



Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
Dr. Antonio Núñez Jiménez
Facultad Metalurgia-Electromecánica

Trabajo de Diploma en Opción al Título de Ingeniero Eléctrico

*Título: Caracterización del Motor de Inducción. Su influencia
en el reactivo de la industria.*

Autor: Yanet Silega Almenares.

**Tutores: M.Sc. Ignacio Romero Rueda.
Ing. Rodelbis Justiz Peña.**

Moa 2009-2010



Declaración de Autoridad

Yo: Yanet Siega Almenares.

Autora de este Trabajo de Diploma junto con el M.Sc. Ignacio Romero Rueda y el Ing. Rodelbis Justiz, certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, el cual podrá hacer uso del mismo para fines docentes y educativos.

Yanet Silega Almenares
(Diplomante)

M.Sc. Ignacio Romero Rueda.
(Tutor)

Ing. Rodelbis Justiz Peña
(Tutor)

AGRADECIMIENTOS

Agradezco ante todo y de manera muy especial a mi madre, mi padre y mis hermanos por haber estado presentes en todas las etapas de mi vida, a todos mis amigos que estuvieron cerca y al tanto de cuantos sucesos pasaron en mi vida y en general a todos mis familiares incluyendo a aquellos que ya no están y que hubiesen querido verme terminar mis estudio.

Agradezco además al Msc. Ignacio Romero Rueda por su paciencia, apoyo y comprensión mostrada en el trayecto de estos cinco años de formación como profesionales.

Agradezco al Comandante en Jefe Fidel Castro Ruz por posibilitarnos estudiar en una revolución socialista donde el estudio es prioridad de toda persona y sin pedir nada más a cambio que el compromiso de ser cultos cada día más.

Y agradezco a Dios por abrirme cada puerta que se interpuso en mi camino.

A Todos ustedes les Agradecemos..... Muchas Gracias

DEDICATORIA

Le dedico este logro a mis abuelos, en especial a Nieves, a mis hermanos Luis Angel y Yula, a mi mamá Niceida y ami papá Rogelio, en fin, a todos mis seres queridos.

PENSAMIENTO

Presencia de ánimo y valor en la adversidad valen para conquistar el éxito más que un ejército.

John Dryden

RESUMEN

En este trabajo se hace referencia al comportamiento del motor de inducción en la industria y a su influencia en el factor de potencia. El estudio de la máquina de inducción se hace de suma importancia debido a su alta representatividad a escala industrial, es decir, representan del 60-65% de la carga total de una industria. Debido a sus características, es decir, si no son bien ubicados y se encuentran sub-cargados, lo que ocurre con frecuencia, estos se convierten en grandes consumidores de reactivo, lo que afecta de una forma muy severa a las industrias porque posibilitan en general una penalización y una alta facturación mensual por el alto consumo de corriente y por consiguiente una disminución considerable del reactivo. Por tal motivo, se hace necesario profundizar cada día más en el estudio de los motores asíncronos y su comportamiento en los sectores industriales.

SUMMARY

Into this work he makes reference to the behavior of the motor of induction at the industry and to his influence in the factor of potency. The study of the machine of induction becomes of utmost importance due to his high representativeness to scale industrial, that is, they represent of the % of 60-65 the total load of an industry. Due to his characteristics, that is, if not they are bien located and they find sub loaded, that occurs frequently, these become large consumers of reagent, that affects of a very severe form to the industries because make possible in general a penalization and I consume a high monthly invoicing for the height of current and consequently a considerable decrease of the reagent. For such motive, goeing into more every day the study of the asynchrone motors and his behavior in the industrial sectors becomes necessary.

ÍNDICE

Introducción general	VIII
Capítulo I. Aspectos teóricos prácticos del funcionamiento del MI.	1
I.1 Aspectos teóricos.	2
I.1.1 Tipos de motores más comunes.	2
I.2 Universo tecnológico en motores eléctricos.	3
I.2.1 Partes fundamentales del motor de inducción.	3
I.3 Datos nominales y sus tolerancias.	4
I.3.1 Consideraciones energéticas en el motor de inducción trifásico.	8
I.4 Ventajas de mejorar el factor de potencia.	9
I.4.1 Métodos de corrección del factor de potencia.	13
I.5 Categorías y valores mínimos normalizados.	17
I.5.1 Valores máximos normalizados.	18
I.6 Conclusiones Capítulo I.	19
Capítulo II. La potencia reactiva en el motor de inducción.	20
II.1 Introducción a la temática desarrollada.	21
II.2 Factores de los cuales depende la energía reactiva en los MI.	21
II.2.1 Circulación de potencia reactiva en las líneas.	21
II.2.2 Factores de los que depende el consumo de reactivo	22
II.3 Cálculo de la potencia reactiva necesaria para corregir el factor de potencia.	28
II.4 Compensación de la potencia reactiva de la carga asincrónica.	29
II.4.1 Equipos compensadores.	32
II.5 Influencia de la tensión en la mejora del factor de potencia en los MI.	34
II.6 Algoritmo de la investigación.	35
II.7 Conclusiones Capítulo II.	36
Capítulo III. Análisis de resultados.	37
III.1 Introducción al análisis de los resultados.	38
III.2 Análisis de los resultados.	38
III.3 Influencia del bajo factor de potencia sobre algunos parámetros del motor.	39
III.4 Determinación de la capacidad a instalar para lograr aumentar el factor de potencia hasta 0.94.	40
III.5 Técnica de análisis de la influencia de la capacidad a través del software MATLAB.	42
III.6 Influencia del tipo de compensación en las pérdidas en el sistema.	46
III.7 Conclusiones Capítulo III.	57
Conclusiones generales	58
Recomendaciones	59
Bibliografías	60
Anexos	61

Introducción

Introducción General

La energía eléctrica está completamente vinculada a las principales actividades del hombre moderno. La misma llega a los consumidores mediante un proceso de generación, transmisión y distribución.

La importancia de la energía eléctrica en la economía nacional, crece continuamente. La electrificación de las industrias, el transporte, la agricultura y otros sectores relacionados con la forma de vida de la población, condicionan la necesidad de aplicación de varios equipos electrotécnicos; entre ellos las máquinas eléctricas. Estas sirven para transformar la energía eléctrica en mecánica y viceversa, además para la transformación de un tipo de energía eléctrica en otro.

Entre estas máquinas se encuentran los generadores, los motores eléctricos y transformadores.

En relación con el tipo de corriente las máquinas se clasifican en máquinas de corriente alterna y máquinas de corriente directa.

Los planes de desarrollo de nuestra economía prevén el incremento incesante de la producción de energía, por lo que no solo la población debe contribuir al ahorro de la misma; también las empresas tendrán el compromiso de consumir la energía eléctrica de la forma más eficiente posible.

Para lograr que en una industria se alcancen altos niveles de eficiencia se deberá tener en cuenta todos los equipamientos presentes en la instalación.

