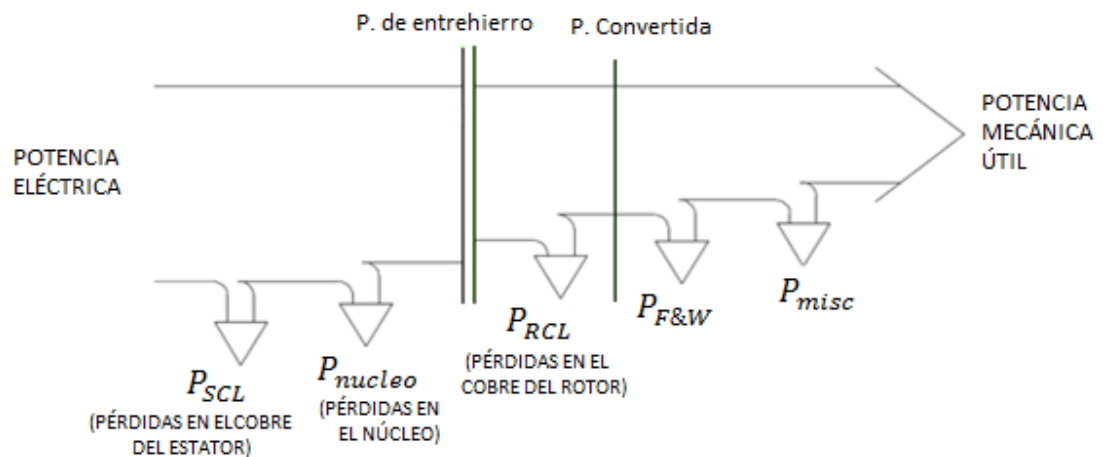


Figura 2.6: Flujo de potencia en un motor de inducción

2.1.5 CURVAS CARACTERÍSTICAS DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN

Para un motor de inducción dado, del cual se conozca el circuito equivalente aproximado y, por lo tanto, sus ecuaciones correspondientes, es posible, usando MATLAB, graficar todas sus curvas características en función del deslizamiento o de la velocidad, tal como se aprecia en las figuras siguientes: (para un motor de 50 HP – 480 VAC – 4 polos – 60 Hz.)

- En la figura 2.7 el par convertido o mecánico bruto en función de la velocidad indicando los valores del par de arranque, el par máximo y el par nominal.
- En la figura 2.8 la potencia mecánica bruta en función de la velocidad indicando los valores máximos y nominales.
- En la figura 2.9 La eficiencia en función de la velocidad indicando el valor de eficiencia nominal.
- En la figura 2.10 el factor de potencia en función de la velocidad indicando el valor nominal y el valor máximo.
- En la figura 2.11 la corriente de línea en función de la velocidad indicando los valores de la corriente de arranque y de la corriente nominal.

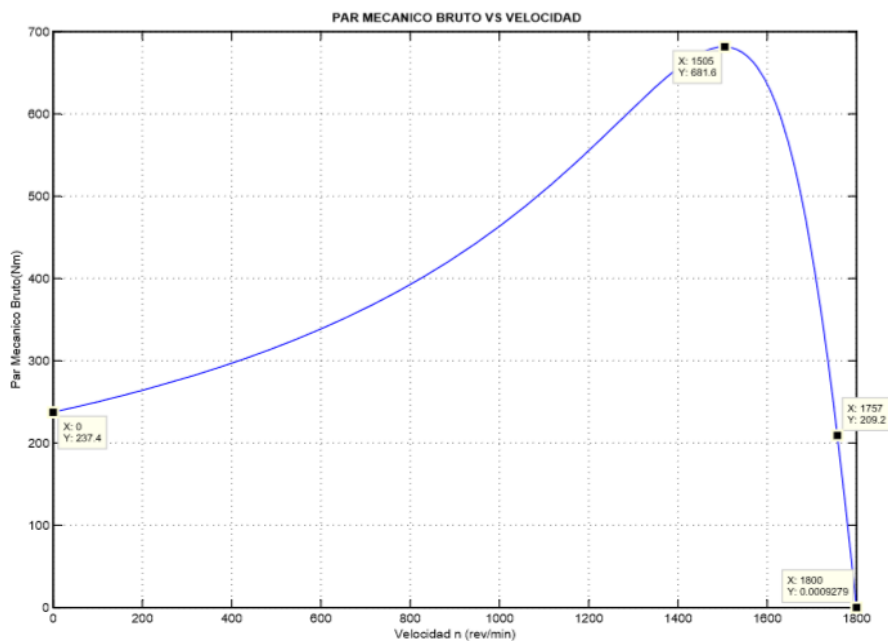


Figura 2.7: Par inducido en función de la velocidad.

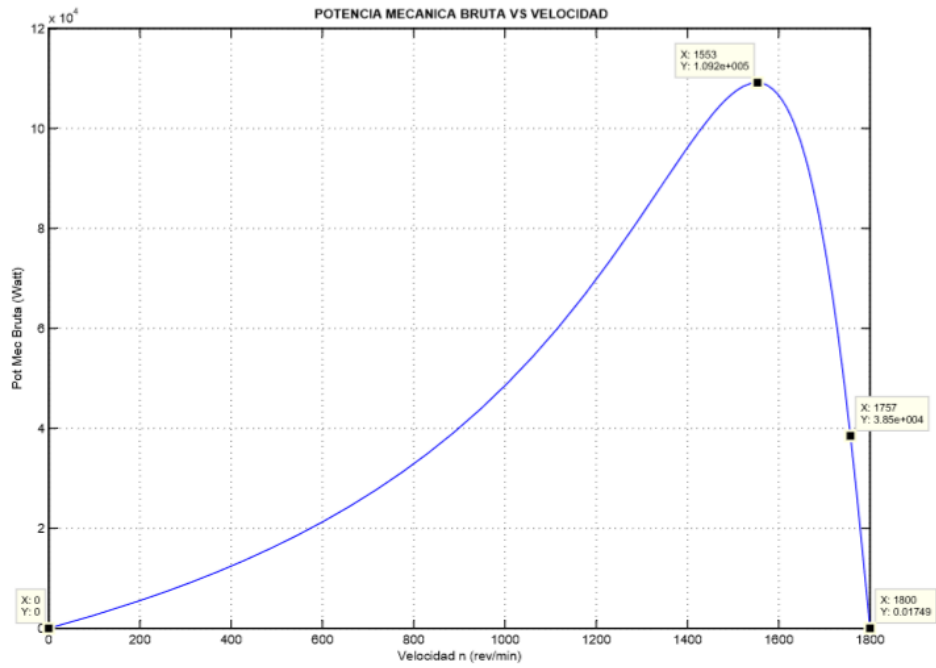


Figura 2.8: Potencia mecánica bruta en función de la velocidad.

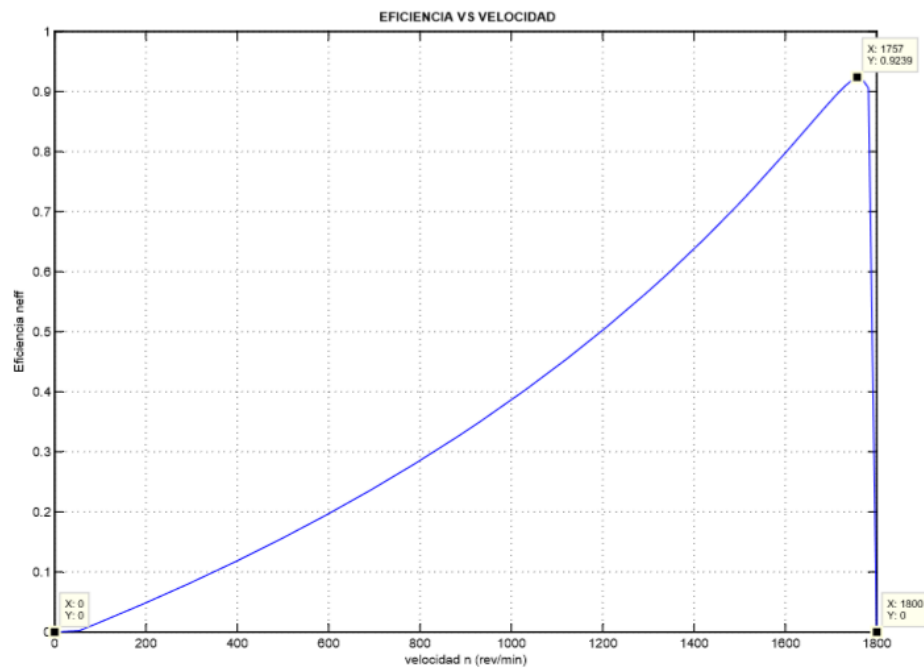


Figura 2.9: Eficiencia en función de la velocidad.

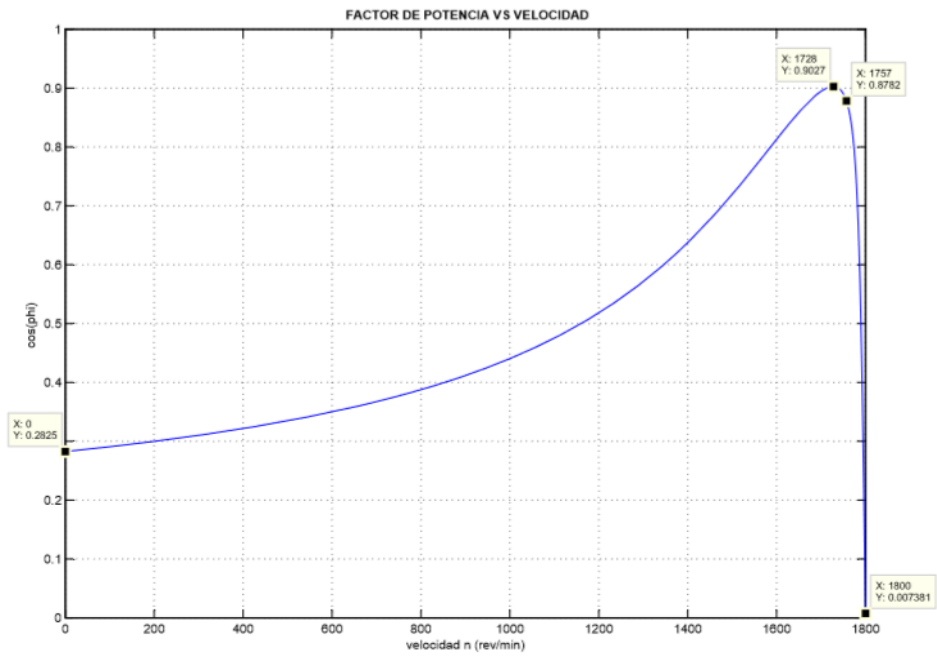


Figura 2.10: Factor de Potencia en función de la velocidad.

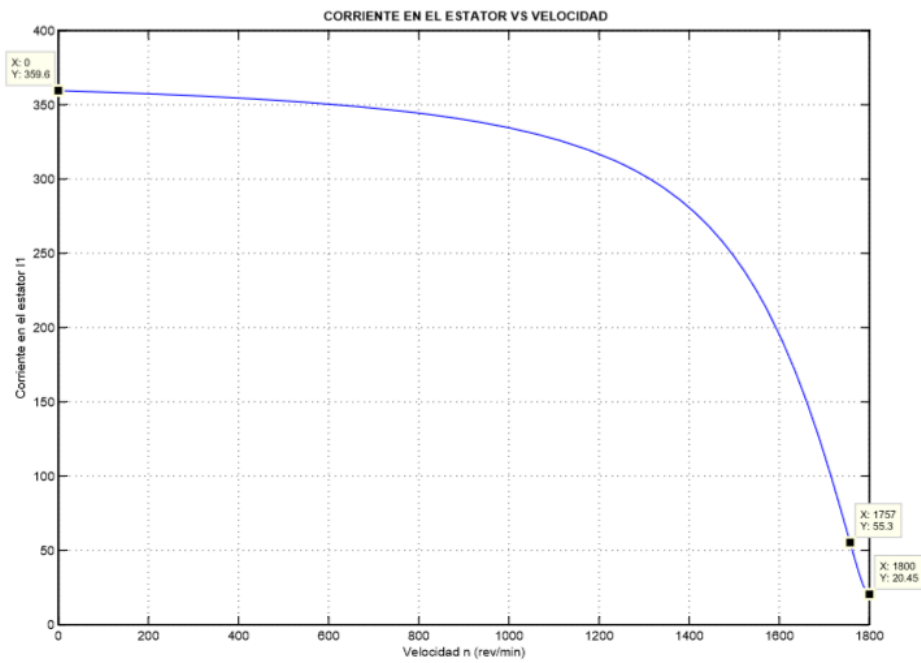


Figura 2.11: Corriente de línea en función de la velocidad

2.1.6 CARGA MECÁNICA ACOPLADA Y FACTOR DE CARGA

En cualquier eje de transmisión de potencia, las condiciones de equilibrio de velocidad se establecerán cuando el par motor iguale al par resistente de la máquina conducida. Al ser la naturaleza real de esta última de tipo variable, los puntos de equilibrio o puntos de operación podrán ser diferentes tanto en la curva de par como en la curva de potencia.

En condiciones de voltaje de línea y frecuencia constantes, en la zona de operación típica del motor de inducción asíncrono, llamada también zona de bajos deslizamientos, la velocidad del motor varía de manera inversa al par motor desarrollado estableciendo zonas características de operación tal como se observa en la figura 2.12

A la condición en la cual el par mecánico útil toma el valor del par nominal o de placa se le llama condición nominal o de plena carga. En este punto todas las variables eléctricas y mecánicas toman los llamados valores nominales que, como se ha dicho, son los que aparecen en la placa de identificación del motor. Se llama zona de sub carga a aquella en la cual los puntos de equilibrio se establecen con valores menores al del par nominal. Evidentemente en esta zona los valores de las variables eléctricas y mecánicas difieren de los valores nominales. La zona de sobrecarga es aquella definida por valores del par de equilibrio superiores al del par nominal. También los valores de las variables eléctricas y mecánicas difieren de los valores nominales.

Si a los valores de par se le multiplica por sus valores correspondientes de velocidad angular se tendrá los valores de potencia mecánica bruta estableciendo, de manera similar, en la curva de potencia mecánica bruta versus velocidad, las zonas de operación mencionadas anteriormente como puede apreciarse en la figura 2.13

Tomando en cuenta la curva de potencia del motor de inducción el factor de carga FC se define por la siguiente relación:

$$\text{Factor de Carga, } FC = \frac{\text{Potencia Mecánica Util Actual}}{\text{Potencia Mecánica Util Nominal}} \times 100 \quad [2.35]$$

Donde la potencia mecánica útil actual se refiere a cualquier valor de potencia que puede entregar el motor cuando se encuentre en operación.

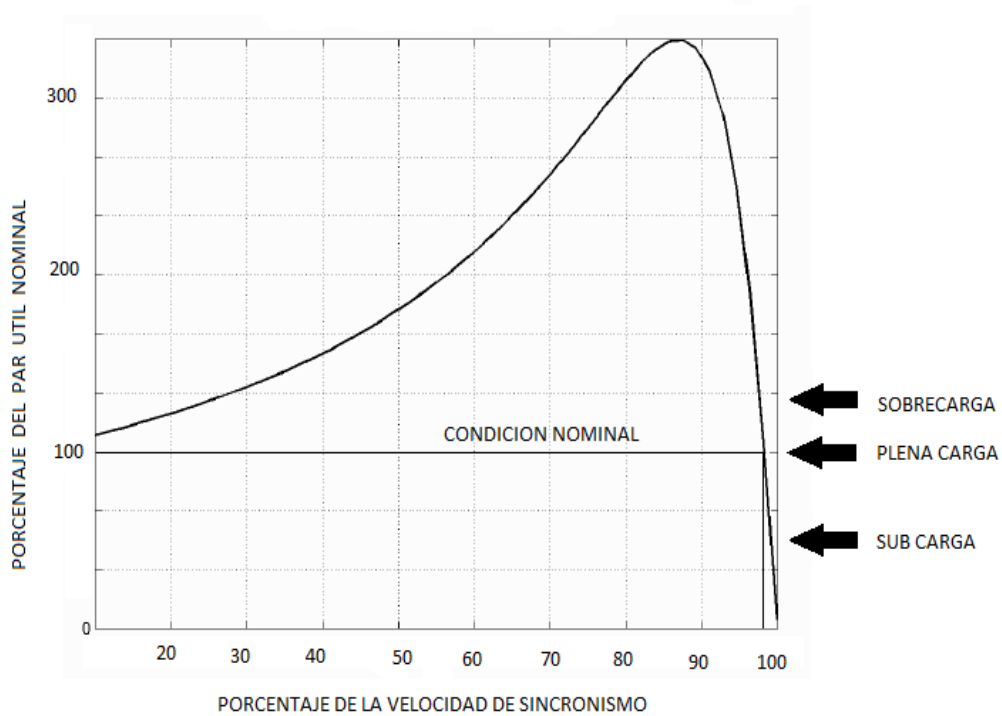


Figura 2.12: Zonas de carga en el diagrama Par vs. Velocidad

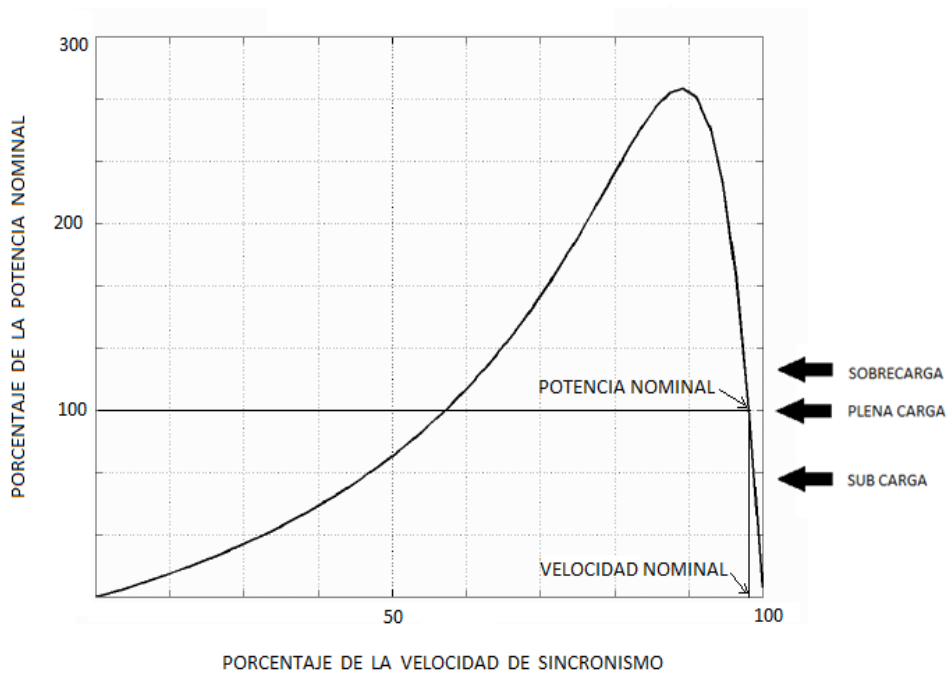


Figura 2.13: Zonas de carga en el diagrama Potencia Mecánica Útil vs. Velocidad

Una vez definida la velocidad, los motores de inducción se seleccionan, en términos de potencia mecánica, a partir de la ecuación 2.35 debiéndose conocer previamente la potencia mecánica requerida al eje por la máquina conducida, la cual se tomará como el valor de la *potencia mecánica útil actual*. Por seguridad o defecto, el valor de la *potencia mecánica útil nominal* del motor eléctrico se calcula optando por un factor de carga que oscile entre el 50 % y el 80% según la certeza que se tenga del requerimiento de potencia (se considera que el ligero sobredimensionamiento del motor le faculta a absorber cargas mecánicas pico estando dentro de sus márgenes tolerables de operación).

Es decir, un motor eléctrico, por lo general, se selecciona para que opere en zona de sub carga o de baja carga y en esta condición, como se ha mencionado anteriormente, todos los parámetros eléctricos y mecánicos de la máquina difieren de los parámetros nominales o de placa.

Se hace hincapié que un motor de inducción puede tomar cargas mayores a la nominal (condición de sobrecarga) pero solo por periodos de tiempo cortos. Tal condición se encuentra establecida en la placa del motor con el llamado factor de servicio. En esta zona también los parámetros eléctricos difieren de los nominales.

Ya en operación, el motor podrá operar entonces, sin incurrir en calentamiento peligroso, en la zona de sub carga teniendo una velocidad máxima muy cercana a la de sincronismo (cuando la potencia mecánica útil entregada sea cero, $FC = 0$) y la velocidad nominal (cuando la potencia mecánica útil entregada sea la nominal, $FC = 1$). Se considera entonces hipotéticamente que la potencia mecánica tendrá un comportamiento lineal en función a la velocidad entre estos dos puntos, estableciendo de esta manera al factor de carga como una variable mecánica más.

Definido el factor de carga FC como una variable mecánica, entonces cualquiera otro de los parámetros de la máquina (eficiencia, factor de potencia, deslizamiento, potencia activa, reactiva, potencia aparente, etc.) puede ser representada en función del mismo. Así en la figura 2.14 se puede observar como varían los parámetros eléctricos en función del factor de carga (expresado de manera porcentual) en la zona de operación de un motor de 50 HP – 220 VAC - 4 polos – 60 Hz.

De igual manera en la figura 2.15 se muestra el comportamiento típico de las curvas de factor de potencia, potencia activa, potencia reactiva y potencia aparente en función del factor de carga (en fracción). Asimismo, se puede apreciar el comportamiento típico que toma el factor de potencia una vez que la energía reactiva que recibe el motor ha sido compensada mediante un banco de capacitores cuya potencia reactiva es igual al integro de la potencia reactiva que consume el motor cuando opera en vacío (en este caso 5 KVAR); en este caso se observa que el factor de potencia toma el valor de uno cuando el factor de carga es cero.

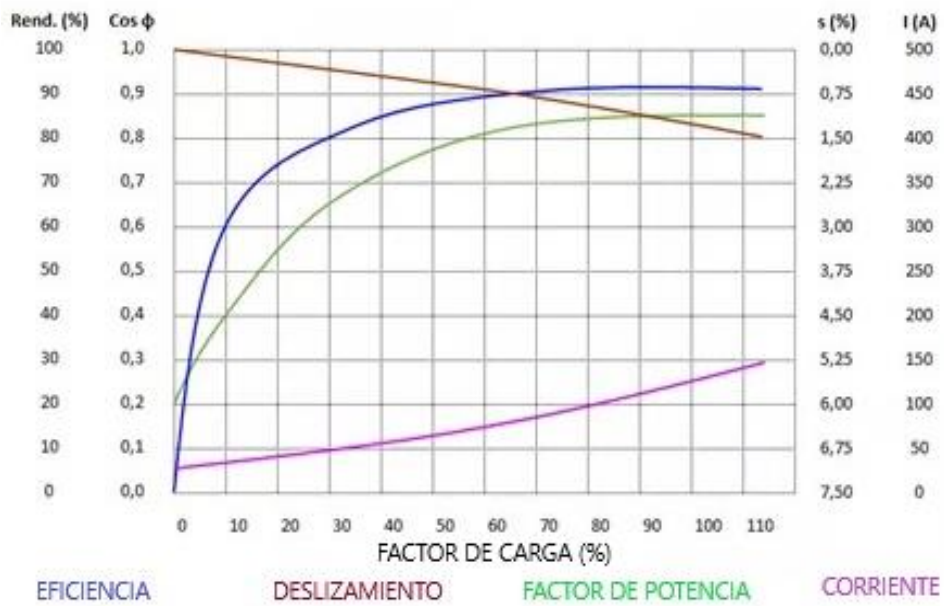


Figura 2.14: Eficiencia, deslizamiento, factor de potencia y corriente en función del factor de carga (%) para motor de 50 HP – 220 VAC – 60 Hz – 4 polos

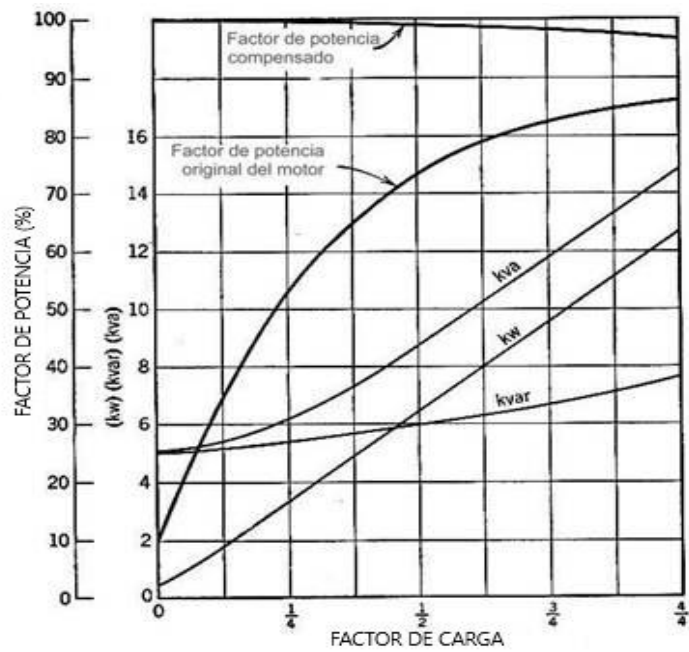


Figura 2.15: Factor de potencia y potencias eléctricas (activa, reactiva y aparente) en función del factor de carga

2.2 EL FACTOR DE POTENCIA Y SU COMPENSACIÓN

2.2.1 NATURALEZA DE LA ENERGÍA REACTIVA

Todas las instalaciones y equipos de corriente alterna que posean dispositivos electromagnéticos o devanados acoplados magnéticamente necesitan energía reactiva para crear los campos magnéticos con los que trabajan. En las instalaciones industriales tales equipos, por lo general, son: transformadores, motores, hornos de arco, máquinas de soldar, lámparas de descarga con reactores, etc.

De la energía eléctrica total suministrada a una instalación, una porción se encuentra vinculada a la energía activa, que es aquella que se transforma íntegramente en trabajo mecánico o en calor, y otra porción se encuentra relacionada a la energía reactiva inductiva, que es aquella que utilizan los inductores en la creación de los campos magnéticos.

En los sistemas lineales, el voltaje y la corriente son funciones sinusoidales, entonces, en el dominio de la frecuencia, sus relaciones temporales pueden ser representadas por fasores, los cuales son vectores cuya magnitud es el valor eficaz de la función.

La figura 2.16 ilustra el típico diagrama fasorial de una carga eléctrica resistivo inductiva o R-L, donde el fador voltaje \mathbf{V} y el fador corriente total \mathbf{I} definen el ángulo de fase ϕ . El fador corriente se ha dividido en sus componentes vectoriales $I \cos(\phi)$ e $I \sin(\phi)$. La componente resistiva $I \cos(\phi)$ se encuentra en fase con \mathbf{V} y es la que produce trabajo mecánico o calor, mientras que la componente reactiva $I \sin(\phi)$ se encuentra vinculada a la creación de los campos magnéticos.

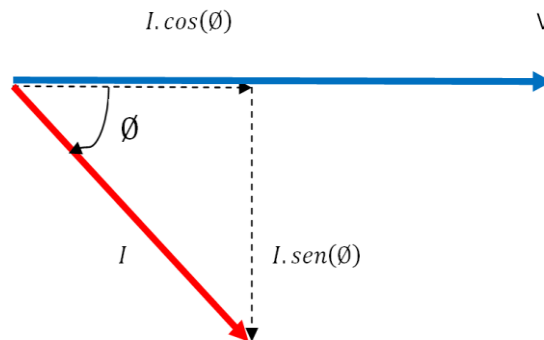


Figura 2.16: Diagrama fasorial de un circuito eléctrico R - L

Siendo la potencia igual al producto del voltaje por la corriente, se tendrá entonces la Potencia Activa, Potencia Reactiva y Potencia Aparente definidas según las expresiones siguientes:

$$P = VI \cos(\phi) ; \text{ Potencia Activa (W).} \quad [2.36]$$

$$Q = VI \sin(\phi) ; \text{ Potencia Reactiva (VAR).} \quad [2.37]$$

$$S = VI ; \text{ Potencia Aparente en (VA).} \quad [2.38]$$

Donde:

V = módulo de la tensión (V)

I = módulo de la intensidad de corriente (A)

\emptyset = ángulo de fase

Estas potencias se vinculan a través del llamado triángulo de potencia de la figura No. 2.17

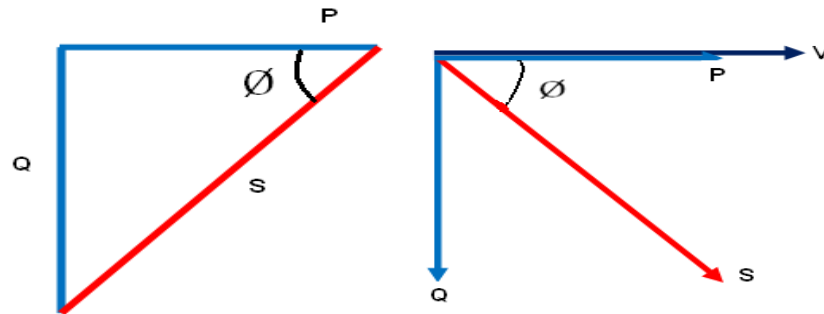


Figura 2.17: Triangulo de Potencias P, Q, S.

Donde la Potencia Aparente es aquella que “aparentemente” se cede a la instalación y resulta del producto de la suma algebraica de las energías activa y reactiva y que también puede determinarse por la expresión siguiente:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad [2.39]$$

2.2.2 EL FACTOR DE POTENCIA DE UNA CARGA ELÉCTRICA

El Factor de Potencia FP de una carga eléctrica se define como la relación entre la Potencia Activa a la Potencia Aparente según la siguiente expresión:

$$FP = \frac{P}{S} \quad [2.40]$$

En el caso de que las funciones de voltaje y corriente sean sinusoidales el Factor de Potencia es igual al $\cos(\emptyset)$.

$$FP = \cos(\emptyset) \quad [2.41]$$

En otras palabras, el factor de potencia es un indicador de los valores particulares de las potencias activa, reactiva y aparente consumidas por una carga eléctrica dada. Así, un bajo FP indicara un valor bajo de la relación P/S y a su vez un valor alto de la razón Q/P ó, si utilizamos sus unidades de medición, de la relación $KVAr/KW$.

La figura 2.18 ilustra la variación del FP para una misma potencia activa P , cuanto mayor es la potencia reactiva, mayor es la potencia aparente y por lo tanto menor el factor de potencia.

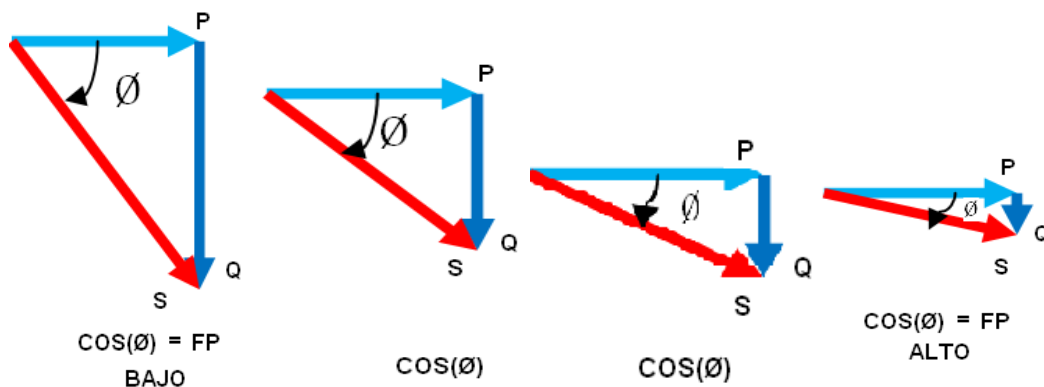


Figura 2.18: Para una misma P, variaciones de Q y S con el factor de potencia

Un factor de potencia unitario indica que toda la potencia aparente está siendo convertida en potencia activa o potencia “útil” y que la potencia reactiva es cero. Desde el punto de vista de la corriente, un bajo factor de potencia origina que la componente reactiva sea relativamente grande comparada con la componente activa originando que la corriente total se incremente. La tabla 2.1 muestra cargas eléctricas y su típico factor de potencia.

Tipo de carga		$\cos \phi$	$\tan \phi$
■ Motor de inducción común cargado al	0%	0,17	5,80
	25%	0,55	1,52
	50%	0,73	0,94
	75%	0,80	0,75
	100%	0,85	0,62
■ Lámparas incandescentes		1,0	0
■ Lámparas fluorescentes (no compensadas)		0,5	1,73
■ Lámparas fluorescentes (compensadas)		0,93	0,39
■ Lámparas de descarga		de 0,4 a 0,6	de 2,29 a 1,33
■ Hornos que utilizan elementos de resistencia		1,0	0
■ Hornos de calentamiento por inducción (compensados)		0,85	0,62
■ Hornos de calentamiento de tipo dieléctrico		0,85	0,62
■ Máquinas de soldar de tipo resistencia		de 0,8 a 0,9	de 0,75 a 0,48
■ Conjunto monofásico fijo de soldadura por arco		0,5	1,73
■ Conjunto generado por motor de soldadura por arco		de 0,7 a 0,9	de 1,02 a 0,48
■ Conjunto rectificador transformador de soldadura por arco		de 0,7 a 0,8	de 1,02 a 0,75
■ Horno de arco		0,8	0,75

Tabla 2.1: Cargas eléctricas y su factor de potencia típico. Schneider [2]

2.2.3 CAUSAS DE UN BAJO FACTOR DE POTENCIA EN UNA INSTALACIÓN ELÉCTRICA

En una instalación eléctrica las causas de un bajo factor de potencia pueden ser:

a) MOTORES OPERANDO EN VACÍO O EN BAJA CARGA

La cantidad de energía reactiva que consume un motor eléctrico en su rango de operación normal es prácticamente la misma, mientras que la potencia activa consumida es proporcional a la carga mecánica que el motor arrastra. Así, cuanto

menor sea la carga mecánica, menor será la potencia activa y menor será el factor de potencia.

b) MOTORES SOBREDIMENSIONADOS

Son motores que trabajan continuamente con cargas mecánicas inferiores a la carga nominal, en otras palabras, están sub cargados. Por las consideraciones anteriores operarán con bajo factor de potencia.

c) ILUMINACIÓN DEL TIPO DESCARGA O DE ARCO

Las lámparas de vapor de mercurio, las lámparas fluorescentes y otros tipos de dispositivos tipo descarga trabajan con una inductancia o requieren de transformadores consumiendo, por lo tanto, potencia reactiva.

d) SOLDADORAS ELÉCTRICAS DE CORRIENTE ALTERNA

Son máquinas que se caracterizan por presentar un bajo factor de potencia debido a que son construidas con una reactancia interna que tiene como propósito limitar las corrientes de corto circuito en el momento que se produce el arco, produciendo al mismo tiempo, un bajo factor de potencia.

e) HORNOS ELÉCTRICOS DE ARCO VOLTAICO

El factor de potencia de los hornos es bajo por dos razones: primero, el arco al comienzo del ciclo tiene menor conductividad, de manera que la corriente se atrasa con relación al voltaje. Segundo, cuando el arco está en cortocircuito, en donde es necesario disponer de una reactancia para limitar la intensidad de corriente a un valor fuera de peligro, siendo esta reactancia la causa del bajo factor de potencia.

f) TRANSFORMADORES EN VACÍO O CON PEQUEÑAS CARGAS

De manera análoga a lo que sucede con los motores, los transformadores que operan en vacío o con baja carga consumen una cantidad de energía reactiva relativamente grande (asociada a su propia corriente de magnetización) comparada con la energía activa de la carga provocando un bajo factor de potencia.

2.2.4 CONSECUENCIAS DE UN BAJO FACTOR DE POTENCIA

Según Yebra [7] la elevada corriente total producto de un bajo factor de potencia causa los siguientes perjuicios técnicos y económicos:

a) INCREMENTOS DE LAS PÉRDIDAS POR EFECTO JOULE

La potencia que se pierde por calentamiento está dada por la expresión

$$P = I^2R \quad [2.42]$$

Donde:

I = corriente total

R = resistencia eléctrica de los conductores y equipos (bobinados de generadores y transformadores, conductores de los circuitos de distribución, etc.)

Las pérdidas por efecto joule se manifiestan en:

- Calentamiento de cables.
- Calentamiento de los bobinados de los transformadores de distribución.
- Disparo, sin causa aparente, de los dispositivos de protección.

Uno de los mayores problemas que causa el sobrecalentamiento, debido a las pérdidas por efecto joule, es el deterioro irreversible del aislamiento de los conductores que, además de reducir la vida útil de los equipos, puede provocar cortos circuitos.

b) SOBRECARGA DE LOS GENERADORES, TRANSFORMADORES Y LÍNEAS DE DISTRIBUCIÓN

El exceso de corriente debido a un bajo factor de potencia ocasiona que los generadores, transformadores y líneas de distribución trabajen con cierta sobrecarga y reduzcan su vida útil, debido a que estos equipos se diseñan para un cierto valor de corriente y por lo tanto de temperatura. Para no dañarlos, se debe operar sin que los valores límites sean sobrepasados.

c) AUMENTO DE LA CAÍDA DE TENSIÓN

La circulación de corriente a través de los conductores ocasiona una caída de tensión (producto del valor de la corriente multiplicado por la impedancia de la línea), resultando en una baja tensión en terminales de las cargas eléctricas (motores, transformadores, lámparas, etc.). Como consecuencia estas cargas sufren una reducción en su potencia de salida. Estas caídas de voltaje afectan a:

- Los devanados de los transformadores de distribución.
- Los cables de distribución, y a los sistemas de protección y control.

d) INCREMENTO EN LA FACTURACION ELÉCTRICA

Debido a que un bajo factor de potencia implica pérdida de energía en la red eléctrica, las compañías suministradoras se ven en la necesidad de penalizar al usuario cobrando un recargo por un excesivo consumo de energía reactiva.

Todos estos perjuicios mencionados obligan a las empresas consumidoras a tomar acciones que permitan elevar su factor de potencia. Una de estas acciones consiste en la instalación de capacitores que, mediante la energía reactiva de tipo capacitiva que aportan, permiten elevar o compensar el factor de potencia de una instalación.

2.2.5 EL CAPACITOR

El capacitor es un dispositivo eléctrico pasivo que almacena energía en forma de un campo eléctrico y que está formado por dos placas metálicas conductoras aisladas y separadas por un dieléctrico que puede ser de mica, papel, vidrio, cerámica, poliéster, etc. Ver figura 2.19

La figura 2.20 muestra el campo eléctrico E que se establece al interior del capacitor se determina a partir de la diferencia de voltaje V (voltios) entre sus placas y la distancia d (m) entre las mismas según:

$$E = \frac{V}{d} \quad [2.43]$$

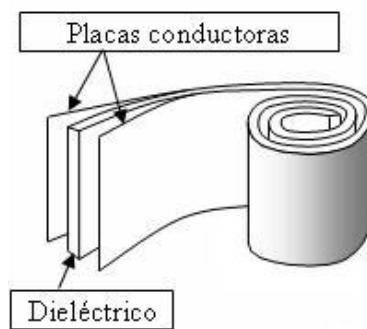


Figura 2.19: Estructura interna del capacitor.

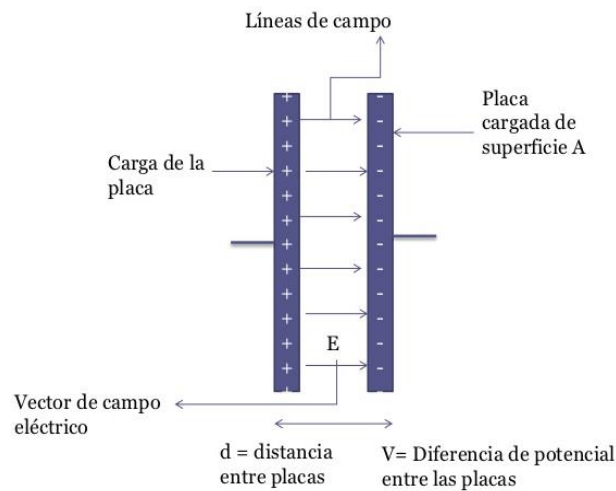


Figura 2.20: Características constructivas de un capacitor plano

La capacitancia, C , (faradios) de un capacitor plano es una propiedad física característica del dispositivo y está dada por:

$$C = \epsilon \frac{A}{d} \quad [2.44]$$

Donde:

A =área de las placas (m^2),

d =distancia entre placas (m),

ϵ = permitividad del material dieléctrico (faradios/m)

Como propiedades importantes de los capacitores se debe mencionar que el dieléctrico de los mismos presenta una *rigidez dieléctrica* que es el gradiente de voltaje que hace que el dieléctrico pierda sus propiedades aislantes y se convierta prácticamente en un conductor. Asimismo, todo capacitor real presenta una *corriente de fuga*, que puede ser muy pequeña o relativamente grande y que, cuando el capacitor está descargado, tiende a igualar el potencial eléctrico entre las placas metálicas.

Según el valor de su capacitancia, los capacitores pueden ser fijos o variables. Los capacitores fijos pueden ser no polarizados o polarizados según sea necesario considerar una polaridad determinada en sus conexiones para su correcta operación. Los capacitores fijos no polarizados en general presentan una alta rigidez dieléctrica y una corriente de fuga muy baja y pueden ser fabricados utilizando dieléctricos de mica, cerámica, poliéster y papel. Los condensadores fijos polarizados requieren de una polaridad al momento de la conexión, si no, pueden sufrir daño. Son del tipo electrolítico (utiliza placas de aluminio para las placas positiva y negativa y óxido de aluminio como dieléctrico) que presentan una relativamente baja corriente de fuga y una baja rigidez dieléctrica. Otro tipo de capacitor fijo polarizado es el de tantalio que puede ser sólido o húmedo. En cuanto a los capacitores variables generalmente son fabricados con dieléctrico de aire o de mica.

En un circuito de corriente alterna, el capacitor se asocia a una reactancia capacitiva X_C (Ω) que se encuentra determinada por la siguiente relación:

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \quad [2.45]$$

Donde

f : frecuencia en Hertz.

C : capacitancia en faradios.

En un circuito de corriente alterna, la función sinusoidal corriente que circula por un capacitor I_c se encuentra adelantado 90° respecto a la función sinusoidal voltaje

aplicado en sus terminales de tal manera que su respectivos fasores se representan de acuerdo a la siguiente figura 21

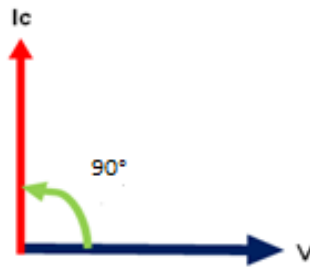


Figura 2.21: Diagrama fasorial de un capacitor puro.

Un capacitor instalado en un circuito de corriente alterna aporta potencia reactiva de tipo capacitiva definida según la siguiente expresión:

$$Q_C = 2\pi f C V^2 \quad [2.46]$$

Donde:

Q_C : Potencia reactiva capacitiva (VAR)

V : Voltaje aplicado (V).

C : Capacitancia (faradios)

f : frecuencia (Hz)

2.2.6 CAPACITOR PARA LA COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA

Los capacitores para la compensación de potencia reactiva son diseñados para soportar altas corrientes de inserción (inrush) – del orden de 100 veces la corriente nominal - causadas por frecuentes operaciones de conmutación (switching). Los dieléctricos más usados, según Enriquez Harper [8], son de papel kraft, papel kraft más película y solamente película. Esta última tecnología es la más usada y responde a la norma IEC 60831 – 1/2; constructivamente utilizan placas de aluminio o zinc enrollados sobre una película de polipropileno metalizado autoregenerativo de un espesor entre 3 y 18 micras. La protección del dispositivo juega un papel muy importante incorporando protección contra defectos de elevada intensidad mediante un fusible interno, y protección contra defectos de baja intensidad mediante una membrana de sobrepresión asociada también a un fusible de alto poder de ruptura. Asimismo, estos dispositivos presentan una resistencia de descarga para eliminar la diferencia de potencial entre placas cuando el dispositivo se desconecta. Ver figura 2. 22

La característica de auto regeneración o auto cicatrización consiste en que la energía desprendida por una ruptura del dieléctrico, que puede ser debida a una sobrecarga eléctrica o térmica, hace evaporarse el depósito metálico alrededor del defecto, aislándolo, y permitiendo la restitución de las propiedades eléctricas del dispositivo.

Los capacitores para la compensación de la energía reactiva de instalaciones eléctricas se especifican por: potencia reactiva, tensión y frecuencia. A partir de estos valores se calcula la corriente nominal. Según Enriquez Harper, durante la operación del capacitor, generalmente los márgenes admisibles son: sobretensión de hasta 10 % sobre el voltaje nominal y sobrecarga de hasta el 80 % la corriente nominal.

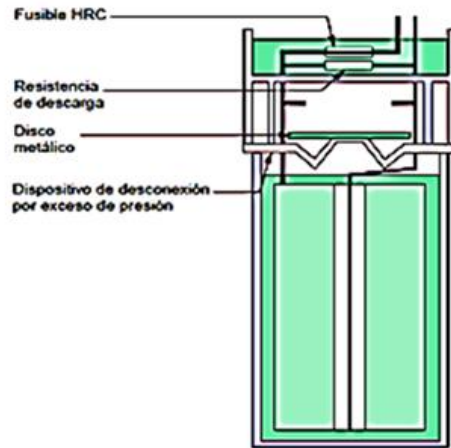


Figura 2.22: Capacitor para compensación de potencia reactiva (Schneider [9])

2.2.7 COMPENSACIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA DE UNA CARGA ELÉCTRICA

La potencia reactiva de capacitor Q_C , por la naturaleza de la corriente que la genera, I_C , se encuentra en oposición perfecta a la potencia reactiva de tipo inductiva Q_L que es aquella generada por los inductores. Esta situación se ilustra en la figura 2.23

Esta realidad física es la que se aprovecha en la compensación del factor de potencia: instalar capacitores en paralelo con la carga eléctrica de tal manera que la potencia reactiva demandada por la carga sea suministrada, no por la red, sino por los capacitores.