De acuerdo a estudios realizados en países tanto desarrollados como del tercer mundo, se ha podido comprobar que entre el 40% y el 60% del consumo total de energía eléctrica en el mundo corresponde a los motores de inducción trifásicos. Esta realidad, unida a la crisis energética que comenzó en los años 70 del pasado siglo, ha hecho que los fabricantes de motores más importantes del mundo hayan desarrollado nuevos tipos de máquinas con características de diseño dirigidas a lograr altas eficiencias y un consumo de potencia reactiva razonable. Por otra parte, en muchos países desarrollados se han aprobado ya leyes energéticas que obligan a los usuarios a utilizar motores con determinado valor de eficiencia mínima de acuerdo a la potencia, la velocidad y factor de potencia.

En nuestro país esta situación es muy poco conocida y en casi ningún caso al solicitar una oferta de motores se tiene en cuenta este hecho, sino solamente el del costo inicial sin tener en cuenta el hecho de que el costo extra se paga casi siempre en un período menor de tres años, muy inferior al tiempo de vida útil de los motores que esta alrededor de los 20 años en condiciones normales. Por otra

parte, en numerosos casos, los motores de inducción trifásicos trabajan en condiciones de carga muy por debajo de la nominal y de tensión diferente a la nominal o incluso desbalanceada, provocando esto un consumo adicional de energía además de la posible disminución de su vida útil y disminuyendo considerablemente el factor de potencia en la industria o taller donde esté ubicado.

En este trabajo se analizará la influencia del motor de inducción con rotor en jaula de ardilla, ya que son ellos los mayores consumidores de potencia reactiva y si se pretende tener una buena eficiencia en la industria habrá que actuar sobre estos.

Situación Problemática.

El desconocimiento a escala industrial del comportamiento e incidencia del motor de inducción en la carga de la industria.

Hipótesis.

Si se tiene el dominio de la incidencia del motor de inducción en la industria, se pueden mejorar los indicadores del factor de potencia, y conocer las variaciones que afectan la producción por parte del motor de inducción.

Objetivo general.

- Caracterizar la influencia del motor de inducción en la industria.

Objetivos particulares.

- Describir el comportamiento del motor de inducción bajo determinadas condiciones; normales y asimétricas.
- Desarrollar una metodología para determinar la incidencia que puede ocasionar el motor de inducción en el consumo de reactivo de una industria.
- Analizar los resultados aplicado a un caso típico.

Debe señalarse que la disminución del factor de potencia posibilita también un menor consumo de energía eléctrica, da lugar también a una menor emisión de gases contaminantes a la atmósfera, lo cual puede ser cuantificado y es un importante aporte a la ecológica.

Tareas de investigación

1. Realización del estudio del arte en la temática de caracterización de motores de inducción.
2. Valoración de las consideraciones energéticas de motores de inducción.
3. Utilización de métodos de corrección del factor de potencia.

Aportes principales del trabajo

- Estimación de los parámetros del motor de inducción.
- Evaluar el potencial de ahorro asociado al consumo de potencia reactiva del motor de inducción y los beneficios económicos que esto reportaría.

Metodología de la investigación

La investigación partió de la toma de datos nominales a los motores analizados en la UEB de Maquinado ubicada en la Empresa Mecánica del Níquel Gustavo Machín Hoed de Beche. Luego, auxiliándonos del Software MATLAB, se obtuvieron los valores característicos propios de cada motor los cuales servirán para establecer los resultados. Pasadas estas etapas se realiza una evaluación del potencial de ahorro asociado principalmente la incidencia y mejora del factor de potencia.

Capítulo I



Capítulo I. ASPECTOS TEÓRICOS PRÁCTICOS DEL FUNCIONAMIENTO DEL MI.

I.1 Aspectos teóricos.

I.1.1 Tipos de motores más comunes.

I.2 Universo tecnológico en motores eléctricos.

I.2.1 Partes fundamentales del motor de inducción.

I.3 Datos nominales y sus tolerancias.

I.3.1 Consideraciones energéticas en el motor de inducción trifásico.

I.4 Ventajas de mejorar el factor de potencia.

I.4.1 Métodos de corrección del factor de potencia.

I.5 Categorías y valores mínimos normalizados.

I.5.1 Valores máximos normalizados.

I.6 Conclusiones Capítulo I.

I.1. ASPECTOS TEÓRICOS.

En este capítulo se abordan los fundamentos teóricos que sustentan como ha ido evolucionando el empleo de las máquinas en general, y en particular el empleo del Motor de Inducción a partir de los cuales se pretende explicar y fundamentar las posiciones teóricas que se asumen como premisas para darle solución al problema planteado, de igual forma se realiza una descripción de las teorías científicas que sustentan los pasos seguidos durante el proceso investigativo.

El motor eléctrico de inducción es una máquina destinada a transformar energía eléctrica en mecánica. Es el más usado de todos los tipos de motores, ya que combina las ventajas de la utilización de la energía eléctrica, bajo costo, facilidad de transporte, limpieza simplicidad de comando, construcción simple, costo reducido, gran versatilidad de adaptación a las cargas más diversas por la fortaleza de su estructura y la sencillez de sus mantenimientos y mejores rendimientos.

I.1.1. Tipos de motores más comunes.

➤ Motores de corriente continúa:

Son motores de costo elevado además precisan de una fuente de corriente continua o un dispositivo que convierta la corriente alterna común en continua. Pueden funcionar con velocidad ajustable entre amplios límites y se prestan a controles de gran flexibilidad y precisión. Por eso su uso es restringido a casos especiales en que estas exigencias compensan el costo mucho más amplio que la instalación.

➤ Motores de corriente alterna:

Son los más utilizados, porque la distribución de energía eléctrica es hecha normalmente en corriente alterna. Los principales tipos son:

Motor sincrónico: Funciona con velocidad fija; utilizado solamente para grandes potencias (debido a su alto costo en tamaños menores o cuando se necesita de velocidad invariable).

Motor de inducción: Funciona normalmente con una velocidad constante que varía ligeramente con la carga mecánica aplicada al eje. Debido a su gran simplicidad, robustez y bajo costo, es el motor más utilizado, siendo adecuado para casi todos los tipos de máquinas y accionamientos que se encuentran en la práctica.

I.2. UNIVERSO TECNOLÓGICO EN MOTORES ELÉCTRICOS.

En el mismo aparecen todos los tipos de motores para contribuir al conocimiento de las máquinas, y de manera sencilla poder observar a cual es la clasificación de cada uno de las máquinas representadas. Ver anexo 1.

Debido a que el motor de inducción representa alrededor del 60-70% de los motores eléctricos utilizados en la industria, centraremos nuestra atención en el estudio de su comportamiento en la industria para garantizar un mejor funcionamiento del mismo y una mejor eficiencia operativa.

I.2.1. Partes fundamentales del motor de inducción.

El motor de inducción trifásico está compuesto fundamentalmente por dos partes:

➤ **Estator:**

Carcaza: Es la estructura soporte del conjunto; de construcción robusta en hierro fundido, acero o aluminio inyectado resistente a la corrosión y en la mayoría de los casos presenta aletas para su refrigeración.

Núcleo de chapas: Las chapas son de acero magnético tratadas térmicamente para reducir al mínimo las pérdidas en el hierro del estator.

Bobinado trifásico: Tres conjuntos iguales de bobinas una para cada fase, formando un sistema trifásico conectado a la red de alimentación.

➤ **Rotor:**

Eje: Transmite la potencia mecánica desarrollada por el motor. Es tratado térmicamente para evitar problemas como deformación y fatiga producto a su alto par de arranque o a la carga acoplada a este.

Núcleo de chapas: Las chapas poseen las mismas características que las del estator, es decir, son de acero magnético tratadas térmicamente para reducir al mínimo las pérdidas en este.

Barras y anillos de cortocircuito: Son de aluminio, fundidos a presión en única pieza.

Otras partes del motor de inducción trifásico:

- Tapas
- Ventilador
- Protección del ventilador
- Caja de conexiones
- Placas de bornes
- Rodamientos

Lo característico del motor de inducción de rotor en jaula es que solo el estator es conectado a la red de alimentación. El rotor no es alimentado externamente y las corrientes que circulan en él, son inducidas electromagnéticamente por el estator de donde surge el nombre de motor de inducción.

I.3. DATOS NOMINALES Y SUS TOLERANCIAS.

Tensión nominal: Es la tensión para la cual el motor fue diseñado. Según la norma IEC 34 -1(item 12.3), el motor eléctrico de inducción debe ser capaz de funcionar de manera satisfactoria cuando se alimenta con tensiones hasta 10% por encima o debajo de su tensión nominal, siempre que la frecuencia sea nominal. Si hubiera simultáneamente variación en la frecuencia, la tolerancia de variación de la tensión es reducida de manera que la suma de las dos variaciones (tensión y frecuencia) no pase el 10%, el efecto aproximado de variación de tensión sobre las características del motor se muestran en la tabla 1.1.

Tabla 1.1. Efecto aproximado de variación la de tensión.

Desempeño del motor	Tensión 20 % por encima de la nominal	Tensión 10 % por encima de la nominal	Tensión 10 % abajo de la nominal
Par de arranque y par máximo	aumenta 44%	aumenta 21%	disminuye 19 %
Corriente de arranque	aumenta 25%	aumenta 10 a 12 %	disminuye 10 a 12 %
Corriente a plena carga	disminuye 11%	disminuye 7 %	aumenta 11%
Deslizamiento	disminuye 30 %	disminuye 17 %	aumenta 23 %
Velocidad	aumenta 1,5%	aumenta 1 %	disminuye 1,5 %
Rendimiento	aumento pequeño	aumenta 1 %	disminuye 2 %
Factor de potencia	disminuye 5 a 15%	disminuye 3%	aumenta 1%
Temperatura	disminuye 5 0C	disminuye 3 0C	aumenta 6 0C
Ruido magnético	aumento perceptible	aumento ligero	disminución ligera

Potencia nominal: Es la potencia que el motor puede entregar dentro de sus características nominales en régimen continuo.

El concepto de potencia nominal, o sea, la potencia que el motor puede entregar, está íntimamente ligado a la elevación de temperatura del bobinado. Sabemos que el motor puede accionar cargas de potencia muy por encima de su potencia nominal hasta casi alcanzar el par máximo. Pero lo que sucede es que si esta sobrecarga fuera excesiva, es decir, si le exigiera al motor una potencia muy por encima de aquella para la cual fue proyectado, el calentamiento normal sería sobrepasado y la vida del motor disminuiría, pudiendo incluso quemarse rápidamente por el desgaste del aislamiento producto de temperaturas altas por tiempo prolongado.

Siempre se debe tener en cuenta que la potencia exigida al motor es definida por la característica de la carga, independientemente de la potencia del motor por lo que siempre se debe de tener un coeficiente de seguridad a la hora de seleccionar un motor.

Corriente nominal: Es la corriente que el motor absorbe de la red cuando funciona a potencia nominal, bajo tensión y frecuencia nominales. El valor de la corriente nominal depende del rendimiento (η) y del factor de potencia ($\cos\phi$) del motor:

$$I_n = \frac{P(kW) \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \eta \cdot \cos\phi} \quad (1.1)$$

Rendimiento: El rendimiento depende del diseño y del tipo de motor, siendo su valor influenciado por la porción de energía eléctrica transformada en energía mecánica y por lo tanto por las pérdidas (eléctricas y mecánicas) que se presentan y que en definitiva son obtenidas por la diferencia entre la potencia entregada y la recibida.

Existen dos métodos principales para la determinación del rendimiento: por suma de pérdidas (indirecto) y por cálculo directo.

En el caso de valores garantizados la norma IEC 34-1 (item 12.3) permite las siguientes tolerancias.

Por suma de pérdidas:

Motores de potencia igual o inferior a 75 Hp

$$-0.15 \cdot (1 - \eta)$$

Motores de potencia nominal superior a 75 Hp

$$-0.10 \cdot (1 - \eta)$$

b) Por cálculo directo:

$$-0.15 \cdot (1 - \eta)$$

Es importante que el motor tenga un rendimiento alto por dos motivos:

Primero: porque un rendimiento alto significa pérdidas bajas y por lo tanto menos calentamiento del motor.

Segundo: porque cuanto mayor es el rendimiento menor es la potencia absorbida de la línea de alimentación y menor el costo de energía eléctrica a pagar en las cuentas mensuales.

Factor de potencia: Un motor no consume solo potencia activa, luego convertida en trabajo mecánico, sino también potencia reactiva necesaria para la magnetización.

En el diagrama el vector (P) representa la potencia activa y el vector (Q) representa la potencia reactiva que sumadas resultan (S).

La relación entre potencia activa medida en kW y la potencia aparente medida en kVA se llama factor de potencia.

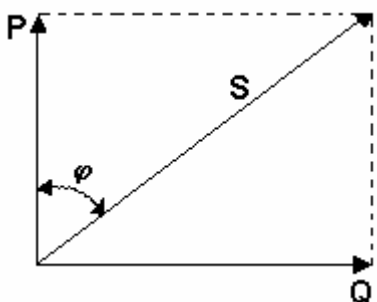


Fig. 1.1. Diagrama de potencia.

El cambio del factor de potencia da una mayor disponibilidad de potencia activa en el sistema ya que la energía reactiva limita la capacidad de transporte útil.

El motor de inducción es fundamental, pues en las industrias representan más del 60% del consumo de energía. Lógicamente es imprescindible la utilización de motores con potencia y características bien adecuadas a su función. El factor de potencia varía con la carga del motor por lo que se hace necesario realizar una buena selección de los mismos en dependencia de la carga que accionarán.

Deslizamiento: Si el motor gira a una velocidad diferente a la velocidad sincrónica, o sea, diferente a la velocidad del campo giratorio, el bobinado del rotor corta las líneas de fuerzas magnéticas del campo y, por las leyes de electromagnetismo, en él circularán corrientes inducidas.

Cuanto mayor sea la carga mayor tendrá que ser el par necesario para moverla. Para obtener el par necesario, tendrá que ser mayor la diferencia de velocidades para que las corrientes inducidas y los campos producidos sean mayores. Por lo tanto, a medida que la carga aumenta, decae la velocidad del motor.

Cuando la carga es nula (motor en vacío), el motor gira prácticamente con la velocidad sincrónica. La diferencia entre la velocidad del rotor (n) y la velocidad del campo (n_s) se llama deslizamiento (s), que puede ser expresado en rev/min o rpm. como una fracción de la velocidad sincrónica o como un porcentaje de esta.