Fasorialmente esto significa que Q_C resta o disminuye aquella potencia reactiva Q_L que la carga toma de la red. Ver figura 2.24

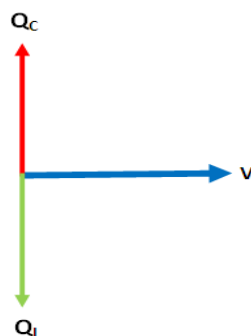


Figura 2.23: Potencia reactiva capacitiva y potencia reactiva inductiva

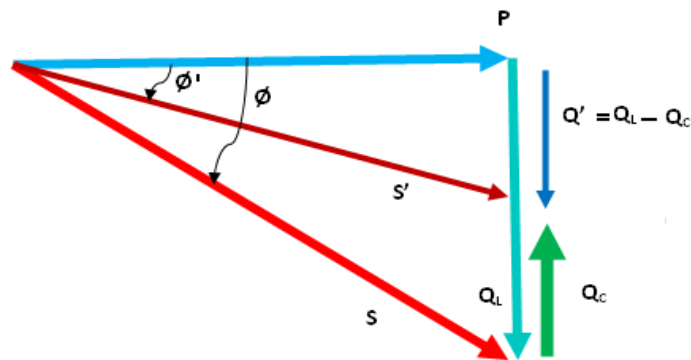


Figura 2.24: Diagrama fasorial de la compensación del factor de potencia.

Entonces, en términos prácticos, mediante la compensación la potencia reactiva inductiva demandada por la instalación es abastecida en su integridad o en gran parte por el capacitor y el restante, si lo hubiera, es suministrado por la red. Tal situación se ilustra en la figura 2.25. Se observa que la potencia activa y reactiva que demanda la carga no varía, es la misma antes y después de la compensación, lo que varía es la fuente de la energía reactiva: antes de la compensación, el íntegro de la energía reactiva es suministrada por la red, mientras que después de la compensación, las fuentes de energía reactiva son el capacitor y la fuente. Es decir que la compensación permite “aliviar” a la red por cuanto la cantidad de energía reactiva que cede es menor. Evidentemente, desde la perspectiva de la red, esta situación tiene su correlato en la disminución de la corriente total consumida por la carga.

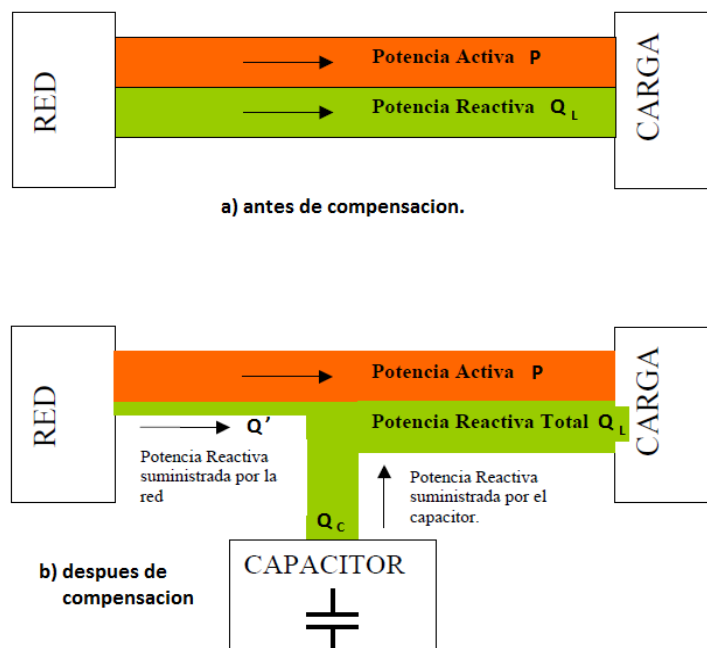


Figura 2.25: Potencias P y Q antes (a) y después (b) de la compensación. ([Leyden [10]])

2.2.8 TIPOS DE COMPENSACIÓN DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS

En función a la naturaleza de la potencia del banco de capacitores se observan los siguientes tipos:

- Compensación fija
- Compensación variable

En función de la ubicación del capacitor se distinguen los siguientes tipos:

- Compensación individual
- Compensación en grupo
- Compensación central

a) COMPENSACIÓN FIJA

Es aquella en la cual la potencia reactiva del capacitor es constante. Ver figura 2.26. Se utiliza cuando la demanda de potencia reactiva de la carga sea prácticamente constante, por ejemplo: motores, transformadores, etc. En instalaciones donde las demandas reactivas sean de poca fluctuación y donde exista la posibilidad de sobrecompensación instantánea, se recomienda instalar este tipo de compensación “siempre y cuando la potencia reactiva de la carga no supere el 15% de la potencia nominal del transformador” según recomienda Schneider [9].

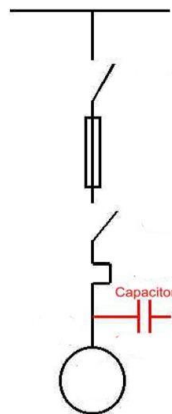


Figura 2.26: Esquema de compensación fija

b) COMPENSACIÓN VARIABLE

Es aquella en que la potencia reactiva del capacitor varía automáticamente y esta se suministra de acuerdo a las necesidades instantáneas de carga reactiva de la instalación que en las aplicaciones prácticas son generalmente variables. Se recomienda para demandas reactivas variables cuya potencia sea superior al 15% de la potencia nominal del transformador de servicio [2]. Se utilizan baterías automáticas de capacitores que están formadas por un regulador automático, los contactores y los capacitores propiamente dichos. El regulador electrónico detecta las variaciones de la demanda reactiva y en función de sus fluctuaciones, y de acuerdo a un algoritmo, actúa sobre los contactores permitiendo la entrada o salida

de los capacitores necesarios. Un esquema de la instalación se muestra en la figura 2.27

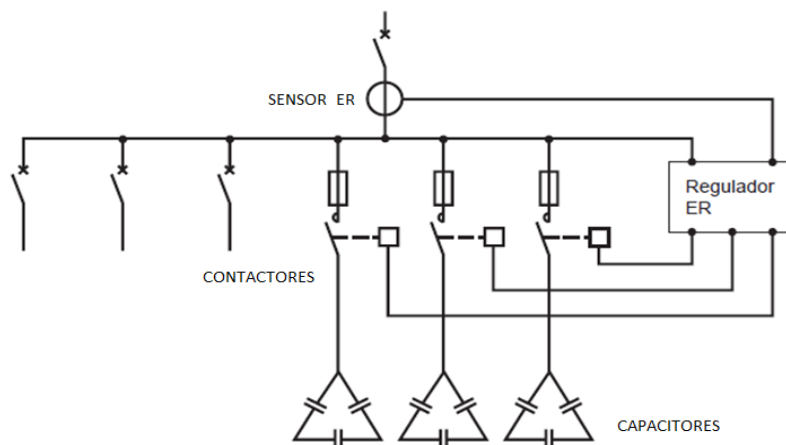


Figura 2.27: Esquema de compensación variable

c) COMPENSACIÓN INDIVIDUAL

La compensación individual se refiere a que cada consumidor de carga inductiva se le asigna un capacitor, por lo general del tipo fijo, que suministre potencia reactiva para su compensación. La compensación individual es empleada principalmente en equipos que tienen una operación continua y cuyo consumo de la carga inductiva es importante respecto de otras cargas de la misma instalación.

La capacitación individual presenta las siguientes ventajas:

- Los capacitores son instalados cerca de la carga inductiva, la potencia reactiva es confinada al segmento más pequeño posible de la red. El contactor del equipo puede también servir como un interruptor para el capacitor eliminando así el costo de un dispositivo de control para el capacitador solamente.
- El uso de un contactor proporciona control semiautomático para los capacitadores, por lo que no son necesarios controles complementarios.
- Los capacitadores son puestos en servicio solo cuando la carga está trabajando.
- Los conductores alimentadores quedan descargados de la corriente vinculada a la potencia reactiva.

No obstante, este método presenta las siguientes desventajas

- El costo de varios capacitadores por separado es mayor que el costo de un capacitador individual de valor de capacitancia equivalente.
- Existe subutilización para aquellos capacitadores que tienen una baja frecuencia de uso.

d) COMPENSACIÓN EN GRUPO

Es aconsejable compensar la potencia inductiva de un grupo de cargas, cuando estas se conectan simultáneamente y demandan potencia reactiva constante o bien cuando se tienen diversos grupos de cargas situados en puntos distintos.

La compensación en grupo presenta las siguientes ventajas:

- Se conforman grupos de carga de diferente potencia, pero con un tiempo de operación similar, para que la compensación se realice por medio de un capacitor común contando con su propio interruptor.
- El capacitor puede ser instalado en el centro de control de motores.
- El capacitor se utiliza únicamente cuando las cargas están en uso.
- Se reducen costo de inversión para la adquisición del capacitor.

En los conductores de los circuitos derivados se presenta la desventaja de que la potencia reactiva no se reduce, es decir, que seguirá circulando energía reactiva, de ser el caso, entre el centro de control de motores y los motores

e) COMPENSACIÓN CENTRAL

Este tipo de compensación ofrece una solución generalizada para corregir el factor de potencia ya que la potencia total del capacitor, que por lo general es del tipo automático, se instala en la acometida de la red de baja tensión o en el lado del secundario del transformador de bajada, cerca de los tableros de distribución de energía, los cuales suministran la potencia reactiva demandada por diversos equipos con diferentes potencias y tiempos de operación.

La compensación centralizada presenta las siguientes ventajas:

- Mejor utilización de la capacidad del capacitor.
- Se tiene una mejora en la regulación del voltaje en sistema eléctrico
- Suministro de potencia reactiva según los requerimientos actuales del sistema
- La desventaja de la compensación centralizada es que los conductores alimentadores y los conductores de los circuitos derivados no se descargan de la potencia reactiva significando que las pérdidas por efecto joule y las caídas de tensión aún permanecen.

La figura 2.28 muestra esquemáticamente los tipos de compensación en función de la ubicación del capacitor.

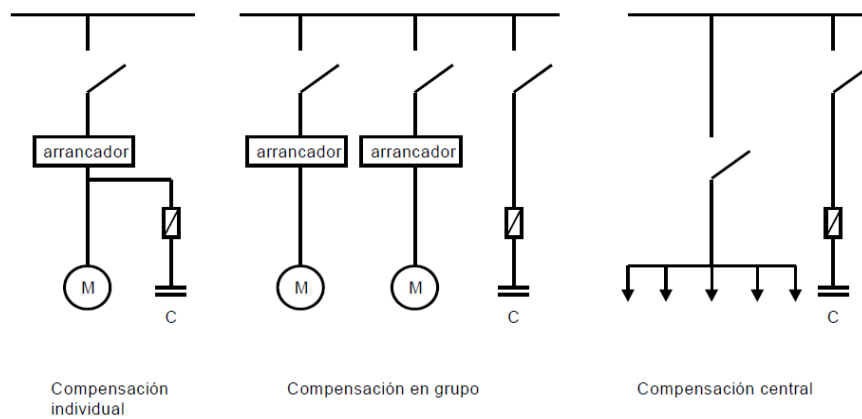


Figura 2.28: Tipos de compensación por ubicación del capacitor.

f) CONEXIÓN DE LOS BANCOS DE CAPACITORES

Para los circuitos monofásicos los bancos pueden ser instalados en serie o en paralelo o en combinaciones serie – paralelo.

Si se trata de bancos de capacitores para circuitos trifásicos, estos son arreglos de combinaciones serie – paralelo de capacitores que pueden adoptar las siguientes conexiones trifásicas clásicas:

- Delta.
- Estrella sólidamente aterrizada.
- Estrella con neutro flotante.

En el caso particular de motores eléctricos trifásicos de baja tensión se usa generalmente la conexión delta ya que no se presenta problemas de desbalance de carga y porque se puede confinar las corrientes de origen armónico [8]. Las conexiones pueden ser serie o paralelo. Ver figura 2.29

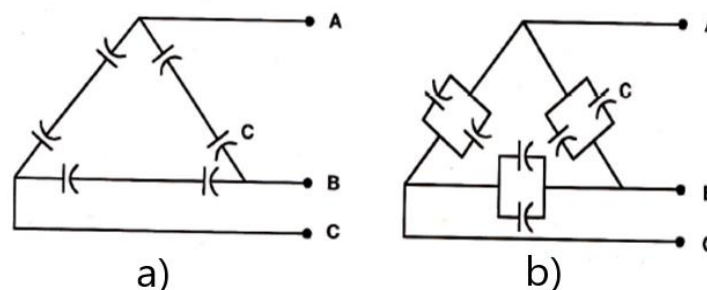


Figura 2.29: Tipos de conexión en delta: a) serie y b) paralelo

2.2.9 EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN ARMÓNICA SOBRE LOS CAPACITORES

a) LOS ARMÓNICOS Y SUS EFECTOS SOBRE LAS CARGAS ELÉCTRICAS

De acuerdo a Wildi [6], los armónicos son ondas sinusoidales de tensión o corriente que poseen frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia de la red. Al sumarse a la onda fundamental de tensión o corriente, los armónicos ocasionan la presentación de ondas distorsionadas. Sin embargo, una onda distorsionada puede ser descompuesta en una suma de la señal de frecuencia fundamental y de todas las armónicas presentes. Las frecuencias a las que se presentan los diferentes armónicos y sus magnitudes correspondientes se presentan en el llamado espectro armónico. Ver figura 2.30

La mayor o menor presencia de armónicos en la red se denomina distorsión armónica y se cuantifica mediante la distorsión armónica total (THD) que es la relación entre el contenido armónico de la señal y el valor eficaz de la primera armónica o armónica fundamental. Así en el caso de la tensión la distorsión armónica total THD_V se define por la ecuación:

$$THD_V = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots}}{V_1} \times 100\% \quad [2.47]$$

Donde:

V_2, V_3, V_4, \dots son los valores eficaces del 2°, 3°, 4°... armónico respectivamente.

V_1 es el valor eficaz de la componente fundamental de tensión.

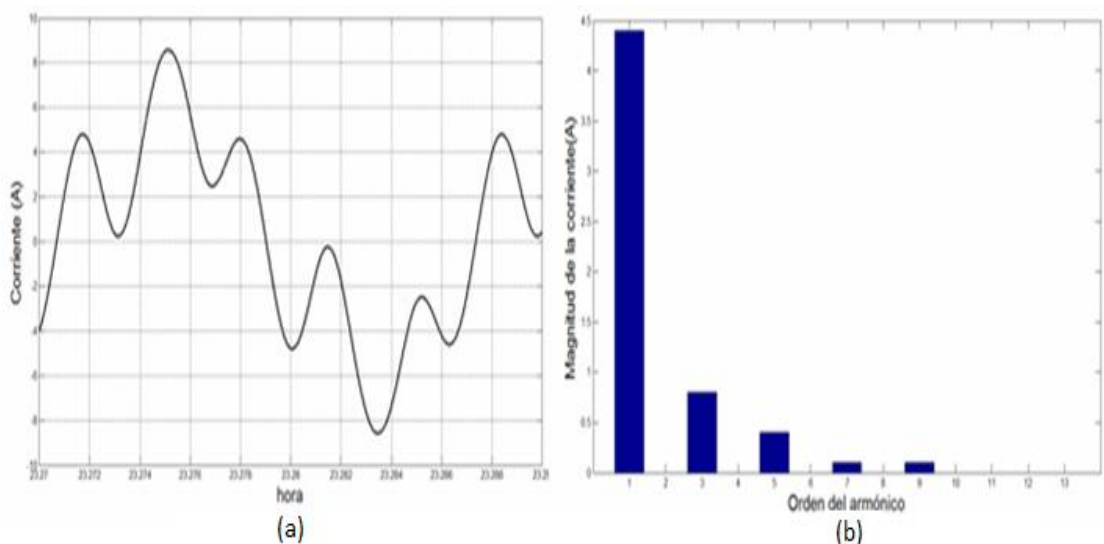


Figura 2.30: Onda corriente distorsionada (a) y su respectivo espectro armónico (b)

Cuando se trata con armónicos de corriente, la distorsión armónica total THD_I se define por la siguiente ecuación:

$$THD_I = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots}}{I_1} \times 100\% \quad [2.48]$$

Donde:

I_2, I_3, I_4, \dots son los valores eficaces del 2°, 3°, 4°... armónico respectivamente.

I_1 es el valor eficaz de la componente fundamental de corriente

Las fuentes emisoras de armónicos se pueden ubicar en tres categorías diferentes:

- Dispositivos electrónicos de potencia
- Dispositivos productores de arcos eléctricos
- Dispositivos ferromagnéticos

En el ámbito industrial los equipos que producen armónicos son:

- Variadores de velocidad para motores CA y CC que utilizan electrónica de potencia.
- Inversores de frecuencia
- Equipo electrónico y computadoras
- Hornos de inducción
- Equipos de soldadura
- Transformadores

Las corrientes armónicas excesivas contribuyen a elevar el valor RMS de la corriente en los diferentes circuitos y deterioran la calidad de la tensión de alimentación lo cual puede causar daño en los equipos e interrumpir el funcionamiento normal de los diferentes dispositivos de protección. En el caso particular de los capacitores, una contaminación armónica excesiva origina pérdidas por calentamiento, degradación del dieléctrico, reducción de la posibilidad de utilización a plena carga, desgaste mecánico, vibraciones y molestias acústicas.

b) RESONANCIA

Dentro de una instalación que ya presenta contaminación armónica, el problema más grave que se puede originar debido a la instalación de capacitores para la corrección del factor de potencia es el de la posibilidad de establecer resonancia ya sea en paralelo o en serie.

En los circuitos simplificados de la figura 2.31, que representan circuitos más complejos, en los cuales se muestra la reactancia equivalente del sistema como la reactancia capacitiva de los capacitores instalados para la corrección del factor de potencia, si se aumenta el valor de la frecuencia de excitación, la reactancia inductiva del circuito equivalente del sistema aumenta, mientras que la reactancia

capacitiva del capacitor disminuye. Así, se encontrará al menos una frecuencia en la que las reactancias sean iguales, provocando la resonancia. Según señala Boylestad [11], cuando el factor de calidad del inductor (la relación de la reactancia respecto de la resistencia propia del inductor) es superior a 10, la frecuencia de resonancia para un circuito serie f_s y para un circuito paralelo f_p (en ciclos/seg.) tienen la misma expresión que es la siguiente:

$$f_s = f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad [2.49]$$

Donde:

L = inductancia de la bobina, Henrios

C = capacitancia del capacitor, Faradios

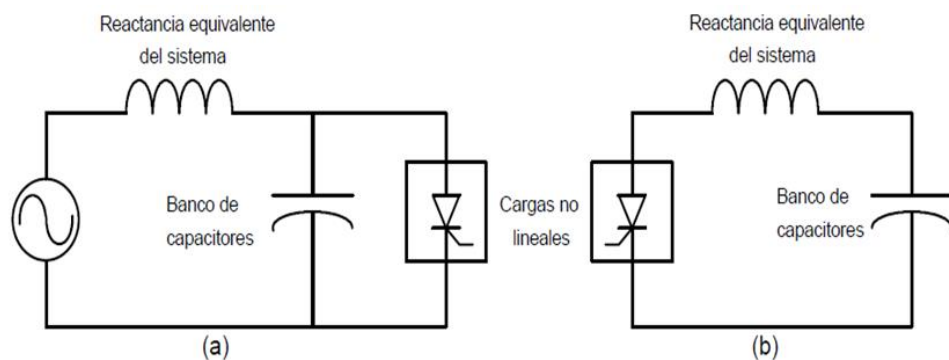


Figura 2.31: Circuitos simplificados (a) resonancia paralelo y (b) resonancia serie

La resonancia produce una amplificación de la distorsión armónica presente, tanto en corriente como en voltaje de la instalación, causando, además, un incremento del esfuerzo dieléctrico y produciendo calentamiento dentro del capacitor. De igual manera, el voltaje pico que se presenta podría causar una descarga parcial dentro del dieléctrico del capacitor provocando un corto circuito y la falla del capacitor. Ante la posibilidad de establecimiento de resonancia en un circuito dado se recomienda la instalación de filtros para armónicos

c) FILTROS PARA ARMÓNICOS

Es posible la reducción (o eliminación) de los armónicos en las redes eléctricas mediante sistemas de filtrado. Existen tres tipos de filtros:

Filtros Pasivos: Consiste en la instalación de una inductancia anti armónicos en serie con el capacitor de forma tal que se forme un circuito LC en paralelo con la fuente armónica como se muestra en la figura 2.32. El circuito LC se sintoniza con el valor armónico que se desea a filtrar absorbiéndolo e impidiéndole que circulen por la red eléctrica restante.

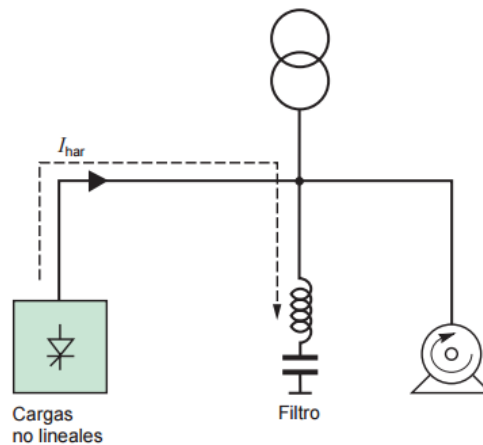


Figura 2.32: Principio de funcionamiento del filtro pasivo. (Schneider [2])

Filtros Activos: Los filtros activos se basan en la tecnología de electrónica de potencia. Usualmente se instalan en paralelo a las cargas no lineales según se ilustra en la figura 2.33. Estos filtros analizan permanentemente los armónicos generados por las cargas no lineales e inyectan la misma corriente, desfasada 180°, a la red. De esta manera, las corrientes armónicas quedan neutralizadas. Una ventaja de los filtros activos es que, si hay una modificación de la instalación, estos dispositivos garantizan una compensación de armónicos eficaz.