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (1.2)$$

Frecuencia: La frecuencia nominal es la de la red para la cual el motor fue proyectado.

Según la norma IEC 34-1 (ítem 12.3) el motor eléctrico de inducción debe ser capaz de funcionar satisfactoriamente con frecuencias hasta 5% por encima o debajo de su frecuencia nominal. Si al

mismo tiempo hubiera variación de tensión, debe ser tal que la suma de las dos variaciones (frecuencia y tensión) no pase de 10%.

Para el análisis del motor de inducción cobra gran importancia los circuitos equivalentes y las ecuaciones que de él se derivan.

I.3.1. Consideraciones energéticas en el motor de inducción trifásico.

De la potencia eléctrica total consumida por un motor eléctrico de la red, la mayor parte es entregada al mecanismo accionado siendo aprovechada. Una parte se pierde dentro del motor, como consecuencia de los procesos electromagnéticos que se llevan a cabo en su interior, convirtiéndose en calor y tiene dos efectos negativos: aumentar el consumo de energía eléctrica del motor y elevar la temperatura del aislamiento de la máquina disminuyendo su vida útil si sobrepasa un límite. El objetivo del trabajo es precisamente determinar el consumo con el objetivo de analizar las posibles medidas a tomar para disminuirlo y aumentar la eficiencia energética de las industrias.

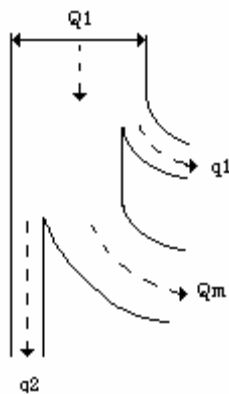


Fig.1.2. Diagrama de conversión de potencia reactiva en una máquina asíncrona.

La parte fundamental de la potencia reactiva le corresponde a Q_m , la cual debido a la presencia del entrehierro y a la gran corriente magnetizante I_m , es considerablemente mayor que en los transformadores. Las magnitudes tan grandes de Q_m e I_m , influyen en el factor de potencia del motor y disminuyen su magnitud.

I.4. VENTAJAS DE MEJORAR EL FACTOR DE POTENCIA.

Las ventajas de mejorar el factor de potencia de una instalación son la siguiente:

- Reducción de la factura eléctrica.
- Liberación de capacidad en el sistema.
- Reducción de las pérdidas de potencia y energía en el sistema.
- Mejoramiento de las condiciones de tensión en el sistema.

El uso principal de los capacitores en la industria y a menudo el factor determinante para emplear motores sincrónicos en una instalación, es la presencia en la tarifa eléctrica de una penalización por bajo factor de potencia.

Es común para inversiones de capacitores, que estas se paguen en plazos muy pequeños 0,5 - 3 años para aquellos de 460 – 575 V; ó 2 – 6 años para capacitores de 230 V, solo por concepto del ahorro obtenido con la eliminación de la penalización por bajo factor de potencia.

El efecto en la factura de un incremento del factor de potencia puede ser considerable si el factor de potencia inicial es inferior al 90%. Por lo general, para tomar plena ventaja de la bonificación, se acostumbra compensar hasta un factor de potencia cercano al 96% (que es el máximo posible a bonificar), aunque siempre una decisión final debe estar acompañada de un adecuado análisis económico.

Liberación de la capacidad del sistema:

Cuando los capacitores o motores sincrónicos están operando, ellos suministran los requerimientos de potencia reactiva de la carga y reducen la corriente circulante desde la fuente hasta el punto de ubicación de los compensadores. Menos corriente significa menor carga en kVA para generadores, transformadores, cables, etc.

Por lo tanto, los medios compensadores pueden utilizarse para reducir la sobrecarga de los circuitos; o, si estos no están sobrecargados, permitir el incremento de su capacidad de carga.

Por ejemplo, un conductor que está entregando una carga P a $\cos\phi_i$, ve una reducción de la corriente si el factor de potencia de la carga se incrementa a $\cos\phi_2$:

$$kVA_1 = \frac{P}{\cos \varphi_1} \quad kVA_2 = \frac{P}{\cos \varphi_2}$$

$$kVA_2 = kVA_1 \frac{\cos \varphi_1}{\cos \varphi_2}$$

Se define como capacidad térmica liberada por el incremento del factor de potencia, o simplemente, capacidad liberada, a la carga en kVA que puede ser añadida a la carga original a su mismo factor de potencia sin que se incremente la carga total en kVA del circuito.

La Figura 1.3, permite calcular el por ciento de la capacidad liberada en función del por ciento que representa la potencia reactiva de compensación con respecto a la carga inicial en kVA, y de acuerdo al factor de potencia original de dicha carga.

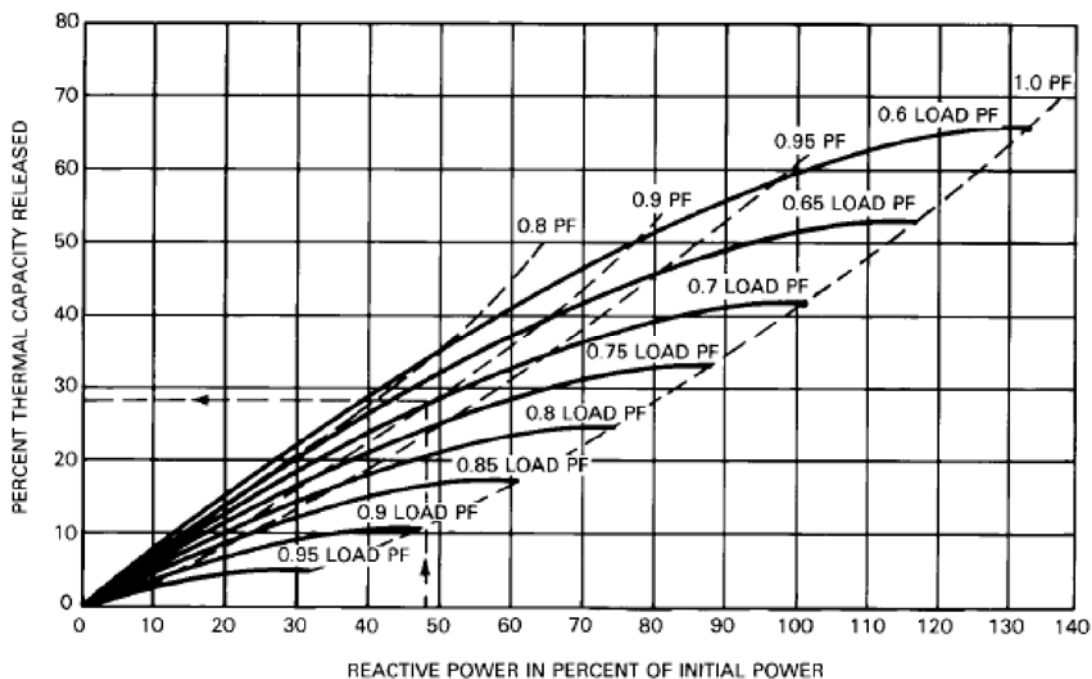


Figura 1.3. Por ciento de la capacidad liberada en función del por ciento de la potencia reactiva de compensación con respecto a la carga inicial en kVA, y de acuerdo con factor de potencia original.