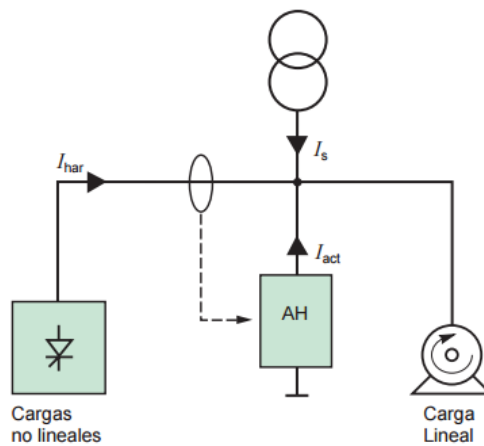


Figura 2.33: Principio de funcionamiento del filtro activo. (Schneider [2])

Filtros Híbridos: Este tipo de filtro combina las ventajas de los filtros activos y pasivos y abarca una amplia gama de niveles de potencia y rendimiento. Se puede filtrar una frecuencia mediante un filtro pasivo y un filtro activo filtra todas las demás frecuencias. Ver figura 2.34

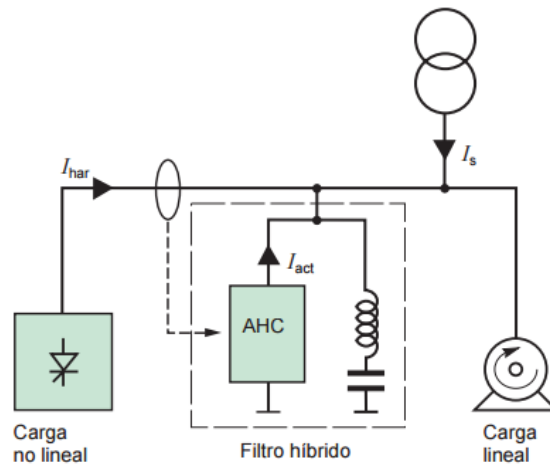


Figura 2.34: Principio de funcionamiento del filtro híbrido. (Schneider [2])

La utilización de los sistemas de filtros se establece en función de la contaminación armónica de la instalación. Así, el fabricante Schneider [2] recomienda la implementación de los sistemas según la siguiente tabla:

Contaminación Armónica	Solución recomendada por Schneider
$THD_V < 1.5 \%$	Uso de capacitores estándar considerando la tensión nominal de los capacitores igual a la tensión de red.
$1.5 \% < THD_V < 6\%$	Uso de inductancias anti armónicas (filtros pasivos) que provocan el desplazamiento de la resonancia paralelo fuera del espectro armónico.
$THD_V > 6\%$	Uso de filtro pasivos de rechazo acompañados de filtro activos para reducir la THD_V a valores menores a 3 %

Tabla 2.2: Utilización de filtros en función de contaminación armónica. (Schneider [2])

El fabricante Schneider considera que en lo que respecta a sistemas con baja contaminación armónica ($THD_V < 1.5 \%$) las tolerancias de sobrecorriente (entre 30 y 50 %) y de sobretensión (entre 10 y 20 %), que por normativa deben tener los capacitores, se consideran suficientes para un funcionamiento satisfactorio.

2.2.10 LA COMPENSACIÓN DE LOS MOTORES ELÉCTRICOS

Tal y conforme se recalcó anteriormente, al ser el motor de inducción una máquina electromagnética, necesariamente para su operación necesita el establecimiento de campos magnéticos implementados mediante bobinados en el estator y, en el caso de rotor bobinado, también en el rotor. Por lo tanto, en cualquier condición de operación, la máquina demandará energía reactiva y por lo tanto habrá una componente reactiva

de la corriente total consumida. La cantidad de energía reactiva demandada por el motor y, por lo tanto, su factor de potencia depende de la condición de operación. En condiciones nominales, el factor de potencia de un motor asíncrono suele variar entre 0.80 a 0.85 inductivo lo que significa que la relación de potencia reactiva a potencia activa, Q/P , varía entre 0.65 a 0.75. Un motor operando en condiciones de bajo factor de carga presenta valores bajos del factor de potencia por lo cual la relación de Q/P se incrementa, tal como se puede apreciar en la curva de factor de potencia versus factor de carga de las figuras 2.14 y 2.15. Cuando, en una instalación industrial, un motor es relativamente grande en términos de potencia eléctrica, el consumo de reactiva es grande y será necesario una compensación de la máquina.

En términos sucintos, la compensación de un motor eléctrico trifásico asíncrono consiste en la inserción en paralelo de un capacitor por cada fase estática del mismo, de tal manera que permita que la energía reactiva de tipo inductivo que necesitan las bobinas del motor sea suministrada por el capacitor.

Por lo tanto, el circuito equivalente por fase del motor queda representado esquemáticamente por la figura No. 2.35

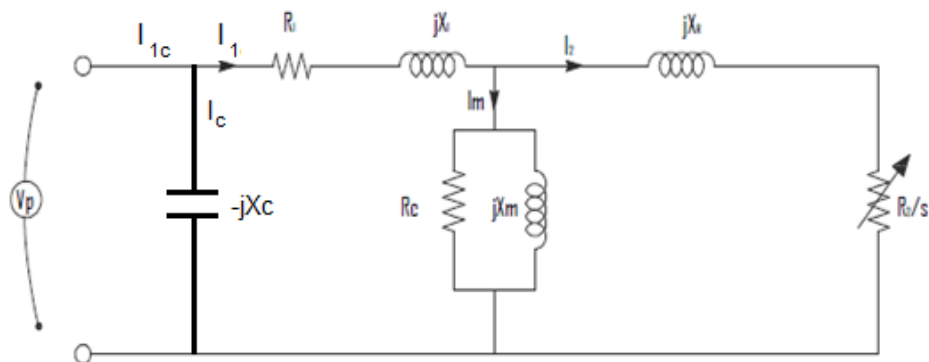


Figura 2.35: Circuito equivalente por fase del motor asíncrono con capacitor en paralelo.

El problema en dimensionar el tamaño del condensador resolviendo este circuito es que no se conoce con exactitud el valor del deslizamiento que debe considerarse para efectuar el cálculo.

Respecto a la compensación de motores, Schneider [2] y [9] señala que, en las aplicaciones prácticas, para motores eléctricos y transformadores “es recomendable usar la compensación fija dejando la compensación automática para la compensación global en la cabecera de la instalación”.

Con respecto a la ubicación de los capacitores, señala Leyden [12], que, para la compensación fija y directa de motores pequeños y medianos, estos pueden ser ubicados en las posiciones que se muestran en la figura 2.36. En las posiciones a) y b) estos son maniobrados conjuntamente con el motor y entrarán en operación cuando

se cierre el arrancador o contactor del circuito derivado. En la posición (c) el capacitor está conectado permanentemente al circuito de alimentación.

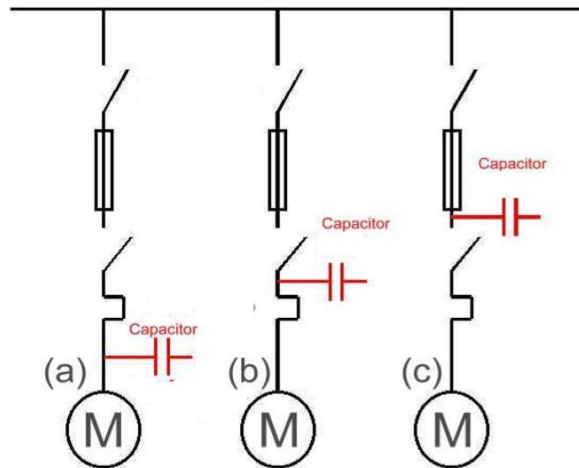


Figura 2.36: Ubicaciones del capacitor para motores pequeños y medianos.

Según Leyden “la mejor y más ventajosa ubicación son las posiciones a) o b): en ambos casos el motor y el capacitor son maniobrados como unidad por el elemento de maniobra del motor, en consecuencia, el capacitor esta siempre en servicio cuando el motor está en operación constituyendo una compensación automática”

El problema de la ubicación a) es que afecta el valor de la corriente que pasa por el protector térmico, por lo cual este tiene que ser redimensionado para las nuevas condiciones de operación a las que conduce la presencia del capacitor. La ubicación b) es la más recomendable para instalaciones existentes por cuanto no afecta la corriente que pasa a través del protector de sobrecarga el cual ha sido dimensionado a partir de la corriente nominal del motor. En estas dos posiciones mencionadas se debe tener en cuenta el efecto de las corrientes de inserción en la protección magnética del circuito durante el arranque: valores altos de la corriente total puede ocasionar el disparo de la protección.

Con respecto a la ubicación c), según Leyden, se emplea cuando los capacitores están permanentemente conectados al sistema. Su ventaja es la eliminación del elemento de maniobra para los capacitores, pero el principal problema es el riesgo de sobrecompensación que puede producir cuando el motor no se encuentra en operación.

En cualquiera de las tres ubicaciones mencionadas a), b) y c), la protección por máxima intensidad se encuentra aguas arriba del motor y del capacitor por la tanto, provisto que la compensación significa una disminución de la corriente de línea total, tal protección deberá ser ajustada al nuevo valor de corriente. El valor de la reducción de la corriente total estará dado por:

$$\text{Factor de reduccion} = \frac{\text{Cos } \varphi \text{ antes de la compensacion}}{\text{Cos } \varphi \text{ despues de la compensacion}} \quad [2.50]$$

Con respecto a la ubicación del capacitor, señala Schneider [2], que en general, para motores de baja potencia, con arranque directo o que incorporen freno automático donde se minimice el riesgo de autoexcitación, el capacitor se conecta directamente a bornes del motor tal como lo muestra el esquema de compensación general mostrado en la figura 2.37

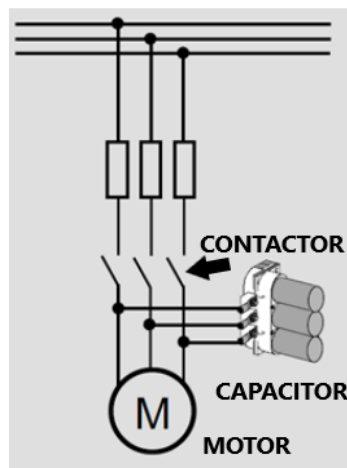


Figura 2.37: Compensación fija de un motor

Para motores con arranque a tensión reducida por autotransformador o por conexión estrella – triángulo, se deben tomar previsiones especiales para garantizar que, cuando cierre el contacto principal, el capacitor se encuentre completamente descargado; esto se logra mediante un temporizador adicional que impide un arranque posterior a la desconexión antes del tiempo establecido.

Para motores en los que exista el riesgo de autoexcitación o motores de mayor tamaño, la ubicación del capacitor dentro del circuito responde a otras consideraciones que serán mencionadas posteriormente.

2.2.11 PROBLEMAS ASOCIADOS CON LA COMPENSACIÓN DE MOTORES ELECTRICOS

Los problemas técnicos más importantes asociados con la compensación de motores eléctrico son los siguientes:

a) CORRIENTES DE INSERCIÓN

Durante la conexión del conjunto motor –capacitor se producen una corriente transitoria de alta frecuencia que puede llegar a ser decenas de veces el valor de la corriente nominal del circuito derivado de alimentación, la cual puede dañar los contactos principales del contactor principal (Ver figura 2.38). Por esta razón, para limitar la corriente de inserción, los contactores que se usan para la compensación

de la potencia reactiva son especiales, incorporando una resistencia en paralelo con cada polo principal y en serie con un contacto de precierre. Según Schneider [2] “esta asociación permite limitar la corriente de cierre a un valor de 80 veces la corriente nominal como máximo.” La norma a la que responden los contactores para este tipo de aplicación es la IEC 60947- 4/5.

En el caso de una compensación fija con conexión directa, se puede utilizar el contactor existente y, para limitar las corrientes de inserción, se puede optar por reactancias de choque colocadas en la alimentación del capacitor. Ver figura 2.38

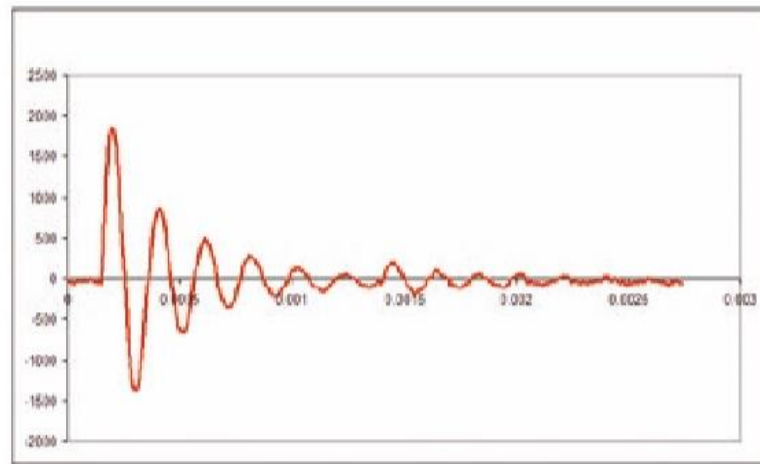


Figura 2.38: Comportamiento típico de la corriente de inserción (inrush) en capacitores.

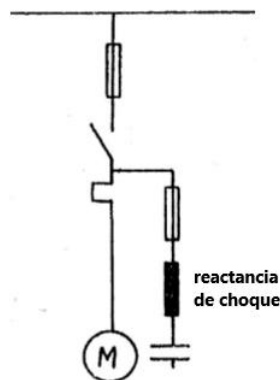


Figura 2.39: Reactancia de choque para limitar corrientes de inserción.

b) SOBRECENSACIÓN

La sobrecompensación ocurre cuando la potencia reactiva del banco de capacitores Q_C excede la potencia reactiva inductiva actual del motor Q_L , claramente el factor de potencia de la instalación pasa a ser positivo o en adelante.

La sobrecompensación puede causar elevaciones de tensión en el secundario del transformador que atiende a la carga, lo cual puede reducir la vida útil de los equipos conectados a tal transformador. La sobretensión permanente acorta la vida útil de los capacitores: se estima que una sobretensión permanente del 10 % encima de la tensión nominal reduce la expectativa de vida del capacitor a la mitad [9].

Por tal razón los fabricantes recomiendan que la tensión nominal del capacitor debe ser mayor o igual a la tensión real de servicio medida con los capacitores conectados.

c) AUTOEXCITACIÓN

Es aquella condición en la cual, luego de producida la desconexión eléctrica de un motor compensado, este pasa a trabajar, por un instante cuando el motor aun gira y mientras se descargan los capacitores, como si fuera un generador asíncrono ocasionando una elevación en la tensión en terminales del motor que puede dañar a los mismos capacitores.

Cuando un motor acciona una carga de gran inercia, el motor sigue girando después de cortarle la alimentación (a no ser que se le frene deliberadamente) debido a la inercia de la carga. En este caso, la inercia del campo magnético del rotor inducirá una fuerza electromotriz en los devanados estatòricos, durante un corto periodo de tiempo después de la desconexión que se extinguirá después de 1 o 2 ciclos en el caso de motor sin compensación [12]. Si el motor estuviera compensado, los capacitores, instalados en paralelo con las bobinas estatòricas, cierran el circuito eléctrico de estas, provocando corrientes capacitivas en estas bobinas que a su vez producirán un campo magnético giratorio en la misma dirección que el campo magnético decreciente; lo cual significara que, por un instante, el flujo magnético del rotor se eleve, las corrientes estatòricas también y de igual manera la tensión en terminales del motor.

El fenómeno de la autoexcitación puede evitarse limitando la potencia de los capacitores fijos instalados en bornes del motor, de tal manera que la intensidad reactiva suministrada sea inferior a la necesaria para provocarla, haciendo que el valor de la intensidad de los condensadores sea inferior al valor de la intensidad en vacío del motor. Leyden [12] recomienda que, para motores de hasta 10 KW de potencia nominal, la potencia capacitiva del banco sea como máximo del 70 al 75 % de la potencia reactiva inductiva absorbida por el banco en marcha en vacío. Para potencias mayores de dicho valor puede llegar a ser del 80 al 85 % de la potencia inductiva, mientras que si se conoce la característica de vacío del motor se puede compensar con valores del 90 % o más si se conoce la tolerancia de esa curva y la tolerancia del capacitor.

En la práctica la velocidad del motor decrece rápidamente luego de ser desconectado de la red, por lo que el voltaje también decrece rápidamente; señala

Leyden que: un 15 a 20 % de reducción de velocidad elimina suficientemente la autoexcitación para que el voltaje disminuya drásticamente en unos segundos.

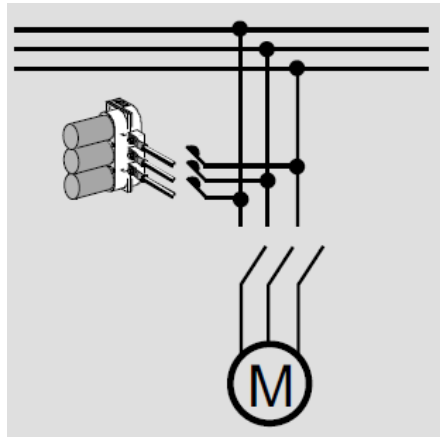


Figura 2.40: Compensación fija con contactores (obsérvese el contactor del capacitor)

Otra manera de evitar el problema de la autoexcitación es usando el arreglo de compensación fija con contactores que se muestra en la figura 2.40 en el cual se observa que el capacitor se conecta aguas arriba del arrancador del motor. En este arreglo los contactores del capacitor se hallan enclavados con el contactor del motor. La desconexión de ambos equipos debe ocurrir en simultáneo para evitar la autoexcitación. Esta disposición también se recomienda para motores grandes en instalaciones ya existentes, puesto que las corrientes de inserción no afectan la alimentación del motor y no hay necesidad de redimensionar ni a protección ni el cableado del circuito.

d) CONTAMINACIÓN ARMÓNICA

La contaminación armónica es la distorsión de la forma de onda sinusoidal que experimentan tanto la tensión como la corriente. En un sistema eléctrico, la contaminación armónica es producto de las cargas no - lineales presentes. Según Schneider [2], en los motores de inducción, la contaminación armónica ocasiona los siguientes problemas:

- Pérdidas y calentamientos adicionales.
- Reducción de las posibilidades de utilización a plena carga.
- Vibraciones y desgaste mecánico.
- Molestias acústicas.

Estos problemas se acentúan ante una posibilidad de resonancia que significan la amplificación del valor RMS de la corriente.

e) TIPO DE ARRANCADOR

Si el motor arranca con ayuda de algún dispositivo especial, tal como resistencias, inductancias, conexiones estrella - triángulo o auto transformadores, es recomendable que la conexión de los capacitores sea temporizada de tal manera que ocurra después de que el motor haya arrancado. Por esta razón, la compensación fija utilizará capacitores accionados por contactores. Con respecto a la posición del capacitor, Schneider [2] recomienda que se efectúe aguas arriba de los dispositivos de protección y mando del motor tal como se ilustra en la figura 2.40, debiendo tener cuidado en enclavar el contactor con los dispositivos mencionados de tal manera que cuando el motor sea, o bien desconectado o bien provocada la apertura de su dispositivo de protección, el capacitor también quede fuera de servicio.

2.2.12 CÁLCULO DE POTENCIA REACTIVA DE CAPACITORES PARA MOTORES ELÉCTRICOS

Los fabricantes y las normas muestran una uniformidad relativa en las recomendaciones respecto del cálculo de la potencia reactiva del capacitor. Así Schneider [2] y [9], para eliminar la posibilidad de autoexcitación en la compensación con capacitores sin contactores propios, recomienda limitar la potencia del banco al 90 % de la potencia aparente consumida durante la operación en vacío.

De esta manera, siguiendo las recomendaciones de Schneider, el valor máximo de potencia reactiva a instalar se calcula de la siguiente forma:

$$Q_c \leq 0.9 \times I_0 \times V_n \times \sqrt{3} \quad [2.51]$$

Donde:

Q_c = potencia reactiva, fija máxima a instalar (VAr).

I_0 = intensidad de vacío del motor (A)

V_n = tensión nominal (V).

Puesto que en la práctica es difícil disponer en campo del valor real de I_0 , en otro texto Schneider [13] recomienda aplicar la siguiente fórmula para determinar la potencia del capacitor a partir de datos que son disponibles en la placa del motor:

$$Q_c \leq 0.9 \sqrt{3} V_n I_n \frac{1 - \cos \varphi_n}{\sqrt{1 - (\cos \varphi_n)^2}} \quad [2.52]$$

Donde:

$\cos \varphi_n$ = factor de potencia nominal

I_n = intensidad nominal del motor (A)

Por otro lado, Schneider [2] ha publicado la tabla del Anexo 1 en la que se listan la potencia reactiva del banco de capacitores a instalar para motores de diferentes potencias y velocidades.

Por otro lado, WEG [1] recomienda la siguiente fórmula para el cálculo de la potencia reactiva del banco aun con cargas parciales:

$$Q_c = \frac{(\% \text{ de carga})(P)(F)}{n} \quad [2.53]$$

Donde:

Q_c = potencia reactiva, fija, máxima a instalar (KVAr).

$\%$ de carga = porcentaje de carga

P = potencia activa del motor al $\%$ de carga considerado (KW).

F = factor que depende de los factores de potencia. Ver Anexo 2

n = eficiencia del motor al $\%$ de carga considerado.

Por otro lado, en lo que respecta a normativa peruana, el Código Nacional de Electricidad [14], respecto a la compensación individual de motores eléctricos, dice: “la capacidad total en KVAr de los capacitores que estén conectados en el lado de carga del dispositivo de control de un motor no deberá ser superior al 90 % del valor necesario para elevar el factor de potencia del motor, en caso de funcionamiento en vacío, hasta la unidad”.

2.2.13 PROTECCIÓN Y CABLEADO DE LOS CIRCUITOS DERIVADOS PARA CAPACITORES

El cableado y la protección del circuito derivado para la alimentación de los capacitores para la corrección del factor de potencia depende la magnitud de la corriente del circuito, la cual, a su vez, está en función de la tensión aplicada, las componentes armónicas y la potencia del capacitor.

La corriente nominal del circuito es la corriente nominal del capacitor I_{nom} y se calcula según la siguiente ecuación:

$$I_{nom} = \frac{Q_c}{V_{nom}\sqrt{3}} \quad [2.54]$$

Donde:

Q_c = potencia reactiva del capacitor (VAr).

V_{nom} = tensión nominal (voltios)

La sobretensión admisible a la frecuencia fundamental, los componentes armónicos y las tolerancias de fabricación de la potencia del capacitor pueden provocar un aumento de la corriente de hasta el 50% respecto del valor nominal. Así, el Código Nacional de Electricidad en el inciso 5.6.3.3, para tensiones menores a 600 voltios, recomienda que, con respecto al cableado, la capacidad de los conductores no deberá ser menor a 135 % de la corriente nominal de capacitor. En esa misma línea, Schneider [2] recomienda que los cables de potencia se deberán sobredimensionar para una corriente de 1.5 veces el valor de la corriente nominal como mínimo.

Con respecto a la protección del circuito, el Código Nacional de Electricidad recomienda que el ajuste del dispositivo de protección contra cortocircuito deberá ser el 165 % de la capacidad nominal del capacitor, mientras que el medio de desconexión debe tener una capacidad nominal no inferior al 135 % de la corriente nominal de capacitor. Mientras que el fabricante Schneider recomienda que los interruptores automáticos de protección sean elegidos de manera tal que el reglaje de la protección térmica se calibre a un valor de 1.36 veces la corriente nominal del capacitor y el reglaje de las protecciones de cortocircuito (magnéticas) permita el paso de los transitorios de conexión hasta un valor de 10 veces la corriente nominal. En el caso de protección mediante fusibles, el mismo Schneider recomienda que se deben usar fusibles de alto poder de ruptura del tipo Gg de 1.6 veces la corriente nominal para los equipos estándar.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

La contrastación de la hipótesis del presente trabajo de investigación se hizo mediante el análisis gráfico de las curvas características de un motor particular. Las curvas se levantaron mediante un programa de computadora utilizando el software MATLAB, el cual fue elaborado por el autor del presente trabajo siguiendo lineamientos recomendados por Morales [15].

El programa incorpora las fórmulas derivadas del circuito equivalente por fase aproximado de un motor de inducción seleccionado, el cual permitió levantar las curvas características antes y después de la instalación del capacitor. Este capacitor fue seleccionado y dimensionado a partir de la información que arrojaron las curvas.