Por ejemplo, un circuito con una carga original de 1000 kVA y factor de potencia 0.7, al instalarle un capacitor de 480 kVAr, libera una capacidad de 28.5%. Es decir que pueden añadirse 285 kVA de carga a factor de potencia 0.7, sin que la carga total supere los 1000 kVA. El factor de potencia resultante sería de 0.9.

Si se considera que la carga original del circuito es P_1 y Q_1 y la carga final P_2 y Q_2 , pueden plantearse las relaciones

$$\begin{aligned}P_2 &= P_1 + Tc \cos \varphi_1 \\Q_2 &= Q_1 + Tc \sen \varphi_1 - Qc\end{aligned}$$

donde Tc es la capacidad liberada (thermal capacity) (kVA) y Qc la potencia reactiva de compensación (kVAr).

Como la potencia aparente inicial tiene que ser igual a la final, se tiene que:

$$P_1^2 + Q_1^2 = P_2^2 + Q_2^2$$

De esta forma, pueden obtenerse la capacidad liberada Tc para un capacitor dado, o el capacitor necesario para lograr determinada liberación de capacidad por las siguientes expresiones:

$$Tc = -(P_1 \cos \varphi_1 + (Q_1 - Qc) \sen \varphi_1) + \sqrt{(P_1 \cos \varphi_1 + (Q_1 - Qc) \sen \varphi_1)^2 - (Qc^2 - 2Q_1 Qc)} \quad (\text{kVA})$$

$$Qc = (Q_1 + Tc \sen \varphi_1) + \sqrt{(Q_1 + Tc \sen \varphi_1)^2 - [Tc^2 + 2Tc(P_1 \cos \varphi_1 + Q_1 \sen \varphi_1)]} \quad (\text{kVAr})$$

La evaluación económica de la compensación de reactivo por esta razón, debe comparar el costo de obtener la capacidad TC deseada mediante capacitores u otros medios con el incremento de la capacidad del circuito en la subestación y otras facilidades. Valores de orientación para esta evaluación se ofrecen en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2 Valores de orientación para la evaluación económica

Tensión del sistema (V)	Costo S subestación y facilidades (USD/kVA)	Costo C de capacitores (USD/kVA)	Relación S/C
240	40 - 50	18 - 20	2 - 2.8
480	30 - 40	8-10	3 - 5
600	25 - 35	8 - 10	2.5 - 4.4

Esto demuestra que en muchos casos es más barato liberar capacidad compensando el reactivo, que incrementando la capacidad de la subestación y otras facilidades.

Reducción de pérdidas:

En la mayoría de las instalaciones, las pérdidas de energía en el sistema de distribución representan entre el 2.5 — 7.5% de la energía consumida por las cargas. Esto depende de la variabilidad de las cargas, el calibre y longitud de los circuitos, etc.

Los medios compensadores solo pueden reducir la parte de las pérdidas debida a la circulación de la potencia reactiva.

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{V^2} R = \left(\frac{P}{V}\right)^2 R + \left(\frac{Q}{V}\right)^2 R = \Delta P_p + \Delta P_q \quad (W)$$

Las pérdidas varían al compensar la potencia reactiva con, por ejemplo, un capacitor de magnitud Q_c :

$$\Delta P_2 = \frac{P^2 + (Q - Q_c)^2}{V^2} R \quad (W)$$

El ahorro de pérdidas depende de:

$$\Delta P_1 - \Delta P_2 = \left(\frac{P^2 + Q^2}{V^2} - \frac{P^2 + (Q - Q_c)^2}{V^2} \right) R = \frac{Q_c(2Q - Q_c)}{V^2} R \quad (W)$$

Las pérdidas en un circuito son proporcionales al cuadrado de la corriente, por lo que un cambio en el factor de potencia cos ϕ , a cos ϕ_2 provoca una variación de las pérdidas:

$$\Delta P_2 = \Delta P_1 \left(\frac{I_2}{I_1} \right)^2 = \Delta P_1 \left(\frac{P / (\sqrt{3} V \cos \phi_2)}{P / (\sqrt{3} V \cos \phi_1)} \right)^2 = \Delta P_1 \left(\frac{\cos \phi_1}{\cos \phi_2} \right)^2 \quad (W)$$

Entonces, el ahorro de pérdidas es:

$$\Delta P_1 - \Delta P_2 = \Delta P_1 - \Delta P_1 \left(\frac{\cos \phi_1}{\cos \phi_2} \right)^2 = \Delta P_1 \left(1 - \left(\frac{\cos \phi_1}{\cos \phi_2} \right)^2 \right) \quad (W)$$

En el caso general en que se conectan un conjunto de bancos de capacitores en diferentes nodos del sistema eléctrico, el ahorro en las pérdidas depende del efecto de todos los bancos y no puede separarse por cada uno de ellos.

Mejoramiento de las condiciones de tensión:

Evidentemente, si la caída de tensión en un elemento serie depende de:

$$\Delta V \approx \frac{RP + XQ}{V} \quad (V)$$

Una variación de la potencia reactiva de la carga repercute en una disminución de la caída de tensión

$$\Delta V_2 \approx \frac{RP + X(Q - Q_c)}{V} = \Delta V_1 - \frac{X Q_c}{V} \quad (V)$$

De esta forma, la conexión de medios compensadores al circuito, siempre incrementa los niveles de tensión en los nodos. Por esto, debe chequearse que la tensión no crezca excesivamente. Sin embargo, la elevación experimentada en plantas industriales con el uso de capacitores, rara vez supera el 4 — 5%, por lo que no es un problema que limite el uso de esta importante medida de ahorro.

I.4.1. Métodos de corrección del factor de potencia.

El mejoramiento del factor de potencia en la industria o los servicios, sólo puede ser alcanzado a través de la correcta combinación de diferentes medios para su elevación, cada uno de los cuales debe ser técnica y económicamente fundamentado. Los medios para la elevación del factor de potencia pueden ser considerados dentro de los grupos generales siguientes:

Reducción del consumo de potencia reactiva, sin la aplicación de medios compensadores.

Con la aplicación de medios compensadores.

En primer lugar deben considerarse los medios para la reducción sin utilizar medios compensadores, por cuanto para su ejecución, no se requieren grandes inversiones capitales.

Algunos de ellos son:

- Ordenamiento del proceso tecnológico.
- Sustitución de los motores asíncronos subcargados, por otros de menor potencia.
- Reducción del voltaje de los motores que sistemáticamente trabajan con poca carga.
- Limitación del trabajo de los motores en vacío.
- Elevación de la calidad de las reparaciones de los motores.
- Aplicación de medios compensadores.

Ordenamiento del proceso tecnológico:

La sola aplicación de medidas organizativas del proceso de producción puede significar un efecto considerable en la elevación del factor de potencia, siempre que ellas sean encaminadas al mejoramiento del régimen de trabajo eléctrico de la instalación. La coincidencia innecesaria en el proceso productivo de actividades que implican algún grado de subutilización de los equipos eléctricos (que por lo general son evitables), conducen a un mayor consumo de energía eléctrica y, casi siempre, a un empeoramiento del factor de potencia.

Sustitución de los motores asíncronos subcargados por otros de menor potencia:

Los motores que operan con bajas cargas disminuyen su factor de potencia. En la Figura 1.5 se tiene una curva característica para un motor estándar de jaula de ardilla trifásico, de 1800 rpm. Nótese cómo el factor de potencia decrece sensiblemente para cargas por debajo del 50 % de su potencia nominal.

Por esto, es importante adecuar la capacidad de los motores a sus cargas reales y evitar su operación prolongada en vacío. Desde luego, siempre se requerirá de un adecuado análisis técnico económico de cualquier medida de sustitución de motores en operación, que deberá incluir la valoración de los costos de mejorar el factor de potencia con el uso de medios compensadores, sin sustituir el motor.

Figura 1.4. Curvas típicas de motores trifásicos asíncronos estándar, donde se observa la variación del factor de potencia con respecto a la velocidad sincrónica y la potencia del motor en hp.

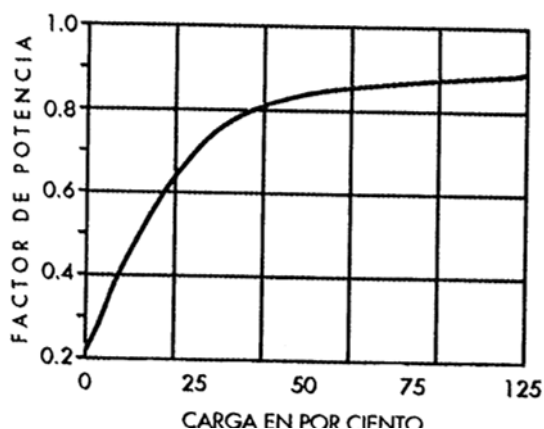
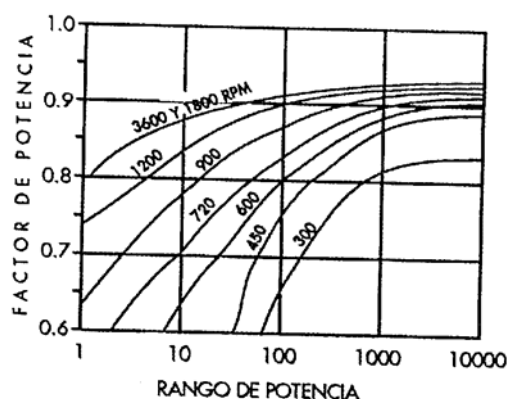


Figura 1.5. Variación del factor de potencia con la carga de un motor asíncrono.

Sustitución de motores asíncronos por motores sincrónicos:

Puede ser ésta una interesante medida para la elevación del factor de potencia y, por ende, para la reducción de las pérdidas; pero debe tenerse en cuenta que ello sólo es posible en aquellos casos en que las condiciones del proceso tecnológico así lo permitan y de que se cumplan determinados requisitos. Se llegan a justificar cuando se requieren motores nuevos y de tamaño considerable con respecto a la instalación, bajas velocidades de carácter constante y cargas poco variables. Siempre se requiere de un análisis económico para evaluar la decisión a tomar. Más adelante se volverá sobre este asunto.

Elevación de la calidad de la reparación de los motores:

Una reparación deficiente, puede provocar (entre otras cosas) una disminución del factor de potencia en los motores, debido al incremento de la corriente en vacío. Además, defectos en la reparación pueden producir desbalances y otros fenómenos que reducen el factor de potencia y provocan un incremento de las pérdidas. Es necesario que la reparación se realice en talleres que apliquen los procedimientos adecuados y que la efectúe personal calificado, para garantizar la calidad.

Aplicación de medios compensadores:

Usualmente no resultan suficientes las medidas que permiten mejorar el factor de potencia sin emplear medios compensadores y entonces, resulta necesario utilizar equipos auxiliares para corregirlo. Estos equipos de naturaleza capacitiva, toman una corriente en adelanto con respecto a la tensión, que se opone a la corriente inductiva de las cargas de la instalación.

La manera de mostrar el efecto descrito es a través de las relaciones de potencia. En la Figura 1.6 se observa cómo la potencia reactiva capacitiva $kVAR_C$, reduce el requerimiento de potencia reactiva total ($kVAR_L - kVAR_C$), disminuyendo tanto el ángulo ϕ como la potencia aparente kVA .

Por ningún motivo se debe sobrecompensar la carga, ya que un exceso de $kVAR_C$ puede ser tan perjudicial como su defecto. En la práctica, principalmente por razones económicas, los $kVAR_L$ no se anulan totalmente, sino se les mantiene dentro de los valores que den los costos totales menores. La evaluación económica en cuanto a qué magnitud de los $kVAR_L$ debe compensarse, debe ser realizada empleando métodos de descuento.

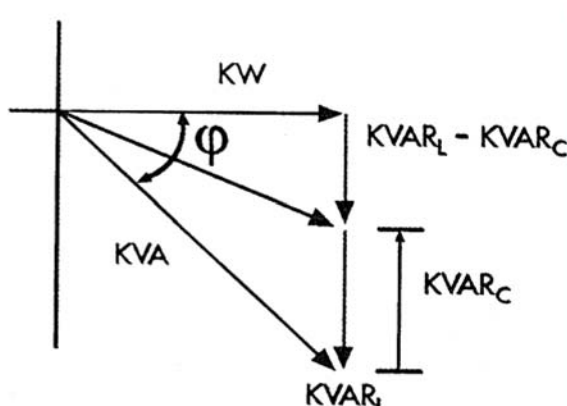


Figura 1.6. Efecto de los $kVAR_C$ sobre los $kVAR_L$ en una instalación Equipos compensadores de potencia reactiva

I.5. CATEGORÍAS Y VALORES MÍNIMOS NORMALIZADOS.

De acuerdo a las características del par en relación a la velocidad y corriente en el arranque los motores trifásicos de inducción con rotor de jaula de ardilla son clasificados en categorías, cada una adecuada a un tipo de carga.

Estas categorías son definidas por norma (IEC 34-12) y son las siguientes:

Categoría N: Estos motores presentan par de arranque normal, corriente en el arranque normal, bajo deslizamiento. Constituyen la mayoría de los motores encontrados en el mercado y se prestan para ser utilizados moviendo cargas normales como son bombas, máquinas operatrices, ventiladores.

Categoría H: Estos se caracterizan por poseer par de arranque alto, corriente de arranque normal, bajo deslizamiento. Usados para cargas que exigen mayor par de arranque como las zarandas, transportadores, cargadores, cargas con inercia alta, molinos etc.

Categoría D: Estos tienen un alto par de arranque, corriente de arranque normal, alto deslizamiento (más de 5%). Son usados en prensas excéntricas y máquinas similares, donde la carga presenta picos periódicos. También son usados en elevadores y cargas que necesitan un par de arranque muy alto y corriente de arranque limitada.