La secuencia seguida para la contrastación fue la siguiente:

1. Selección de un motor tipo.
2. Levantamiento de las curvas características del motor antes de la compensación.
3. Selección de la potencia reactiva del capacitor trifásico
4. Levantamiento de las curvas de factor de potencia y potencia reactiva de la instalación después de la compensación.
5. Contrastación contra los cálculos empíricos recomendada por los fabricantes de capacitores y usados ampliamente en la ingeniería práctica.

Coherente con esta secuencia es el flujo de información utilizado en la investigación, el cual se muestra en la siguiente figura 3.1

El autor deja constancia que queda pendiente la validación experimental de la hipótesis del empleo del circuito equivalente como una herramienta en la selección de capacitores. Tal validación deberá llevarse a cabo en un laboratorio debidamente equipado con un motor trifásico de pequeña potencia necesariamente.

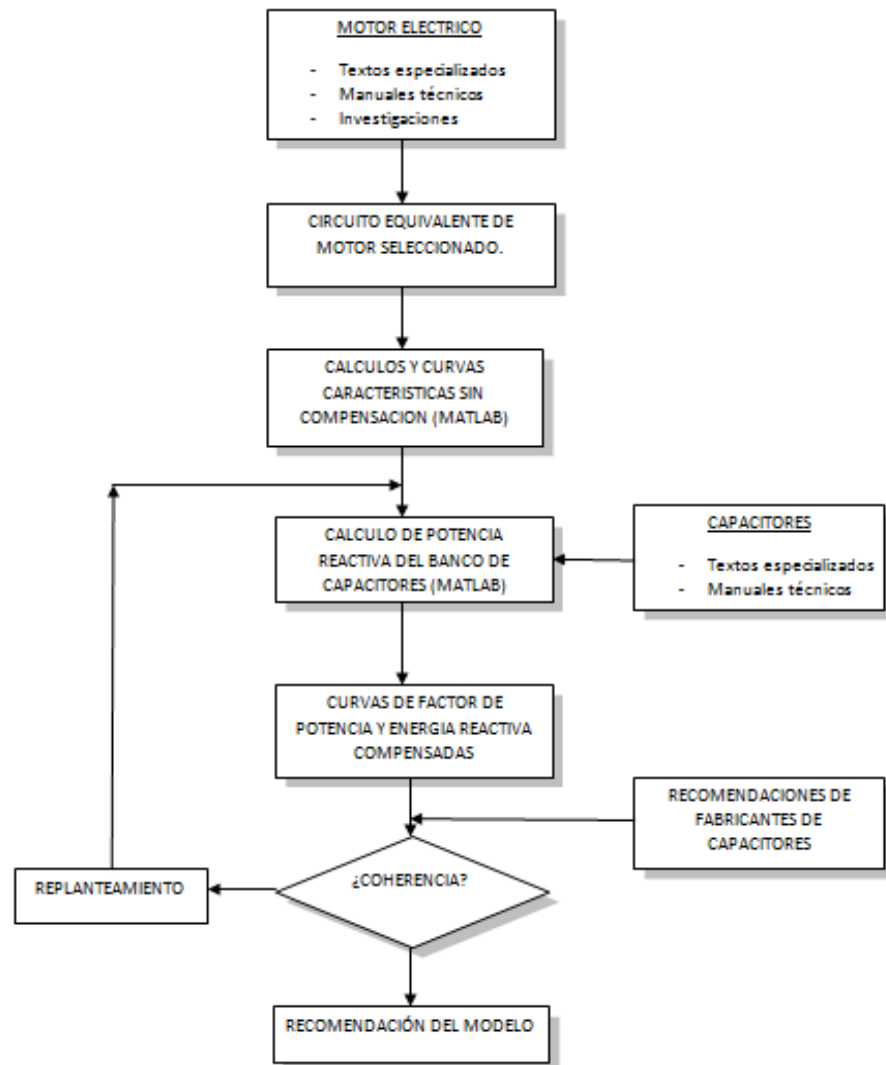


Figura 3.1: Flujograma de la contratación de la hipótesis.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 CARACTERÍSTICAS DEL MOTOR SELECCIONADO

Puesto que la compensación individual de un motor de inducción encuentra viabilidad económica cuando el motor es de mediana a gran potencia, el motor seleccionado para el análisis gráfico necesariamente debió ser un motor dentro de tal rango. Aunque los programas desarrollados en MATLAB (que se adjuntan en los anexos 3 y 4) pueden ser corridos para cualquier tamaño de motor, en particular, para este trabajo, se escogió de Chapman [4] un motor trifásico de las siguientes características nominales:

POTENCIA	100	hp
VOLTAJE DE LINEA	440	VAC
FRECUENCIA	50	Hz.
POLOS	6	
CONEXIÓN	ESTRELLA	
CLASE NEMA	B	
VELOC. NOMINAL	965	RPM

Tabla No. 4.1: Datos nominales de motor eléctrico seleccionado

La información de su circuito equivalente por fase aparece en la tabla siguiente

Resistencia estatórica, R_1	0.084	Ω
Reactancia estatórica, X_1	0.2	Ω
Reactancia de magnetización, X_m	6.9	Ω
Resistencia rotórica, R_2	0.066	Ω
Reactancia rotórica, X_2	0.165	Ω
Pérdidas rotacionales, P_{rot}	2.62	Kw

Tabla No. 4.2: Impedancias de circuito equivalente de motor eléctrico seleccionado.

Se hace hincapié que, aunque la frecuencia del motor seleccionado difiera de la frecuencia eléctrica del sistema eléctrico peruano (60 Hz.), el autor considera que ello no afecta las conclusiones a las que se llega en el presente estudio.

La representación gráfica del circuito equivalente por fase aparece en la figura siguiente:

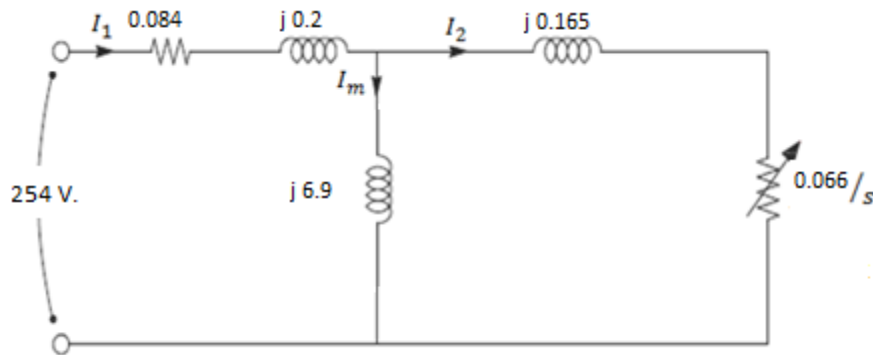


Figura 4.1: Circuito Equivalente por fase – Motor 100 hp.

4.2 CURVAS CARACTERÍSTICAS ANTES DE LA COMPENSACIÓN

Las figuras desde la 4.2 hasta la 4.8 corresponden a resultados de correr el programa MATLAB, el cual se adjunta en el Anexo 3, con los valores de las impedancias del circuito equivalente dados en la Tabla 4.2. Como se puede observar las diferentes curvas toman la forma esperada de acuerdo a la literatura técnica. En la figura 4.2 se aprecia que el par de arranque bruto es de unos 770 N – m y el par máximo bruto es de unos 1,950 N – m. Asimismo, es interesante observar en la figura 4.4 que durante el arranque y durante la aceleración del motor, la potencia reactiva que se absorbe es mayor que la potencia activa, situación que se revierte cuando la unidad presenta deslizamientos menores (en este caso para deslizamientos menores a 20%)

Asimismo, en la figura 4.5 (elaborada para presentar las corrientes del motor cuando el deslizamiento es menor al 10%) se observa que, cuando el motor opera en vacío, casi la totalidad de la corriente absorbida es de naturaleza reactiva puesto que, al no haber carga mecánica, la poca corriente activa que se consume se utiliza en compensar las pérdidas rotacionales de la unidad. Además, se aprecia que el comportamiento de la corriente reactiva experimenta poca variación con respecto a la velocidad del motor en la zona de operación, es decir a velocidades mayores que la velocidad nominal.

Las figuras 4.6 y 4.7 nos muestran el comportamiento típico del motor en lo que respecta a la eficiencia y el factor de potencia con los valores máximos en la zona de bajos deslizamientos con valores de velocidad muy cercanos a la velocidad nominal del motor.

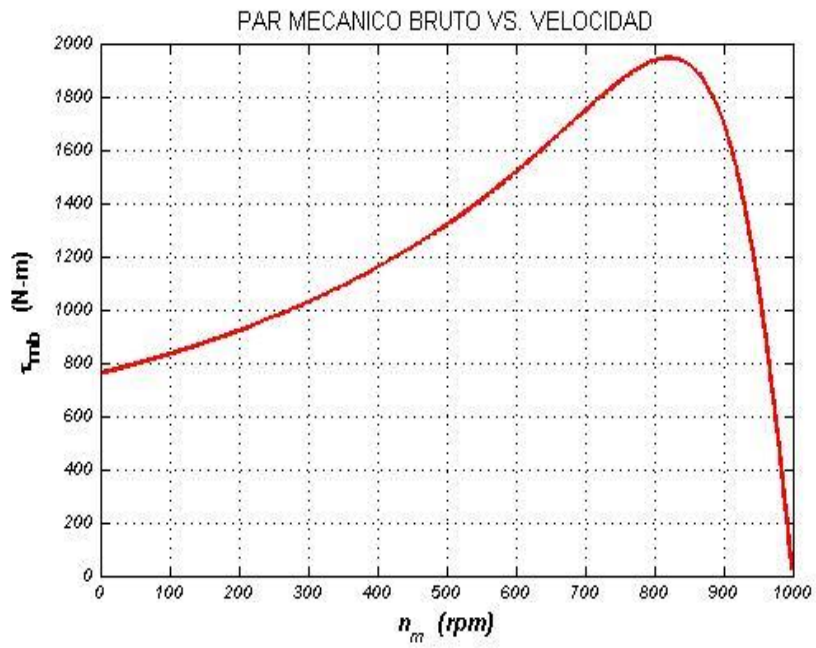


Figura 4.2: Curva Par Mecánico Bruto vs. Velocidad - Motor 100 hp.

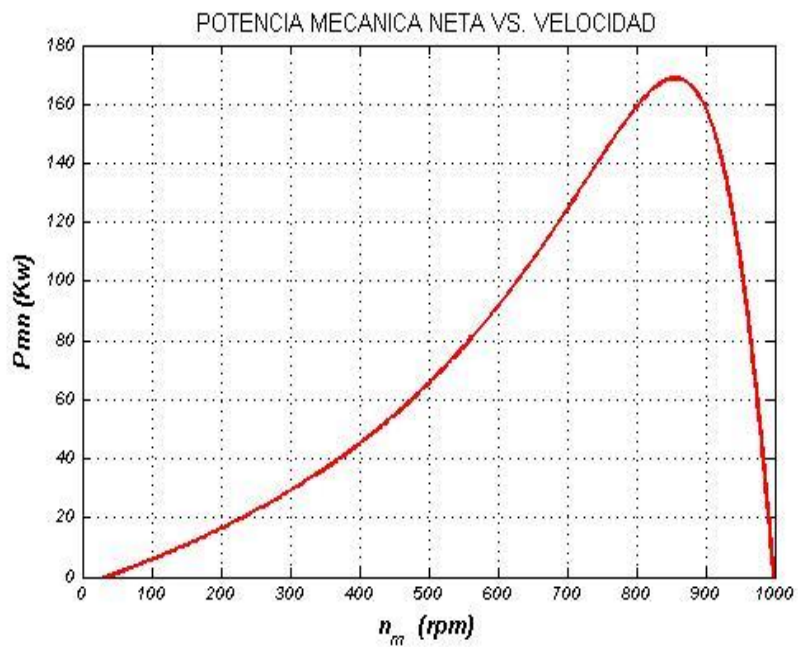


Figura 4.3: Curva Potencia Mecánica Neta (o útil) vs. Velocidad – Motor 100 hp.

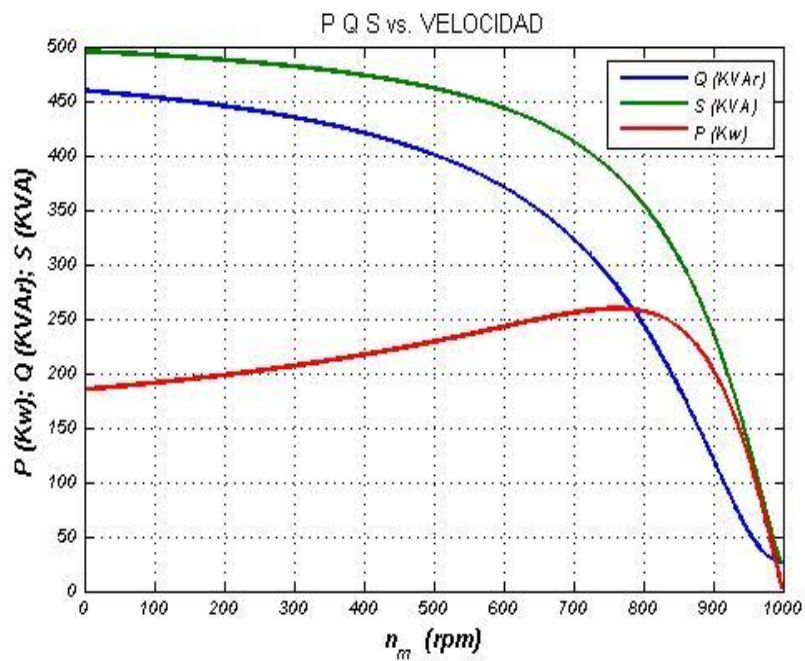


Figura 4.4: Potencias eléctricas: activa P , reactiva Q y aparente S vs. Velocidad – Motor 100 hp

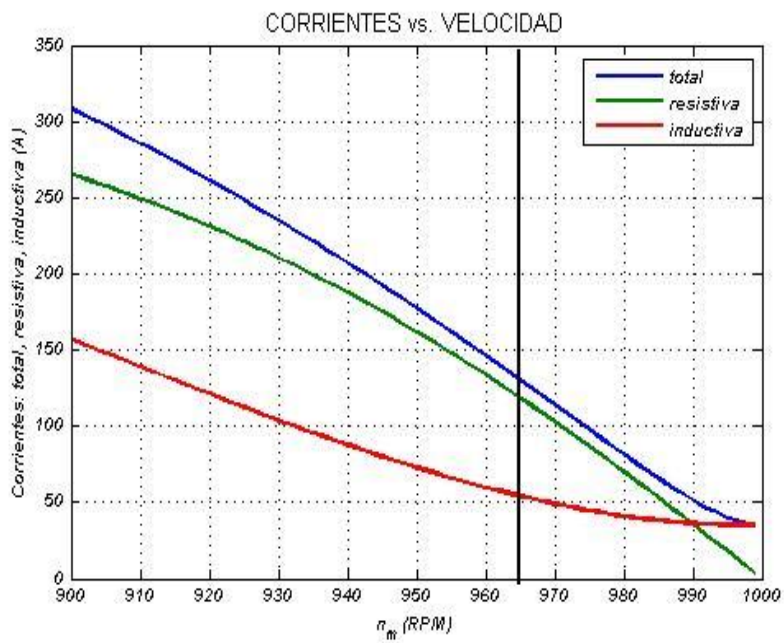


Figura 4.5: Corrientes: total, resistiva, inductiva vs. Velocidad (desliz $\leq 10\%$) - Motor 100 hp

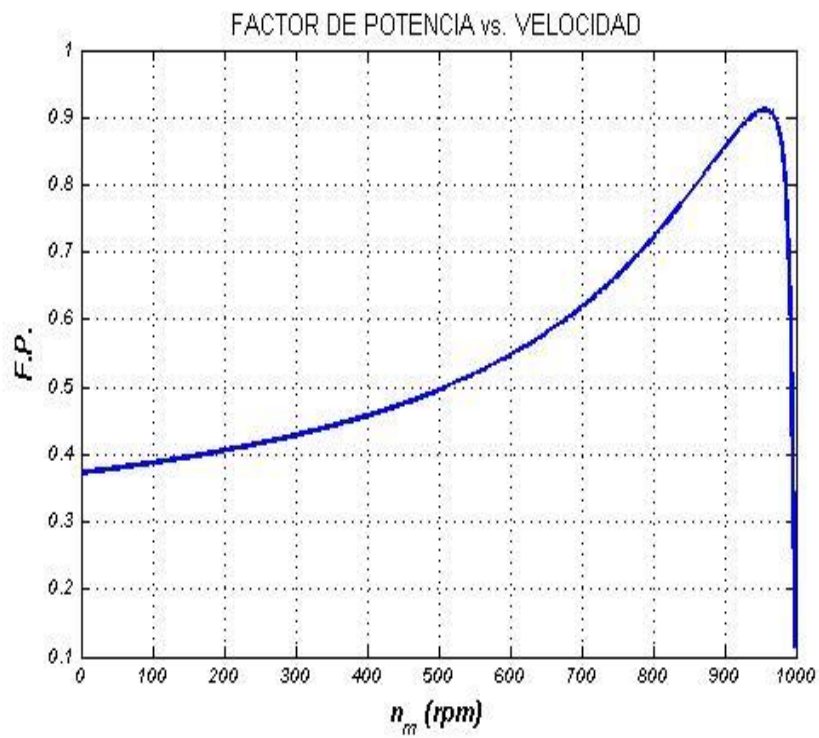


Figura 4.6: Factor de Potencia vs. Velocidad – Motor 100 hp

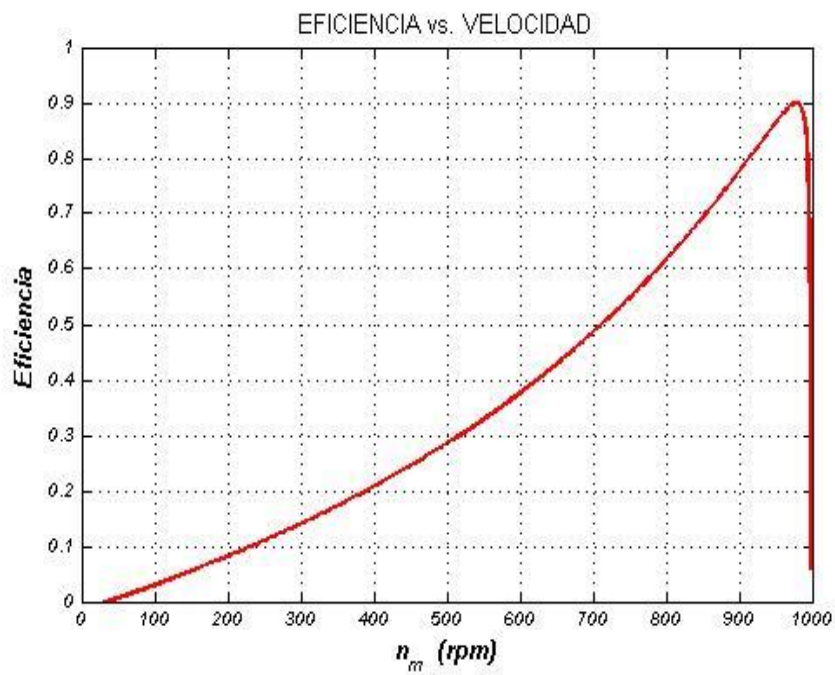


Figura 4.7: Eficiencia vs. Velocidad – Motor 100 hp

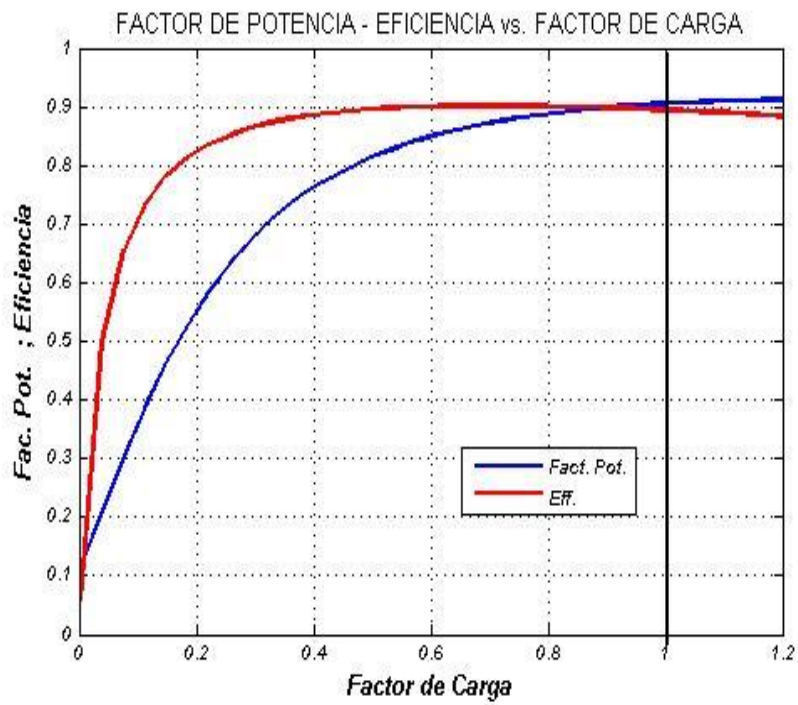


Figura 4.8: Factor de Potencia y Eficiencia vs. Factor de Carga – Motor 100 hp

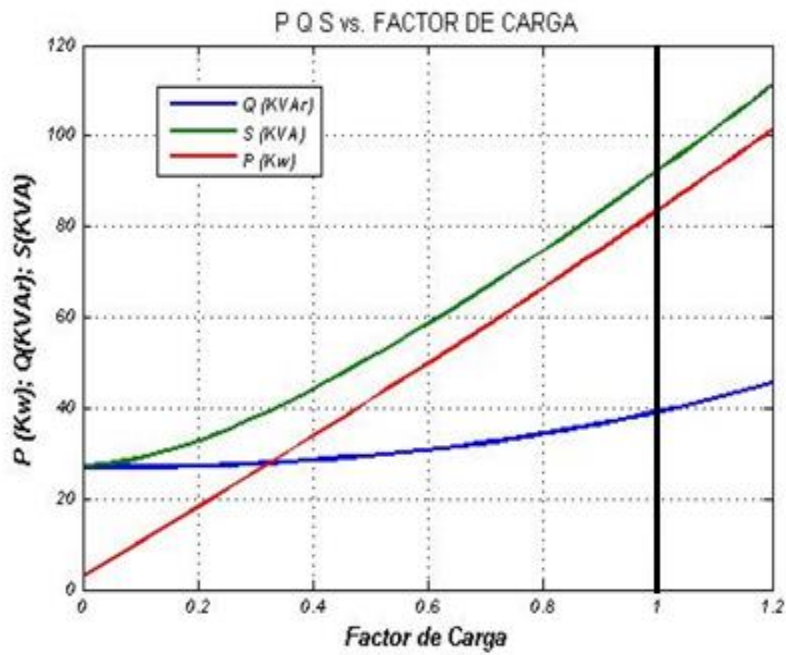


Figura 4.9: Potencias eléctricas: activa P, reactiva Q y aparente S vs. FC. – Motor 100 hp

En la figura No. 4.8 se observa la incidencia del factor de carga tanto en el factor de potencia como en la eficiencia del motor. En condiciones de plena carga ambas variables se encuentran dentro de los rangos superiores. Los valores nominales de la eficiencia y del factor de potencia son 89 % y 90 % respectivamente. La eficiencia se mantiene en niveles relativamente elevados hasta con factores de carga del 20%. Para cargas menores disminuye abruptamente. El factor de potencia disminuye al disminuir el factor de carga. Para valores del factor de carga menores a 30% el factor de potencia es menor a 0.65, indicando que gran parte de la potencia absorbida es potencia reactiva.

En la figura No. 4.9 se muestra el comportamiento de las potencias aparente, activa y reactiva en función del factor de carga. Se observa que, en todo el rango de trabajo del motor, la potencia activa varía de manera drástica con el factor de carga mientras que la variación de la potencia reactiva es bastante menos significativa. La potencia reactiva mayor se presenta en condiciones de plena carga (factor de carga de valor 1) alcanzando un valor de 40 KVAR mientras que el valor menor corresponde a las condiciones de vacío con 27 KVAR.

4.3 DIMENSIONAMIENTO DE LA POTENCIA REACTIVA DEL CAPACITOR

El dimensionamiento de la potencia reactiva del capacitor trifásico se hace mediante un análisis del comportamiento de la energía reactiva según la figura 4.9.

Evidentemente no se puede asignar el valor de 40 KVAR como el tamaño adecuado del capacitor puesto que, si el motor operase en condiciones de baja carga mecánica se incurriría en una sobrecompensación. Para evitar la sobrecompensación y la posibilidad de autoexcitación, el valor adecuado del capacitor debería ser igual a 27 KVAR o ligeramente menor. Se escoge como potencia nominal del capacitor el valor comercial inmediatamente inferior al valor mencionado, que en este caso es de 25 KVAR (Ver Anexo 1), el cual es aproximadamente el 90 % de la potencia reactiva inductiva que consume el motor en marcha en vacío, valor que se recomienda, como se ha explicado en el acápite 2.2.11, para evitar problemas de autoexcitación. El mejoramiento del factor de potencia de la instalación se mostrará posteriormente en la figura 4.13 y en ella se muestra que, en casi todo el rango de trabajo, el factor de potencia es superior a 0.96

La conexión interna del capacitor trifásico será en delta por las razones expuestas en el inciso f) del acápite 2.2.8. En la figura 4.10 se muestra de manera esquemática el conjunto motor y capacitor. Puesto que un motor de esta potencia muy probablemente incorpore un arranque a tensión reducida, bien sea por autotransformador o por conexión estrella – triángulo, la conexión del capacitor se efectuará aguas arriba del arrancador del motor. El circuito de alimentación del capacitor deberá incorporar un contactor separado para el capacitor el mismo que deberá tener conexión temporizada y desconexión enclavada con respecto al contactor del motor.

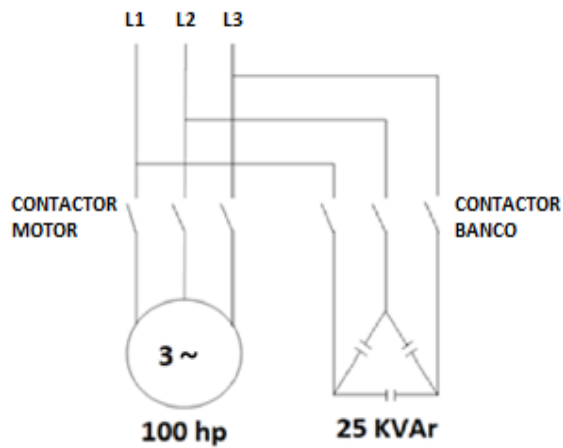


Figura 4.10: Esquema de instalación de motor y capacitor

Al esquema trifásico de la figura No. 4.10 le corresponde un circuito equivalente por fase ya compensado como se muestra en la figura No. 4.11.

Haciendo uso de la ecuación 2.46, a la potencia reactiva de 25 KVAR le corresponde una capacitancia por fase de 411 μF y, por lo tanto, una reactancia capacitiva por fase de 7.74 Ω . Tal como lo muestra el circuito equivalente por fase de la figura No. 4.11

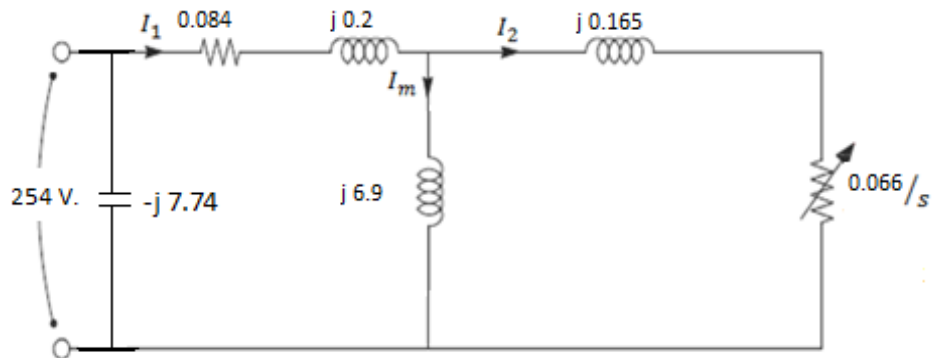


Figura 4.11: Circuito equivalente por fase de motor ya compensado. Obsérvese la reactancia capacitiva de condensador de 7.74 ohmios por fase.

4.4 CURVAS DE FACTOR DE POTENCIA Y POTENCIA REACTIVA DESPUES DE LA COMPENSACIÓN

Usando Matlab se confeccionó un programa que permitió graficar las curvas características del motor eléctrico habiendo sido ya compensado (Ver Anexo 4). Para ello se utilizó el circuito equivalente aproximado de la figura 4.11

En las figuras 4.12 y 4.13 se tiene tanto la potencia aparente, la potencia activa y la potencia reactiva, por un lado, como el factor de potencia por otro lado, ambas, en función del factor de carga respectivamente.

En la figura 4.12 que muestra las potencias eléctricas, se observa que, con el tamaño seleccionado del capacitor, la potencia reactiva absorbida de la red se ha reducido drásticamente alcanzando un valor máximo de 15 KVAR en condiciones de plena carga (factor de carga unitario) y un valor mínimo, cercano a 2 KVAR, en la condición de vacío. La potencia activa consumida no se afecta, pero la potencia aparente consumida disminuye para cada valor del factor de carga.

En la figura 4.13 se observa que el factor de potencia, en todo el rango de operación del motor, se incrementa marcadamente alcanzando valores mayores a 0.96 para valores de factor de carga mayores a 8%. El hecho de que, para valores del factor de carga menores a 8%, el factor de potencia disminuye, se atribuye a que no toda la potencia reactiva ha sido compensada (25 KVAR del capacitor vs. los 27 KVAR consumidos en vacío). En condición de plena carga, el factor de potencia se mantiene en valores encima del 0.96 recomendado, asegurando que el motor no incurre en penalidad por bajo factor de potencia. Como era de esperarse la curva de eficiencia no sufre cambio alguno con respecto a la condición previa a la compensación puesto que la potencia eléctrica activa no sufre alteración alguna.

Del análisis de las figuras 4.12 y 4. 13 se puede concluir que el tamaño del capacitor es el adecuado.

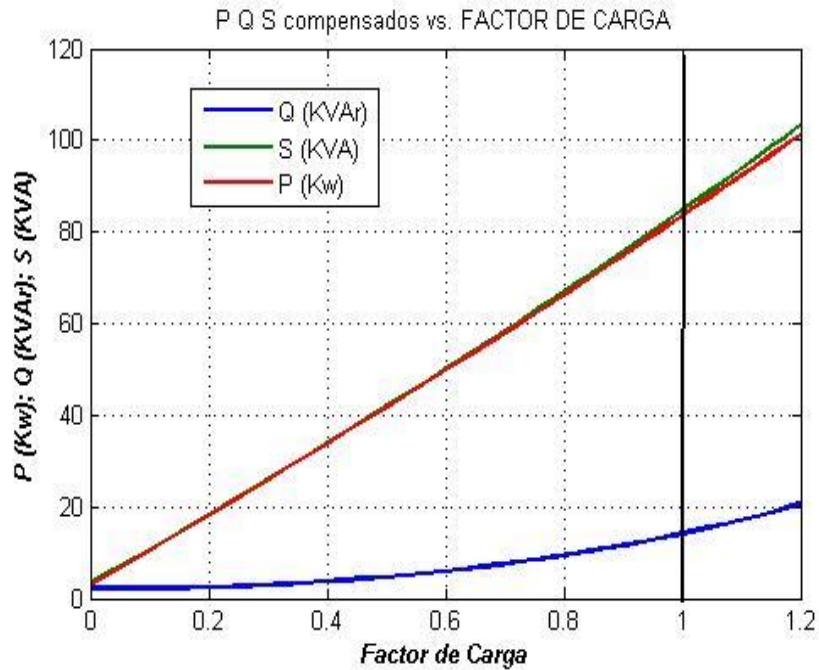


Figura 4.12: Potencias eléctricas: activa P, reactiva Q y aparente S vs. FC después de compensación – Motor 100 hp

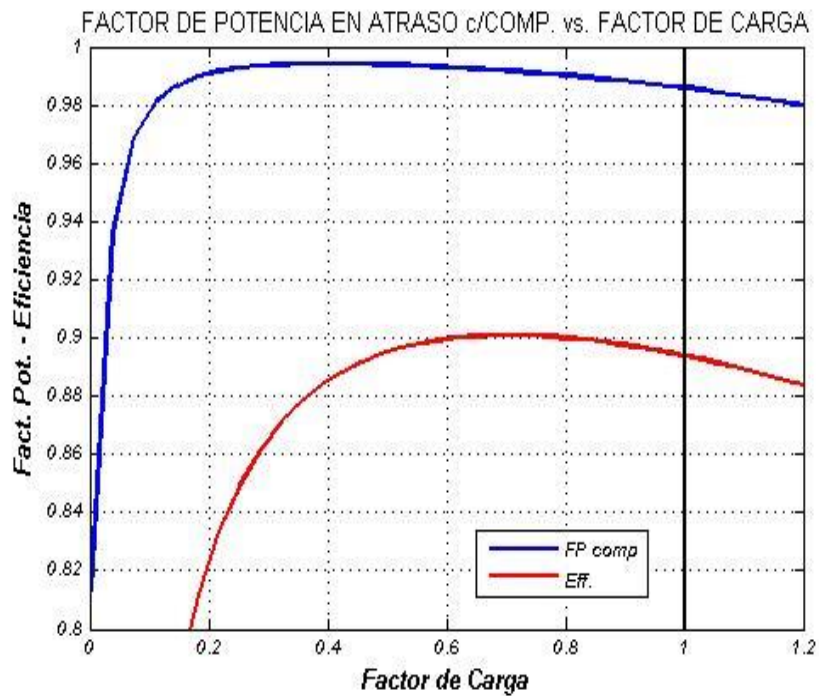


Figura 4.13: Factor de Potencia y Eficiencia vs. Factor de Carga después de la compensación – motor 100 hp

4.5 SELECCIÓN Y UBICACIÓN DEL CAPACITOR

Conociendo que la potencia requerida del capacitor es de 25 KVAR, la tensión de línea de 440 VAC y la frecuencia de 50 Hz, se ha efectuado la selección del capacitor a partir de los datos de catálogo de dos fabricantes de amplio uso en la industria nacional, como son las marcas Schneider y WEG. Los dispositivos seleccionados aparecen en la Tabla 4.1 siguiente.

En la misma tabla aparecen los dispositivos de protección y mando sugeridos para la instalación del banco de capacitores. En este caso, para la protección contra cortocircuito se ha optado por un interruptor automático. Como se mencionó en el inciso 2.2.13, el dato fundamental para la selección de la protección y el cableado es la corriente nominal I_{nom} del capacitor que, calculada de acuerdo a la ecuación 2.54, alcanza un valor de 32.8 amperios.

Para la selección de los dispositivos de protección se ha asumido que no existe distorsión armónica en la red (entonces, no son necesarios filtros anti armónicos y los equipos serán de configuración estándar), y que la corriente de cortocircuito en el punto de instalación es de 30 KA.

Para la protección contra cortocircuito se ha considerado que los equipos seleccionados cumplan de manera aproximada con los siguientes requerimientos:

- Reglaje de la protección térmica: $1.36 \times 32.8 \text{ Amp.} = 44.6 \text{ Amp.}$
- Reglaje de la protección magnética: $10 \times 32.8 = 328 \text{ Amp.}$

En este caso el valor de la protección magnética permitirá el paso de los transitorios de conexión.

Los contactores seleccionados son dispositivos diseñados para la conmutación de capacitores utilizados en la corrección de factor de potencia e incorporan resistencias de precarga. Los contactores se eligieron a partir de la potencia reactiva y la tensión de operación.

En cuanto a la ubicación del capacitor, asumiendo que es una instalación ya existente y considerando que el motor es de gran tamaño y que su arranque necesariamente debe ser a tensión reducida, la disposición recomendada es la que aparece en la figura 4.14 en la que se puede apreciar que la derivación hacia el capacitor es previa a la alimentación del motor; de esta manera los valores de corriente que circulan por el circuito derivado propio del motor no se afectan y no es necesario el cálculo de un factor de reducción para el redimensionamiento de los dispositivos de protección. Como se ha mencionado en el inciso 2.2.11, la conexión del capacitor será temporizada posterior a la conexión del motor.

Asimismo, de acuerdo a lo recomendado por el fabricante Schneider, el contactor del capacitor ira enclavado con el dispositivo de protección del motor de manera que cuando el motor sea o bien desconectado, o bien provocada la apertura de su dispositivo de protección, el condensador quedara fuera de servicio.

	Fabricante	
	Schneider	WEG
Capacitor	Capacitor para Corrección del Factor de Potencia Modelo VarPlus Can Heavy Duty 25 KVAR 50 Hz (30 KVAR 60 Hz) 440 VAC Código: BLRCH250A300B44 (Ver Anexo 5)	Capacitor trifásico modelo UCWT Potencia Reactiva: 25 KVAR (%50 Hz) Tensión de empleo: 440 VAC Corriente nominal: 32.8 A. Código: UCWT25V48S26 (Ver Anexo 6)
Contactador	Contactador para Corrección del Factor de Potencia Modelo TeSys LCD1MK. Tensión de Empleo: Hasta 690 VAC 50/60 Hz. Rating: 25 KVAR at 400 – 440 VAC (Ver Anexo 7)	Contactador tripolar para maniobra de condensadores CWM Potencia reactiva @ 440 VAC: 30 KVAR Intensidad de empleo: 40 Amp Código: CWM32-10-30 (Ver Anexo 8)
Disyuntor	Interruptor automático tripolar con unidad de disparo termomagnetica Modelo NSX 100F TMD 50 Ir: 40 – 50 Amp. (regulable) Im: 500 Amp. (fijo) Icu: 35 KA. (Ver Anexo 9)	Interruptor automático de caja moldeada Modelo UWB 225-N-FTU-40 In: 40 Amp. Ir: 40 Amp. (fijo) Im: 400 Amp. (fijo) Icu: 35 KA. (Ver Anexo 10)
Conductor	THW AWG # 6 (I adm : 65 Amps.)	

Tabla 4.3: Selección de componentes para instalación de capacitor de 25 KVAR – 440 VAC – 50 Hz

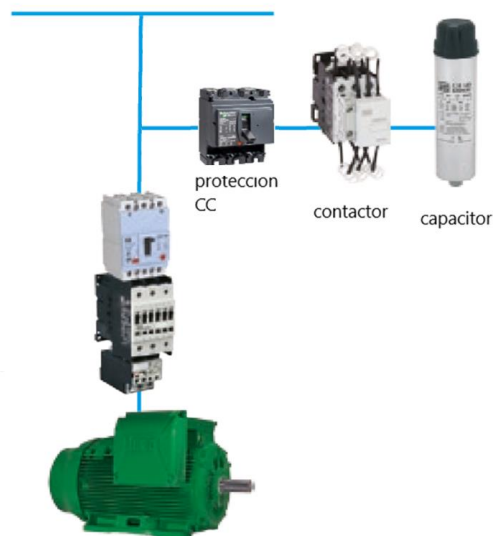


Figura 4.14: Instalación de componentes para compensación del factor de potencia

4.6 CONTRASTACIÓN CONTRA LA POTENCIA REACTIVA RECOMENDADA POR FABRICANTES

En el acápite 2.2.12 se hizo referencia a los cálculos recomendados por los fabricantes para el cálculo de la potencia reactiva de un capacitor destinado a la corrección del factor de potencia de un motor eléctrico y a las recomendaciones que, en ese sentido, establece la normativa nacional.

En el caso de Schneider, usando la ecuación 2.51, con un valor de corriente de vacío de 35 amperios (obtenida del gráfico de la figura 4.5) y un voltaje de línea de 440 VAC, se obtiene un valor de 24 KVAR. Este valor es bastante cercano con el obtenido en la tabla del Anexo 1 que, para una potencia nominal de 100 hp y una velocidad de sincronismo de 1000 RPM, arroja un valor de 25 KVAR para la potencia del capacitor.

En el caso de usar las características de placa del motor, la potencia reactiva del capacitor a instalar se obtiene a partir de la ecuación 2.52 recomendada también por Schneider, la cual con un valor de corriente nominal de 135 amperios y un factor de potencia nominal de 0.9 en atraso (ver figura No. 4.8) arroja, conservadoramente, un valor de 21.5 KVAR para el capacitor.

En el caso de las recomendaciones estipuladas por WEG, que se resumen en la ecuación 2.53, asumiendo un % de carga promedio de 50%, al cual se tiene una potencia eléctrica activa de 42 KW (ver figura No. 4.9), un factor de potencia actual de 0.8 y una eficiencia de 0.9 (ambas en la figura No. 4.8) y considerando un factor de potencia deseado de 0.98, (que nos permite obtener a partir de la tabla del Anexo 2 un factor de multiplicación de 0.547) se obtiene una potencia reactiva del capacitor de 23 KVAR.

Finalmente, siguiendo las recomendaciones del CNE y tomando un valor de potencia reactiva en vacío consumida por el motor de 27 KVAR (figura No. 4.9) la potencia reactiva del capacitor debe de ser de 24.3 KVAR.

La tabla 4.4 resume los valores obtenidos a partir de las recomendaciones de los fabricantes y de la normativa nacional. Tal como puede apreciarse en esta tabla, el valor encontrado utilizando los cálculos basados en el circuito equivalente se aproxima de manera apreciable a los valores encontrados utilizando las fórmulas recomendadas; encontrándose que la diferencia menor se da con la ecuación 2.51 propuesta por Schneider y también con la recomendación que establece el CNE., mientras que la diferencia se acentúa, llegando a un valor de 14 %, en el caso de la ecuación 2.60 propuesta por el fabricante WEG.

POTENCIA REACTIVA DEL CAPACITOR PARA MOTOR 100 hp, 1000 RPM, 440 VAC, 50 Hz.			
FABRICANTE/NORMA	ECUACION	TAMAÑO (KVAR)	DIFERENCIA (%)
Schneider	[2.51]	24.0	- 4
Schneider	[2.52]	21.5	- 14
WEG	[2.53]	23.0	- 8
C.N.E.		24.3	- 2.8
Circuito Equivalente		25.0	0

Tabla No. 4.4: Resumen del cálculo de la potencia reactiva del capacitor.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- El circuito equivalente del motor asíncrono de inducción permite, a través de sus curvas características derivadas, establecer una propuesta del dimensionamiento del capacitor necesario para la compensación de su potencia reactiva inductiva.
- La potencia reactiva inductiva que consume el motor asíncrono de inducción aumenta ligeramente con el factor de carga.
- El valor de referencia de la potencia reactiva a usarse para el dimensionamiento del capacitor es la potencia reactiva inductiva que consume el motor durante su marcha en vacío. Si la compensación se efectúa con este valor, el factor de potencia que se obtiene para cualquier valor del factor de carga, es siempre mayor a 0.96 inductivo, es decir, la potencia reactiva inductiva residual no es facturable.
- La ubicación del capacitor dentro del circuito derivado de alimentación del motor incide en la necesidad de corregir el dimensionamiento de la protección y el cableado. En instalaciones existentes de motores de gran potencia, la ubicación recomendable es en la cabecera del circuito aguas arriba del dispositivo de protección por corto circuito.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda el estudio de la incidencia de la clase NEMA en el cálculo de la potencia reactiva del banco de compensación.
- Se recomienda estudiar el efecto de las corrientes de inserción en la performance de la protección magnética en la compensación de motores pequeños y medianos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] WEG (2018 ago. 31). Automatización: Corrección del Factor de Potencia. [on line]. Disponible en: <http://www.weg.net/files/products/WEG-correccion-del-factor-de-potencia-50034873-catalogo-espanol.pdf>
- [2] Schneider Electric (2015), Compensación de Energía Reactiva y Filtrado de Armónicos, [On line]. Disponible en: <https://www.schneider-electric.es/es/download/document/ESMKT01182A16/>
- [3] E. Fitzgerald, C. Kingsley, S. Umans, *Máquinas Eléctricas*. 6a. Ed., México: Edit. Mc Graw – Hill Iberoamericana. 2004
- [4] S. Chapman, *Maquinas Eléctricas*. 5ª. Ed., México: Mc Graw Hill Interamericana, 2012
- [5] I. Kosow, *Maquinas Eléctricas y Transformadores*, 2ª. Edición, México: Edit. Prentice – Hall Hispanoamericana. 1993
- [6] T. Wildi, *Maquinas Eléctricas y Sistemas de Potencia*, 6ª. Ed., México: Pearson Educación, 2007
- [7] J. A. Yebra, *Compensación de Energía Reactiva en Sistemas Eléctricos*. España Edit. Mc Graw Hill. 1987
- [8] G. Henriquez Harper, *Manual de Equipos Eléctricos*. 1ª Ed. México: Edit. Limusa, 2008
- [9] Schneider Electric (2010 abril), *Guía de Diseño de Instalaciones Eléctricas* (4ª Ed.) [on line]. Disponible en: <https://www.schneider-electric.es/es/download/document/020511E10/>
- [10] Leyden (1999 nov.), *Boletín Técnico BT – 001: El Factor de Potencia y su Compensación en Instalaciones de Baja Tensión* [on line]. Disponible en: [ww.leyden.com.ar/esp/pdf/boletin_01.pdf](http://www.leyden.com.ar/esp/pdf/boletin_01.pdf)
- [11] R. Boylestad, *Introducción al Análisis de Circuitos*, X Edición, México: Pearson Educación, 2004
- [12] Leyden (2000 set.), *Boletín Técnico BT – 002: Compensación Individual* [on line]. Disponible en: [ww.leyden.com.ar/esp/pdf/boletin_02.pdf](http://www.leyden.com.ar/esp/pdf/boletin_02.pdf)
- [13] Schneider Electric (2004 abr. 15) *PT – 075: Corrección del Factor de Potencia* [on line]. Disponible en: <https://www.schneider-electric.es/es/download/document/CT-PT-075-Z002/>
- [14] DGE - MEM, *Código Nacional de Electricidad. Capítulo V: Utilización* [CD-ROM]. Lima, Perú. 2005. Disponible en < <http://www.minem.gob.pe>>
- [15] H. Morales, *Matlab para Ciencias e Ingeniería con Métodos Numéricos y Visualización Gráfica*. 1ª. Ed., Perú: Editorial Megabyte. 2005
- [16] Schneider Electric (2018 mayo 01), *TeSys Catalogue 2018 Motor Control and Protection Components*. [on line] Disponible en: <https://www.schneider-electric.com.pe/es/download/document/MKTED210011EN/>
- [17] Schneider Electric (2018), Interruptores Automáticos e Interruptores en Carga. [on line] Disponible en: https://www.schneider-electric.com/resources/sites/SCHNEIDER-ELECTRIC/content/live/FAQS/242000/FA242242/pt_PT/Compact_NSX_guia_sust.pdf
- [18] WEG (2018) UBW Technical Manual [on line] , Disponible en: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hea/h03/WEG-UBW-technical-manual-en.pdf>