Categoría C: Estos presentan un deslizamiento a plena carga menor que el 5%, usualmente que los del diseño N. El torque de arranque es mayor que el de diseño N desde 200 a un 250% del torque nominal. El torque de ruptura es un por ciento poco menor que para el diseño N, y la corriente de arranque es aproximadamente igual que para la clase H. Estas características hacen el diseño C el más caro de las cuatro clases de diseño. Los motores clase C son usados para cargas difíciles de arrancar, tales como compresores de aire, bombas recíprocas, y de forma general son usados cuando hay demasiada carga.

En el anexo 2 y el anexo 3 se pueden observar los valores mínimos de par exigidos para los motores de categorías N y H (4, 6 y 8 polos).

Para los motores de categoría D, 4,6 y 8 polos y potencia nominal igual o inferior a 150 Hp. Según la norma NEMA M61-12.38.3, que: la razón entre el par con rotor bloqueado (M_{arr}) y el par nominal (M_n) no debe ser inferior a 2,7. La norma no especifica los valores (Mín) ni (Máx).

La norma IEC-12 no especifica los valores de par exigido para motores de dos polos categoría H

I.5.1. Valores máximos normalizados:

En el anexo 4 se indican los límites máximos de la corriente con rotor bloqueado en función de la potencia nominal del motor. Son válidas para cualquier cantidad de polos y están expresadas en términos de la potencia aparente absorbida con el rotor bloqueado en relación a la potencia nominal,

$$\frac{kVA}{Hp} \text{ o } \frac{kVA}{kW}.$$

KVA = Potencia aparente con rotor bloqueado

Potencia nominal

$$\frac{kVA}{Hp} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{arr} \cdot U}{P(Hp) \cdot 1000} \quad (1.43)$$

$$\frac{kVA}{kW} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{arr} \cdot U}{P(kW) \cdot 1000} \quad (1.44)$$

siendo:

I_{arr} : Corriente del rotor bloqueado.

U: Tensión nominal.

P: Potencia nominal.

Indicación de la corriente.

La indicación del valor de la corriente de rotor bloqueado en la placa de identificación del motor se fecha a través de la letra código normalizada que da la indicación de la faja de valores kVA/HP. Los valores correspondientes a esas letras del código de arranque se muestran en el anexo 5.

I.6. CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO I.

Se considera importante la realización del capítulo I con estas características, es decir que nos ayude a introducirnos en el mundo de las máquinas, a través del conocimiento de sus principales parámetros y sus tolerancias. En el mismo aparecen algunas de las ecuaciones y los circuitos equivalentes del motor de inducción, se hace referencia además a las pérdidas que aparecen en él como consecuencia del proceso de transformación de energía, se dan a conocer los momentos que tienen lugar durante el funcionamiento del motor de inducción, otros de los principales puntos que se abordan en este capítulo son el funcionamiento del motor con parámetros diferentes a los nominales y la influencia del motor en la carga activa de la industria, este último de gran importancia y será profundizado en el segundo capítulo, pues con un buen aprovechamiento de la potencia activa mejorará la eficiencia de la empresa.

Capítulo II

Capítulo II. La potencia reactiva en el motor de inducción.

II.1 Introducción a la temática desarrollada.

II.2 Factores de los cuales depende la energía reactiva en los MI.

II.2.1 Circulación de potencia reactiva en las líneas.

II.2.2 Factores de los que depende el consumo de reactivo.

II.3 Cálculo de la potencia reactiva necesaria para corregir el factor de potencia.

II.4 Compensación de la potencia reactiva de la carga asincrónica.

II.4.1 Equipos compensadores.

II.5 Influencia de la tensión en la mejora del factor de potencia en los MI.

II.6 Algoritmo de la investigación.

II.6 Conclusiones Capítulo II.

II.1. Introducción a la temática desarrollada.

Es conocido que la potencia eléctrica está formada por una componente activa y una reactiva, la primera es aquella que se convierte en una forma útil para su utilización, calor, luz, potencia mecánica de traslación o rotación, etc., la segunda la emplean los dispositivos magnéticos para crear campos magnéticos y constituye una energía que en medio ciclo se almacena y en el otro se disipa. Para que el motor de inducción funcione es necesario mantener el campo magnético giratorio, aún cuando este esté girando en vacío. Esto hace que se convierta en el consumidor de reactivo más importante de las instalaciones industriales.

Resulta de suma importancia el conocimiento de la influencia del reactivo en el consumo de corriente y en la variación de tensión, pues estas incidirán en las pérdidas eléctricas, magnéticas respectivamente y en la facturación mensual.

II.2. FACTORES DE LOS CUALES DEPENDE LA ENERGÍA REACTIVA EN LOS MI.

II.2.1. Circulación de potencia reactiva en las líneas.

La transmisión de una considerable cantidad de potencia reactiva a través de las líneas y transformadores de la red resulta desventajosa e indeseable por las siguientes razones:

1. Aparecen pérdidas de potencia activa adicionales en todos los elementos de suministro.
2. Aparecen pérdidas o caídas de voltaje adicionales.
3. La carga de las líneas y transformadores con potencia reactiva disminuye la capacidad de estos y requiere de medidas adicionales para su incremento (aumento de las secciones de los conductores de líneas aéreas y cables, aumento de la potencia nominal o número de transformadores, etc.).

Por esta y otras razones se hace necesario analizar la influencia del motor de inducción trifásico con rotor en jaula de ardilla, para compensar esta potencia y disminuir las pérdidas que aparecen por el exceso de su circulación.

II.2.2 Factores de los que depende el consumo de reactivo.

El consumo de energía reactiva del motor asincrónico trifásico depende de varios factores, entre ellos encontramos los siguientes:

- Coeficiente de carga.
- Dimensiones.
- Número de polos.
- Calidad de las reparaciones.
- Duración y frecuencia de arranque.
- Frecuencia de alimentación.

Coeficiente de carga del motor de inducción.

Durante el funcionamiento en vacío del motor de inducción éste consume energía reactiva para formar el campo magnético fundamental y los de dispersión. La relación entre la demanda reactiva y la activa es muy desfavorable a causa que solo usa la potencia para cubrir las pérdidas mecánicas de rotación y del núcleo o magnéticas.

Si se designa Q_0 como potencia reactiva en vacío y P_0 potencia activa de consumo en vacío $Q_0 \gg P_0$, esto hace que el ángulo de defasaje entre la corriente y la tensión, determinado por la impedancia del motor sea grande y el factor de potencia bajo. Este coeficiente da la medida de utilización de la potencia total para realizar trabajo útil.

La demanda de potencia reactiva a plena carga es mayor que en vacío, debido al aumento de la dispersión, esto hace que para mantener el campo magnético fundamental exige un incremento de la energía activa desde la fuente. La relación entre la potencia reactiva Q_n y la potencia activa P_n a plena carga es más favorable que en vacío, por lo que el ángulo de defasaje entre corriente y tensión es más pequeño y el factor de potencia más alto.

No significa en ningún momento que el motor en vacío consume más energía reactiva que a plena carga.

La demanda de potencia reactiva es característica para el factor de potencia nominal, con el cual fue diseñado el motor, así mismo el incremento del consumo de potencia reactiva por potencia activa es mayor para los de factores de potencias bajos y menor para los de factor de potencia alto.