ANEXOS

ANEXO 1

POTENCIA REACTIVA DEL CAPACITOR **PARA MOTOR ASÍNCRONO**

Motor trifásico: 230/400 V					
Potencia nominal		Potencia (kVAr) a instalar			
		velocidad de rotación (rpm)			
kW	CV	3000	1500	1000	750
22	30	6	8	9	10
30	40	7,5	10	11	12,5
37	50	9	11	12,5	16
45	60	11	13	14	17
55	75	13	17	18	21
75	100	17	22	25	28
90	125	20	25	27	30
110	150	24	29	33	37
132	180	31	36	38	43
160	218	35	41	44	52
200	274	43	47	53	61
250	340	52	57	63	71
280	380	57	63	70	79
355	482	67	76	86	98
400	544	78	82	97	106
450	610	87	93	107	117

Fuente: Schneider [2]

ANEXO 2

FACTOR DE MULTIPLICACIÓN EN FUNCIÓN DE FACTOR DE POTENCIA ACTUAL Y FACTOR DE POTENCIA DESEADO

Factor de Potencia

Factor de potencia actual	Factor de potencia deseado (F)														
	0.85	0.86	0.87	0.88	0.89	0.90	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99
0.50	1,112	1,139	1,165	1,192	1,220	1,248	1,276	1,306	1,337	1,369	1,403	1,440	1,481	1,529	1,589
0.52	1,023	1,050	1,076	1,103	1,131	1,159	1,187	1,217	1,248	1,280	1,314	1,351	1,392	1,440	1,500
0.54	0,939	0,966	0,992	1,019	1,047	1,075	1,103	1,133	1,164	1,196	1,230	1,267	1,308	1,356	1,416
0.56	0,860	0,887	0,913	0,940	0,968	0,996	1,024	1,054	1,085	1,117	1,151	1,188	1,229	1,277	1,337
0.58	0,785	0,812	0,838	0,865	0,893	0,921	0,949	0,979	1,010	1,042	1,076	1,113	1,154	1,202	1,262
0.60	0,713	0,740	0,766	0,793	0,821	0,849	0,877	0,907	0,938	0,970	1,004	1,041	1,082	1,130	1,190
0.62	0,646	0,673	0,699	0,726	0,754	0,782	0,810	0,840	0,871	0,903	0,937	0,974	1,015	1,063	1,123
0.64	0,581	0,608	0,634	0,661	0,689	0,717	0,745	0,775	0,806	0,838	0,872	0,909	0,950	0,998	1,068
0.66	0,518	0,545	0,571	0,598	0,626	0,654	0,682	0,712	0,743	0,775	0,809	0,846	0,887	0,935	0,995
0.68	0,458	0,485	0,511	0,538	0,566	0,594	0,622	0,652	0,683	0,715	0,749	0,786	0,827	0,875	0,935
0.70	0,400	0,427	0,453	0,480	0,508	0,536	0,564	0,594	0,625	0,657	0,691	0,728	0,769	0,817	0,877
0.72	0,344	0,371	0,397	0,424	0,452	0,480	0,508	0,538	0,569	0,601	0,635	0,672	0,713	0,761	0,821
0.74	0,289	0,316	0,342	0,369	0,397	0,425	0,453	0,483	0,514	0,546	0,580	0,617	0,658	0,706	0,766
0.76	0,235	0,262	0,288	0,315	0,343	0,371	0,399	0,429	0,460	0,492	0,526	0,563	0,604	0,652	0,712
0.78	0,182	0,209	0,235	0,262	0,290	0,318	0,346	0,376	0,407	0,439	0,473	0,510	0,551	0,599	0,659
0.80	0,130	0,157	0,183	0,210	0,238	0,266	0,294	0,324	0,355	0,387	0,421	0,458	0,499	0,547	0,609
0.82	0,078	0,105	0,131	0,158	0,186	0,214	0,242	0,272	0,303	0,335	0,369	0,406	0,447	0,495	0,555
0.84	0,026	0,053	0,079	0,106	0,134	0,162	0,190	0,220	0,251	0,283	0,317	0,354	0,395	0,443	0,503
0.86			0,026	0,053	0,081	0,109	0,137	0,167	0,198	0,230	0,264	0,301	0,342	0,390	0,450
0.88					0,028	0,056	0,084	0,114	0,145	0,177	0,211	0,248	0,289	0,337	0,397
0.90							0,028	0,058	0,089	0,121	0,155	0,192	0,233	0,281	0,341
0.92										0,031	0,063	0,097	0,134	0,175	0,223
0.94												0,034	0,071	0,112	0,160
0.96														0,041	0,089
0.98															0,060

Fuente: WEG [1]

ANEXO 3

PROGRAMA PARA TRAZAR LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DE MOTOR TRIFÁSICO DE INDUCCIÓN

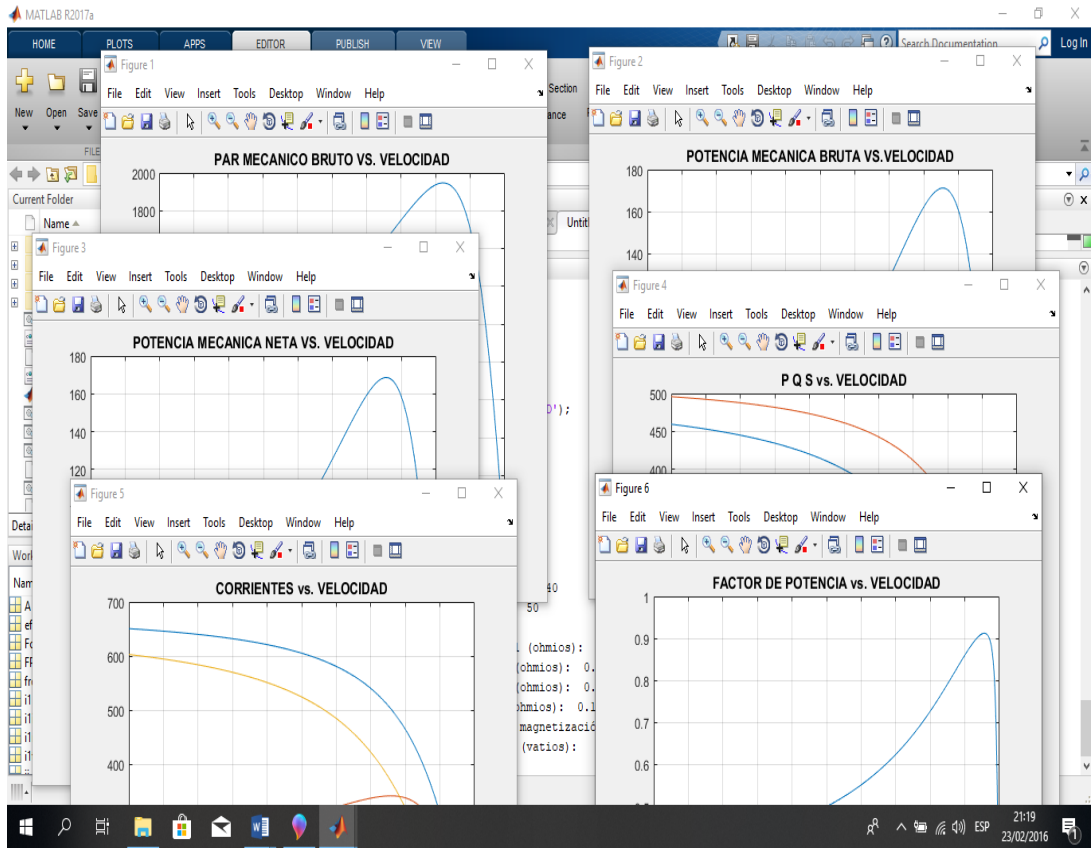
```
%Programa que calcula las curvas características de un motor de
inducción
%trifásico con conexión en estrella a partir de las impedancias del
circuito equivalente por fase
%DATOS DE PLACA Y DEL CIRCUITO EQUIVALENTE
Pnom1=input('ingrese Potencia nominal (hp): ');
v=input('ingrese voltaje de linea (voltios): ');
frec=input('Ingrese frecuencia de linea (Hz): ');
PP=input('Ingrese Numero de Polos: ');
r1=input('ingrese resistencia del estator r1 (ohmios): ');
x1=input('ingrese reactancia del estator x1(ohmios): ');
r2=input('ingrese resistencia del rotor r2 (ohmios): ');
x2=input('ingrese reactancia del rotor x2 (ohmios): ');
xm=input('ingrese resistencia de la rama de magnetización xm (ohmios):
');
Pperd=input('Ingrese las pérdidas rotacionales (vatios): ');
%Calculos iniciales
vf=v/sqrt(3); %voltaje de fase
Pnom=0.746*Pnom1; %potencia nominal en KW
%Cálculo del voltaje e impedancia de Thevenin.
vth=vf*(xm/sqrt(r1^2+(x1+xm)^2));
zth=((1i*xm)*(r1+1i*x1))/(r1+1i*(x1+xm));
rth=real(zth);
xth=imag(zth);
ns=120*frec/PP; %velocidad de sincronismo en rpm
ws=(ns*pi/30); %idem en rad/seg
%Para seguir el cálculo se establece un deslizamiento mínimo de 0.001
para
%evitar la división entre 0.
s=(0:0.001:1); %rango del deslizamiento
s(1)=0.001;
nm=(1-s)*ns; %Velocidad del motor (rev/min)
wm=(1-s)*ws; %idem en rad/seg.
% Calculo para los graficos %%%
for ii=1:length(s)
Tmb(ii)=(3*vth^2*(r2)/s(ii))/(ws*((rth+(r2)/s(ii))^2+(xth+x2)^2));%par
bruto
Pmb(ii)=Tmb(ii)*wm(ii); %potencia mecanica bruta
Pout(ii)=Pmb(ii)-Pperd; %potencia mecanica neta
zf(ii)=1/(1/(j*xm)+1/(r2/s(ii)+j*x2)); %impedancia equiv. por
fase
i1(ii)=vf/(r1+j*x1+zf(ii)); %fasor corriente total de
fase
ilt(ii)=abs(i1(ii)); %modulo de corriente total
ilr(ii)=real(i1(ii)); %corriente resistiva
ili(ii)=abs(imag(i1(ii))); %corriente inductiva
Pin(ii)=3*vf*abs(i1(ii))*cos(atan(imag(i1(ii))/real(i1(ii))));
%potencia activa
eff(ii)=Pout(ii)/Pin(ii); % eficiencia
```

```

Fc(ii)=Pmb(ii)/(1000*Pnom); % factor de carga
FP(ii)=cos(atan(imag(il(ii))/real(il(ii)))); % factor de potencia
Preac(ii)=Pin(ii)*sqrt((1/FP(ii))^2-1)/1000; % potencia reactiva
A(ii)=3*vf*abs(il(ii))/1000; % potencia aparente
end
figure(1);
plot(nm,Tmb);
grid on;
title('PAR MECANICO BRUTO VS. VELOCIDAD');
figure(2);
plot(nm,Pmb/1000);
grid on;
title('POTENCIA MECANICA BRUTA VS.VELOCIDAD');
figure(3);
plot(nm,Pout/1000);
grid on;
title('POTENCIA MECANICA NETA VS. VELOCIDAD');
figure(4);
plot(nm,Preac,nm,A,nm,Pin/1000);
grid on;
title('P Q S vs. VELOCIDAD');
figure(5);
plot(nm,ilt,nm,ilr,nm,ili)
title('CORRIENTES vs. VELOCIDAD');
grid on;
figure(6);
plot(nm,FP);
title('FACTOR DE POTENCIA vs. VELOCIDAD');
grid on;
figure(7);
plot(nm,eff);
title('EFICIENCIA vs. VELOCIDAD');
grid on;

```

CAPTURA DE PANTALLA DE PROGRAMA DE CURVAS CARACTERÍSTICAS



ANEXO 4

PROGRAMA PARA TRAZAR LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS PARA MOTOR CON COMPENSACIÓN REACTIVA.

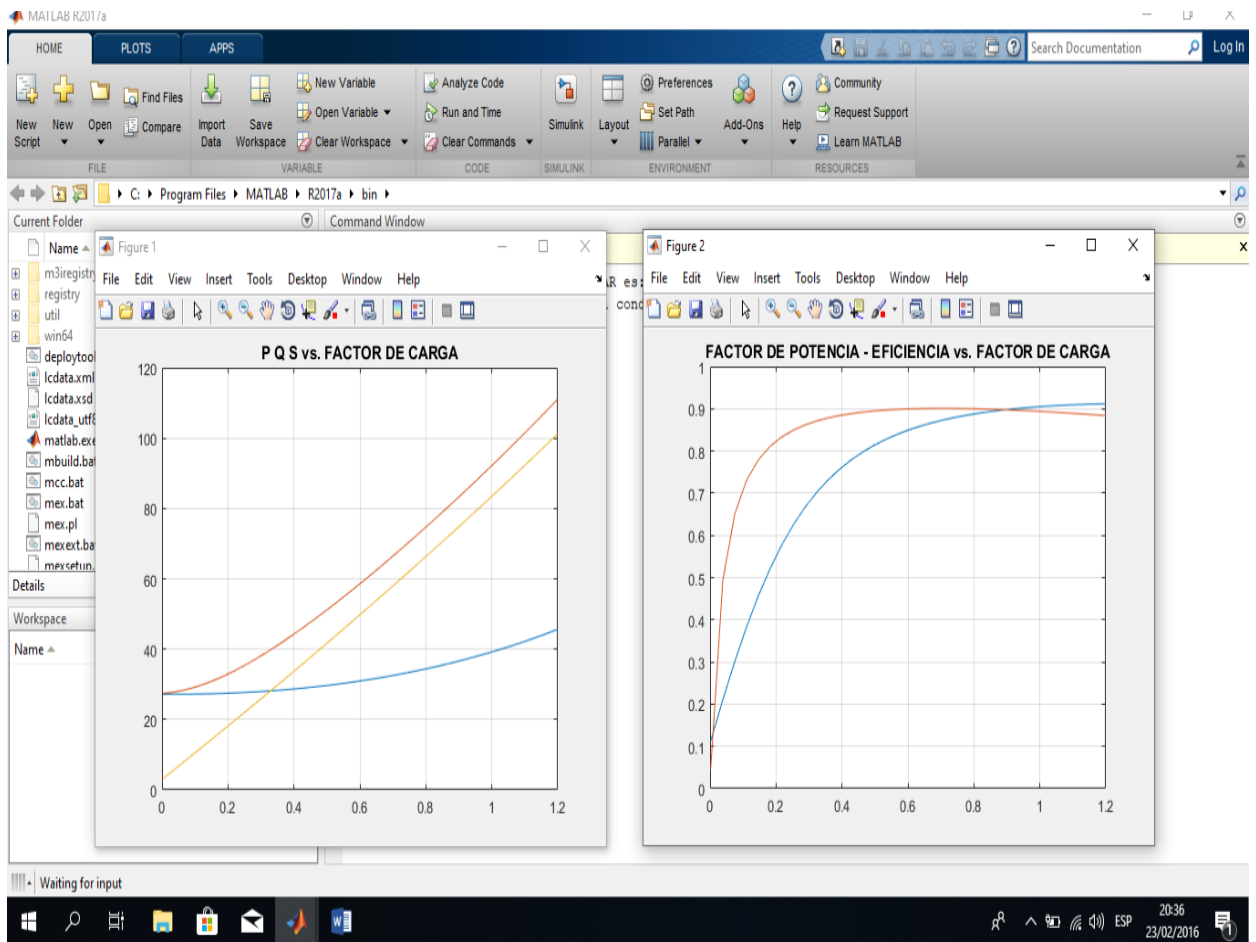
```
%Programa que calcula las curvas características de un motor de
inducción
%trifásico con conexión en delta en función del factor de carga,
determina
% la potencia reactiva de los condensadores y traza las curvas
compensadas
%DATOS DE PLACA Y DEL CIRCUITO EQUIVALENTE
Pnom1=input('ingrese Potencia nominal (hp): ');
v=input('Ingrese voltaje de línea (voltios): ');
frec=input('Ingrese frecuencia de línea (Hz): ');
PP=input('Ingrese Numero de Polos: ');
r1=input('Ingrese resistencia del estator r1 (ohmios): ');
x1=input('Ingrese reactancia del estator x1(ohmios): ');
r2=input('Ingrese resistencia del rotor r2 (ohmios): ');
x2=input('Ingrese reactancia del rotor x2 (ohmios): ');
xm=input('Ingrese resistencia de la rama de magnetización xm (ohmios):
');
Pperd=input('Ingrese las pérdidas rotacionales (vatios): ');
%Calculos iniciales
vf=v/sqrt(3); %voltaje de fase
Pnom=0.746*Pnom1; %potencia nominal en KW
%Cálculo del voltaje e impedancia de Thevenin.
vth=vf*(xm/sqrt(r1^2+(x1+xm)^2));
zth=((1i*xm)*(r1+1i*x1))/(r1+1i*(x1+xm));
rth=real(zth);
xth=imag(zth);
ns=120*frec/PP;
ws=(ns*pi/30);
%Para seguir el cálculo se establece un deslizamiento mínimo ce 0.001
para
%evitar la división entre 0.
s=(0:0.001:0.1); %Deslizamiento
s(1)=0.001;
nm=(1-s)*ns; %Velocidad del motor (rev/min)
wm=(1-s)*ws; %Velocidad del motor en rad/seg.
%Calculo de la Potencia mecanica Bruta%%%
for ii=1:length(s)
Tmb(ii)=(3*vth^2*(r2)/s(ii))/(ws*((rth+(r2)/s(ii))^2+(xth+x2)^2));
Pmb(ii)=Tmb(ii)*wm(ii);
Pout(ii)=Pmb(ii)-Pperd;
zf(ii)=1/(1/(j*xm)+1/(r2/s(ii)+j*x2));
i1(ii)=vf/(r1+j*x1+zf(ii));
i1t(ii)=abs(i1(ii));
i1r(ii)=real(i1(ii));
i1i(ii)=abs(imag(i1(ii)));
Pin(ii)=3*vf*abs(i1(ii))*cos(atan(imag(i1(ii))/real(i1(ii))));
eff(ii)=Pout(ii)/Pin(ii);
Fc(ii)=Pout(ii)/(1000*Pnom);
```

```

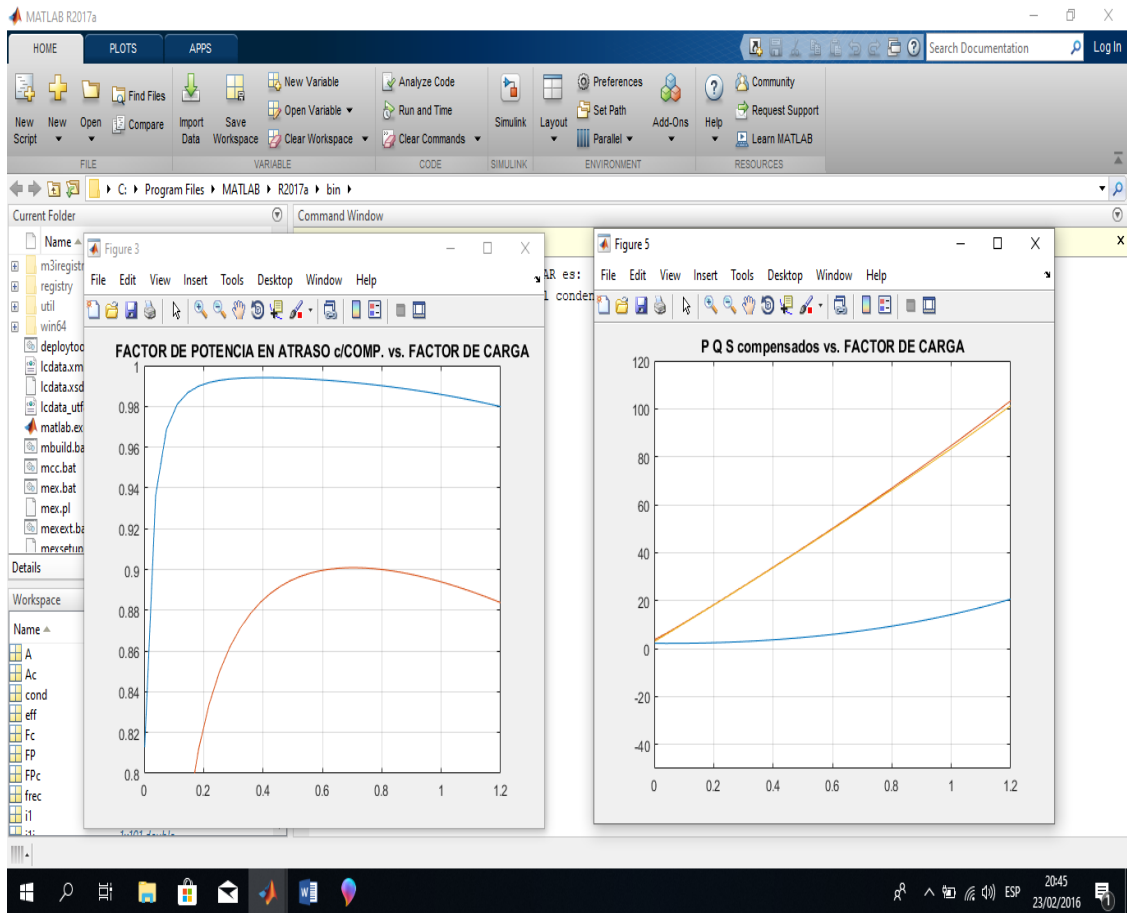
        FP(ii)=cos(atan(imag(il(ii))/real(il(ii))));
        Preac(ii)=Pin(ii)*sqrt((1/FP(ii))^2-1)/1000;
        A(ii)=3*vf*abs(il(ii))/1000;
    end
    figure(1);
    plot(Fc,Preac,Fc,A,Fc,Pin/1000);
    grid on;
    title('P Q S vs. FACTOR DE CARGA');
    axis([0 1.2 0 120]);
    figure(2);
    plot(Fc,FP,Fc,eff);
    title('FACTOR DE POTENCIA - EFICIENCIA vs. FACTOR DE CARGA');
    axis([0 1.2 0 1]);
    grid on;
    clc;
    fprintf('La Potencia Reactiva de Vacio en KVAR es:%12.0f
    \n',Preac(1));
    cond=input('Ingrese la potencia seleccionada del condensador trifasico
    KVAR: ');
    for ii=1:length(s)
        Preacc(ii)=Preac(ii)-cond;
        Ac(ii)=sqrt((Pin(ii)/1000)^2+(Preacc(ii))^2);
        FPc(ii)=(Pin(ii)/1000)/Ac(ii);
    end
    if cond <= Preac(1)
        figure(3);
        plot(Fc,FPc,Fc,eff);
        title('FACTOR DE POTENCIA EN ATRASO c/COMP. vs. FACTOR DE CARGA');
        axis([0 1.2 0.8 1]);
        grid on
    else
        figure(4);
        plot(Fc,FPc,Fc,eff);
        title('FACTOR DE POTENCIA EN ADELANTO c/COMP. vs. FACTOR DE CARGA');
        axis([0 1.2 0.5 1]);
        grid on
    end
    figure(5);
    plot(Fc,Preacc,Fc,Ac,Fc,Pin/1000);
    grid on;
    title('P Q S compensados vs. FACTOR DE CARGA');
    axis([0 1.2 -50 120]);

```

CAPTURA DE PANTALLA CURVAS MOTOR COMPENSADO 1



CAPTURA DE PANTALLA CURVAS MOTOR COMPENSADO 2



ANEXO 5

Condensadores VarPlus Can

(continuación)

Condensadores y componentes BT



Características generales	
Normas	CEI 60031-1/2
Rango de tensión	230 a 830 V
Frecuencia	50/60 Hz
Rango de potencia	1 a 50 kW/r
Pérdidas (dieléctrico)	< 0,2 W/kVAr
Pérdidas (totales)	< 0,5 W/kVAr
Tolerancia capacidad	-5%, +10%
Ensayos	Entre terminales
Tensión	Entre terminales y envuelto
	Tensión de impulso
	Resistencia de descarga
Condiciones de trabajo	
Temperatura ambiente	-25/55 °C (Clase D)
Humedad	96%
Altitud	2.000 m sobre el nivel del mar
Sobretensión	1,1 x U _n 8 h/a sobre 24 h
Sobrecarga	Hasta 1,8 x I _n
Pico de corriente de conexión	250 x I _n
Maniobras (máx)	Hasta 7000 maniobras/año
Esperanza de vida	Hasta 130.000 horas
Polución armónica	< 2% THDu
Características de instalación	
Posición de montaje	Interior, vertical/horizontal
Fijación	
Tiema	Espárrago roscado M12 en la parte inferior
Terminales	CLAMPITE - terminal trifásico con protección ante contactos eléctricos (finger proof) y para pequeñas potencias terminal faston
Características de seguridad	
Seguridad	Autocicatrización + sistema de sobrepresión + resistencia de descarga
Protección	IP20
Construcción	
Envoltorio	Aluminio estrado
Dieléctrico	Polipropileno metalizado con film de /inc/
Impregnación	No PCB y resina de poliestireno (soca)

4

Tensión	50 Hz		60 Hz		μF (X3)	Código envoltorio	Referencia
	Q _N (kVAr)	I _N (A)	Q _N (kVAr)	I _N (A)			
440 V	5,0	6,6	6,0	7,9	27,4	HC	BLRCH050A060B44
	7,5	9,8	9,0	11,8	41,1	HC	BLRCH075A090B44
	10,0	13,1	12,0	15,7	54,8	MC	BLRCH100A120B44
	12,5	16,4	15,0	19,7	68,5	RC	BLRCH125A150B44
	15,0	19,7	18,0	23,6	82,2	RC	BLRCH150A180B44
	20,0	26,2	24,0	31,4	110,0	TC	BLRCH200A240B44
	22,5	29,5	27,0	35,4	123,0	TC	BLRCH225A270B44
	25,0	32,8	30,0	39,4	137,0	TC	BLRCH250A300B44
	30,3	39,8	-	-	166,0	VC	BLRCH303A000B44
	50,0	65,6	-	-	274,0	YC	BLRCH500A000B44

Fuente: Schneider Electric [2]

ANEXO 6

Condensadores Trifásicos - UCWT

Potencia 0,37...15 (kVA r)
Tensión Nominal 208...240 (V)

Potencia 0,37...25 (kVA r)
Tensión Nominal 380...480 (V)



Condensadores Trifásicos - UCWT (1) (2)										
Tensión (V)	50 Hz		60 Hz		Capacitancia (µF)	Capacitancia (µF) (Conexión Δ)	Serie (3)	Referencia	Dimensiones (xH) (mm)	Peso (kg)
	Potencia Reactiva (kVA r)	Corriente Nominal In (A)	Potencia Reactiva (kVA r)	Potencia Nominal In (A)						
440	0,42	0,5	0,50	0,7	2,3	2,3 x 3	D	UCWT0,5/49 L10	60 x 158	0,54
	0,50	0,7	0,60	0,8	2,7	2,7 x 3	D	UCWT0,5/48 L10	60 x 158	0,54
	0,63	0,8	0,75	1,0	3,4	3,4 x 3	D	UCWT0,75/49 L10	60 x 158	0,54
	0,75	1,0	0,90	1,2	4,1	4,1 x 3	D	UCWT0,75/48 L10	60 x 158	0,54
	0,83	1,1	1,00	1,3	4,6	4,6 x 3	D	UCWT1/49 L10	60 x 158	0,54
	1,00	1,3	1,20	1,6	5,5	5,5 x 3	D	UCWT1/48 L10	60 x 158	0,54
	1,25	1,6	1,50	2,0	6,9	6,9 x 3	D	UCWT1,5/49 L10	60 x 158	0,54
	1,50	2,0	1,80	2,4	8,2	8,2 x 3	D	UCWT1,5/48 L10	60 x 158	0,54
	1,67	2,2	2,00	2,6	9,1	9,1 x 3	D	UCWT2/49 L10	60 x 158	0,54
	2,00	2,6	2,40	3,1	11,0	11,0 x 3	D	UCWT2/48 L10	60 x 158	0,56
	2,08	2,7	2,50	3,3	11,4	11,4 x 3	D	UCWT2,5/49 L10	60 x 158	0,54
	2,50	3,3	3,00	3,9	13,7	13,7 x 3	D	UCWT3/49 L10	60 x 158	0,54
	3,00	3,9	3,60	4,7	16,4	16,4 x 3	D	UCWT3/48 L16	60 x 158	0,66
	4,17	5,5	5,00	6,6	22,8	22,9 x 3	D	UCWT5/49 L16	60 x 211	0,89
	5,00	6,6	6,00	7,9	27,4	27,4 x 3	D	UCWT5/48 L16	60 x 211	0,76
	6,25	8,2	7,50	9,8	34,3	34,3 x 3	E	UCWT7,5/49 N20	75 x 221,5	1,36
	7,50	9,8	9,00	11,8	41,1	41,1 x 3	E	UCWT7,5/48 N20	75 x 221,5	1,36
	8,33	10,9	10,00	13,1	45,7	45,7 x 3	E	UCWT10/49 N20	75 x 221,5	1,36
	10	13,1	12,00	15,7	54,8	54,8 x 3	E	UCWT10/48 N22	75 x 261,5	1,36
	10,42	13,7	12,50	16,4	57,1	57,1 x 3	E	UCWT12,5/49 N22	75 x 261,5	1,70
	12,50	16,4	15,00	19,7	68,5	68,5 x 3	E	UCWT12,5/48 N22	75 x 261,5	1,70
	12,50	16,4	15,00	19,7	68,5	68,5 x 3	F	UCWT15/49 Q26	100 x 230	2,17
	14,58	19,1	17,50	23,0	80,0	80,0 x 3	E	UCWT17,5/49 Q24	85 x 355	2,00
	14,58	19,1	17,50	23,0	79,9	79,9 x 3	F	UCWT17,5/49 Q26	100 x 230	2,16
	15,00	19,7	18,00	23,6	82,2	82,2 x 3	E	UCWT15/48 Q24	85 x 261,5	2,00
	15,00	19,7	18,00	23,6	82,2	82,2 x 3	F	UCWT15/48 Q26	100 x 230	2,16
	16,67	21,9	20,00	26,2	91,4	91,4 x 3	E	UCWT20/49 Q24	85 x 355	2,00
	16,67	21,9	20,00	26,2	91,3	91,3 x 3	F	UCWT20/49 Q26	100 x 230	2,17
	17,50	23,0	21,00	27,6	95,9	95,9 x 3	F	UCWT17,5/48 Q26	100 x 230	2,18
	18,75	24,8	22,50	29,5	102,8	102,2 x 3	E	UCWT22,5/49 Q24	85 x 355	2,00
	18,75	24,8	22,50	29,5	102,8	102,8 x 3	F	UCWT22,5/49 S26	116 x 230	2,69
	20,00	26,2	24,00	31,5	109,6	109,6 x 3	F	UCWT20/48 S26	116 x 230	2,69
	20,83	27,3	25,00	32,8	114,2	114,1 x 3	E	UCWT25/49 Q24	85 x 355	2,00
20,83	27,3	25,00	32,8	114,2	114,2 x 3	F	UCWT25/49 S26	116 x 230	2,69	
22,50	29,5	-	-	123,3	123,3 x 3	F	UCWT22,5/48 S26	116 x 230	2,70	
25,00	32,8	-	-	137	137 x 3	F	UCWT25/48 S26	116 x 230	2,71	

Fuente: WEG [1]

ANEXO 7

References - TeSys D

TeSys contactors

For switching 3-phase capacitor banks, used for power factor correction
Direct connection without choke inductors



LC1 DFK^{see}



LC1 DGN^{see}, LC1 DGN^{see}, LC1 DM^{see}



LC1 DM^{see}, LC1 DM^{see}



LC1 DM12^{see}

Special contactors

Special contactors LC1 DeK are designed for switching 3-phase, single or multiple-step capacitor banks (up to 6 steps). Over 6 steps, it is recommended to use chokes in order to limit the inrush current and thus improve the lifetime of the installation. The contactors are conform to standards IEC 60070 and 60831, UL and CSA.

Contactors applications

Specification

Contactors fitted with a block of early make poles and damping resistors, limiting the value of the current on closing to 60 In max.

This current limitation increases the life of all the components of the installation, in particular that of the fuses and capacitors.

Operating conditions

Short-circuit protection must be provided by gG type fuses rated at 1.7... 2 In. It will ensure the service continuity of the whole installation in case of a capacitor contactor and of life.

Maximum operational power

The power values given in the selection table below are for the following operating conditions:

Prospective peak current at switch-on	LC1 DeK	200 In
Maximum operating rate	LC1 DFK, DGN, DM, DM12	240 operating cycles/hour
	LC1 DFK, DTK, DMK	100 operating cycles/hour
Electrical durability at nominal load	All contactor ratings	600 V 300 000 operating cycles 690 V 200 000 operating cycles

Operational power at 50/60 Hz U = 40 °C		Instantaneous auxiliary contacts	Tightening torque on cable end	Basic reference, to be completed by adding the voltage code	Weight			
230 V - 400 V - 480 V - 690 V	415 V	N/A	N/A		kg			
3	12.5	12.5	21	1	2	1.7	LC1DFK ^{see}	2.430
6.5	18.7	18.7	28.5	1	2	2.5	LC1DGN ^{see}	2.450
11	29	21	33	1	2	2.5	LC1DM ^{see}	2.600
14	35	27	42	1	2	2.5	LC1DM ^{see}	2.820
17	38	32	50	1	2	3	LC1DM ^{see}	1.300
23	48	43	67	1	2	3	LC1DM ^{see}	1.300
35	63	67	104	1	2	3	LC1DM12 ^{see}	1.650

Switching of multiple-step capacitor banks (with equal or different power ratings)

The correct contactor for each step is selected from the above table, according to the power rating of the step to be switched.

Example: 50 kVAR 3-step capacitor bank. Temperature: 30 °C and U = 400 V or 480 V.

One 25 kVAR step: contactor LC1 DM12, one 15 kVAR step: contactor LC1 DGN, and one 10 kVAR step: contactor LC1 DFK.

- (1) Operational power of the contactor according to the scheme on the page opposite.
- (2) The average temperature over a 24-hour period, in accordance with standards IEC 60070 and 60831 is 40 °C.
- (3) Standard control circuit voltages (the delivery time is variable, please consult your Regional Sales Office).

Volts	24	48	110	120	220	230	240	380	400	415	440
IEC 60070	67	67	F7	G7	M7	P7	U7	Q7	V7	R7	R7

ANEXO 8

Contadores para Maniobra de Condensadores

Diseño Modular

Para montaje en riel DIN 35 mm o tornillo

Resistencias de Pre Carga
Evitan las altas corrientes de in-rush

Datos y Certificaciones del Contactor

Muestra toda la información necesaria del CWMC

Bloque de Contacto Adelantado
Conecta los resistores de pre carga y desconecta después de 5ms

Contacto Auxiliar

El CWMC permite el uso de bloques de contacto estándar NA o NC de la línea CWM



Nuevos Modelos

Los contactores CWMC están disponibles en 6 modelos diferentes, en 4 tamaños. Todos los contactores están disponibles con bobinas CA con una larga variedad de tensiones para 50 o 60 Hz. Para bobinas CC y más informaciones, favor consultar a WEG.

Contadores Tripolares para Maniobra de Condensadores CWMC (AC-6b)

Datos técnicos		CWMC8	CWMC16	CWMC25	CWMC32	CWMC50	CWMC65	CWMC80	
Potencia reactiva AC-6b @ 55 °C	220-230 V	6	8	11	15	25	30	35	
	380-415 V	10	15	20	25	40	50	61	
	440 V	12	16	23	30	45	60	71	
	480 V	12,5	17	25	33	50	65	77	
	660-690 V	17,5	25	34	45	65	87	106	
AC-6b corriente (I _n) (55 °C)	A	16	21	30	40	60	77	93	
Corriente térmica (I _t) (55 °C)		25	32	45	60	90	110	140	
AC-6b corriente (I _n) (70 °C)		10	15	22	34	50	62	67	
Fusible máximo (g./g)		25	35	50	63	100	125	160	
Sección del cable		mm ²	6	6	2 x 10	16 + 16	35 + 35	35 + 35	35
	AWG	10	10	2 x 7	6 + 6	2 + 2	2 + 2	2	
Torque de apriete	N m	1...1,7		1,6...3	2,5...4	4...6	4...6	5...6,5	
Número máximo de operaciones por hora	ops/h.	120							
Número máximo de contactos auxiliares		1		3	5				
Vida eléctrica	ops x 10 ⁴	100							
Consumo de la bobina (AC) cerrado/abierto	VA	75 / 9,3			123 / 12,5	308 / 25			
Peso	kg	0,619		0,670	1,370	1,380	1,7		

Fuente: WEG [1]

ANEXO 9

Product data sheet Characteristics

LV429633
circuit breaker Compact NSX100F - TMD - 50 A -
3 poles 3d



Main

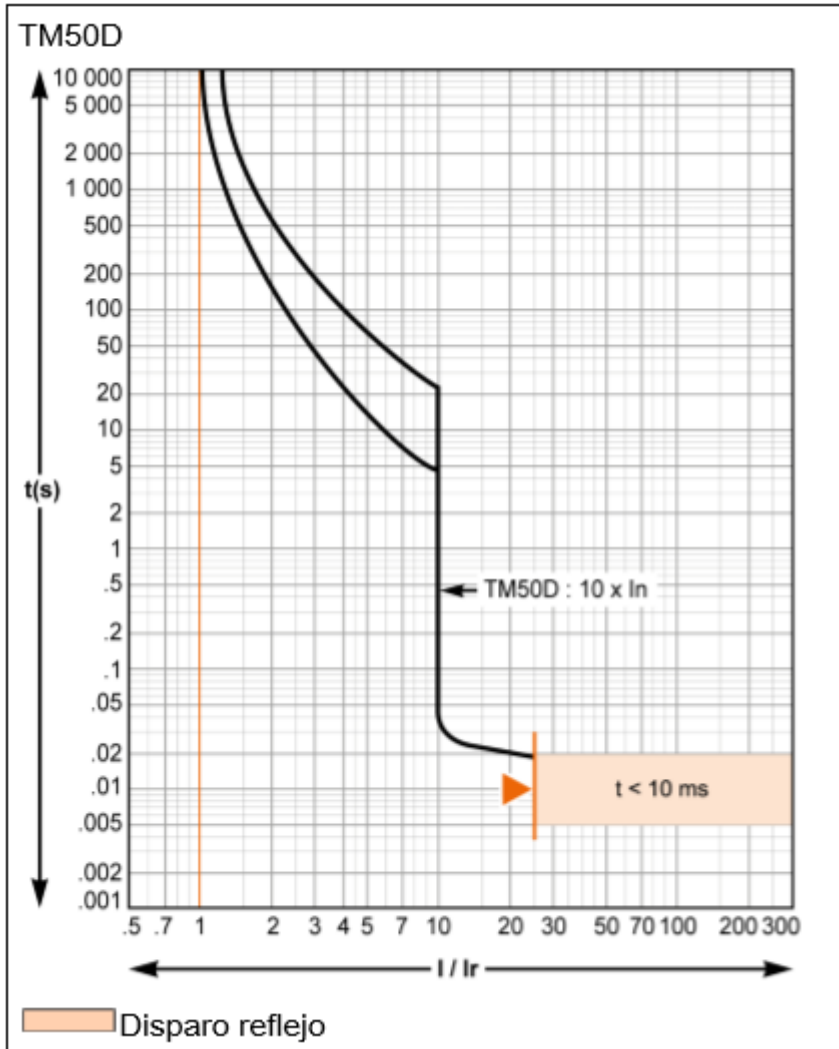
Range	Compact
Product name	Compact NSX
Product or component type	Circuit breaker
Device short name	Compact NSX100F
Device application	Distribution
Poles description	3P
Protected poles description	3i
Network type	AC
Network frequency	50/60 Hz
[In] rated current	100 A (40 °C)
[Ui] rated insulation voltage	800 V AC 50/60 Hz
[Uimp] rated impulse withstand voltage	8 kV
[Ue] rated operational voltage	690 V AC 50/60 Hz
Breaking capacity code	F (36 kA) AC
Breaking capacity	8 kA Icu at 690/690 V AC 50/60 Hz conforming to IEC 60947-2 22 kA Icu at 525 V AC 50/60 Hz conforming to IEC 60947-2 25 kA Icu at 500 V AC 50/60 Hz conforming to IEC 60947-2 35 kA Icu at 440 V AC 50/60 Hz conforming to IEC 60947-2 36 kA Icu at 380/415 V AC 50/60 Hz conforming to IEC 60947-2 85 kA Icu at 220/240 V AC 50/60 Hz conforming to IEC 60947-2 10 kA at 600 V AC 50/60 Hz conforming to UL 508 25 kA at 480 V AC 50/60 Hz conforming to UL 508 85 kA at 240 V AC 50/60 Hz conforming to UL 508
[Ics] rated service breaking capacity	Ics 11 kA 525 V AC 50/60 Hz conforming to IEC 60947-2 Ics 35 kA 440 V AC 50/60 Hz conforming to IEC 60947-2 Ics 36 kA 380/415 V AC 50/60 Hz conforming to IEC 60947-2 Ics 4 kA 690/690 V AC 50/60 Hz conforming to IEC 60947-2 Ics 85 kA 220/240 V AC 50/60 Hz conforming to IEC 60947-2 Ics 12.5 kA 500 V AC 50/60 Hz conforming to IEC 60947-2
Suitability for isolation	Yes conforming to EN 60947-2 Yes conforming to IEC 60947-2
Utilisation category	Category A

Jan 8, 2018

20 k On Schneider

1

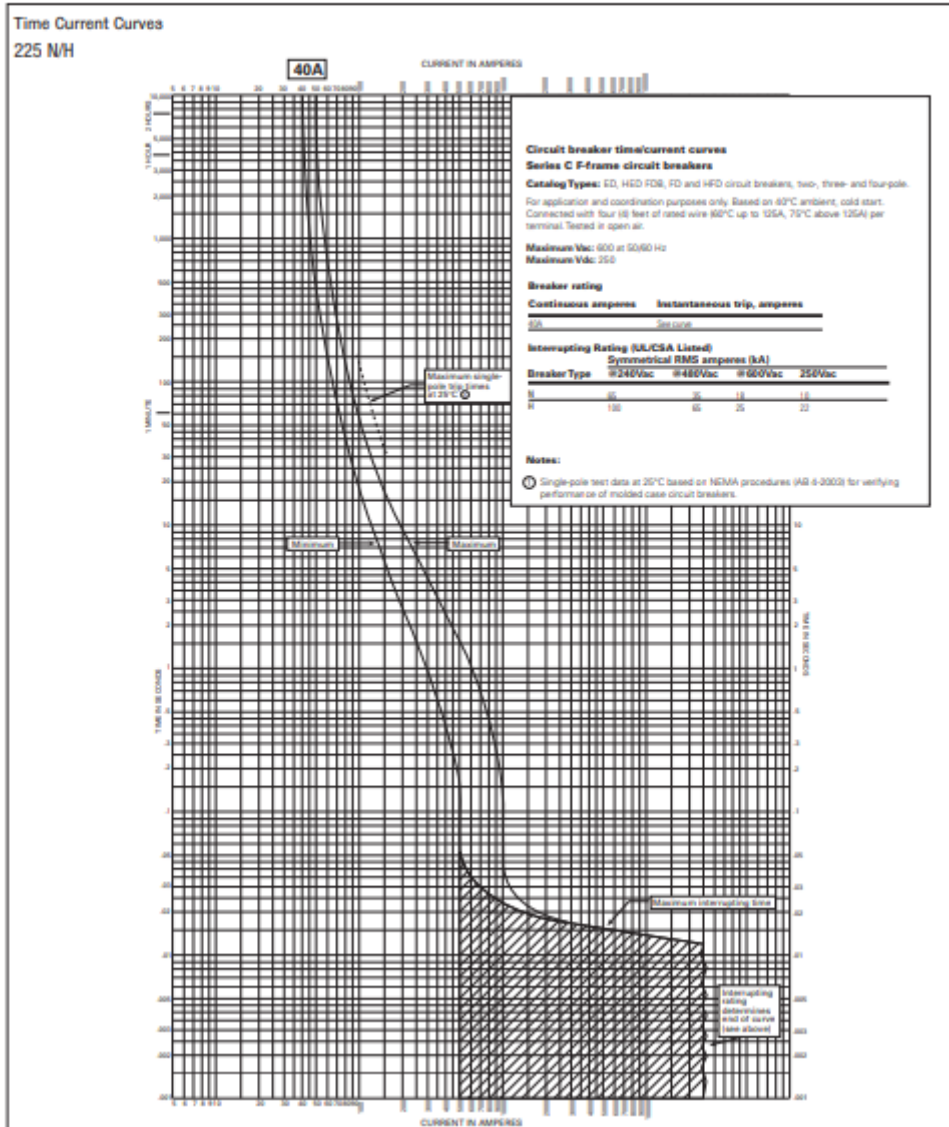
Disclaimer: This document contains no warranty or liability for the accuracy of the information provided. It is intended for reference only and should not be used for any specific application without the approval of a qualified professional.



Fuente: Schneider Electric [17]

ANEXO 10

Molded-Case Circuit Breakers



Fuente: WEG [18]