Se puede plantear como dato de interés que el incremento de consumo de potencia reactiva a plena carga es aproximadamente de (20 a 30) % mayor que en vacío.

La figura 2.1 muestra la relación entre las potencias activas y reactivas en función de la carga del motor.

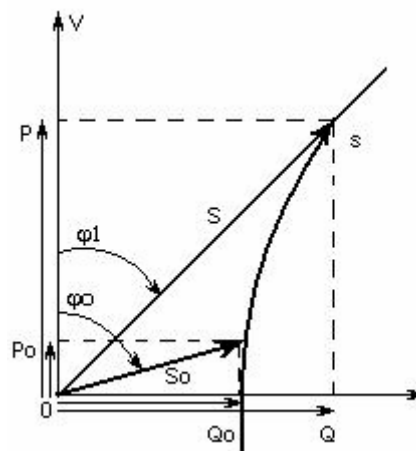


Fig.2.1. Diagrama vectorial que muestra la variación de la potencia en función de la carga.

Cálculo de la potencia reactiva según el nivel de carga.

La magnitud de la potencia reactiva consumida por los motores de inducción depende del coeficiente de carga y del factor de potencia nominal de este. Bajo tensión y carga nominales requieren una potencia reactiva dada por:

$$Q_n = \frac{P_n}{\eta_n} \cdot \tan(\phi_n) \quad (2.1)$$

donde:

η_n = Eficiencia del motor a plena carga.

Q_n = Potencia reactiva nominal del motor de inducción en VAr.

P_n = Potencia activa nominal del motor de inducción en W.

La potencia reactiva requerida por un motor de inducción en vacío viene dada por:

$$Q_o \approx \sqrt{3} \cdot U_o \cdot I_o \quad (2.2)$$

donde:

I_o = corriente del motor de inducción sin carga.

Q_o = potencia reactiva de vacío.

U_o = tensión en vacío.

Para motores con factor de potencia entre 0.9 a 0.98 la potencia reactiva en vacío constituye aproximadamente el 50% de la potencia reactiva a plena carga. Si el factor de potencia es próximo al límite de 0.7 a 0.89 esta llegará al 70%.

El incremento de consumo de potencia reactiva a plena carga (ΔQ_n) es:

$$\Delta Q_n = Q_n - Q_o \quad (2.3)$$

Para las cargas del motor diferentes a la nominal, éste incremento será proporcional al cuadrado del coeficiente de carga y viene dado por :

$$\Delta Q = k_c^2 \cdot \Delta Q_n \quad (2.4)$$

donde:

$$k_c = \frac{P}{P_n} \quad (2.5)$$

$k_c \rightarrow$ es el coeficiente de carga del motor.

$P \rightarrow$ potencia para el estado de carga arbitrario.

De esta forma, la potencia reactiva requerida (Q) por un motor bajo una carga arbitraria será:

$$Q = Q_o + k_c^2 \cdot \Delta Q_n \quad (2.6)$$

Teniendo en cuenta lo anterior el factor de potencia (fp) viene dado por:

$$fp = \frac{P}{S} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{Q_o + k_c^2 \Delta Q_n}{k_c P_n} \right)^2}} \quad (2.7)$$

donde:

S: Es la potencia aparente del motor de inducción en VA.

De esta expresión se deduce que el factor de potencia disminuye con la disminución de la carga.

Dimensiones del motor:

La demanda de potencia reactiva crece según crece la potencia del motor empleado. Aunque crece la demanda de potencia reactiva en valor absoluto, la relación entre esta y la potencia activa es más favorable y operan con un factor de potencia más alto, ya que el entrehierro, comparado con el tamaño total del motor es menor que en motores de menor tamaño. Es por ello que el factor de potencia en motores de gran potencia es mejor que en los de baja potencia y por tanto de menor dimensión.

Este reglón se relaciona prácticamente con la selección correcta de la potencia de un motor según la aplicación que se le dará. A diferencia del primer punto donde se tenía un motor seleccionado correctamente operando con menos de 1/3 de la carga nominal, en este caso se puede evitar con un estudio y correcta selección del motor.

Número de polos del motor:

Mientras mayor sea el número de polos del motor más bajo será su factor de potencia, de chapa o nominal. Esto se debe a que las líneas magnéticas tienen que cerrarse un número de veces mayor a través del entrehierro, lo cual da como resultado que el factor de potencia a plena carga del motor con mayor número de polos, sea más bajo.

Calidad de la reparación del motor de inducción:

Una reparación deficiente puede llevar a un incremento en el consumo de energía reactiva. Un enrollado deficiente, con las partes frontales fuera de norma (alargada o abultada) aumenta el campo de dispersión, un aumento intencional del entrehierro para evitar rozamientos o para el cambio de velocidad a una inferior, aumentar el número de polos originales. Estas y otras deficiencias en la reparación hacen del motor un mayor consumidor de energía reactiva que la normal.

Frecuencia de alimentación:

Cuando la alimentación se realiza a frecuencia variable, el consumo de reactivo varía con esta. A un incremento le corresponde, de forma general una disminución de la corriente de magnetización por ende menor consumo, por otra parte a una disminución le corresponde el aumento del consumo de reactivo.

Para momento constante en el eje, el deslizamiento es proporcional a la frecuencia, se puede expresar a través de:

$$S = \frac{I^2 \cdot R_2}{\omega \cdot M} \Rightarrow I^2 \equiv \omega \cdot S \quad (2.8)$$

donde:

$I \rightarrow$ corriente de del motor en Amperes(A).

$R_2 \rightarrow$ resistencia del rotor en Ohm (Ω).

$\omega \rightarrow$ frecuencia angular en radianes por segundo (rad/s).

$M \rightarrow$ momento electromagnético en Nm.

La potencia reactiva de dispersión (Q_σ) viene dada por la siguiente ecuación:

$$Q_\sigma = I^2 \left(\frac{x_{\sigma o}}{\omega_o} \right) \omega \Rightarrow Q_\sigma \equiv f \quad (2.9)$$

donde:

$\omega_o \rightarrow$ frecuencia angular sincrónica en rad/s.

$x_{\sigma o} \rightarrow$ reactancia de dispersión para la frecuencia angular sincrónica.

$F \rightarrow$ frecuencia de alimentación en Hz.

En esta expresión se observa que la potencia reactiva de dispersión depende directamente de la frecuencia, por lo que a un aumento de frecuencia, le corresponde un aumento del consumo de reactivo.

La potencia de magnetización (Q_μ) dada por:

$$Q_{\mu} = \frac{U^2 \cdot \omega_0}{x_{\mu} \cdot \omega} \equiv \frac{1}{f} \quad (2.10)$$

donde:

$x_{\mu} \rightarrow$ reactancia de magnetización del motor de inducción en Ohm.

A un aumento de la frecuencia le corresponde una disminución de potencia reactiva de magnetización. La potencia reactiva total depende fundamentalmente de la rama de magnetización para variaciones pequeñas de frecuencias y de la rama de dispersión en caso de variaciones considerables. Ver figura 2.2.

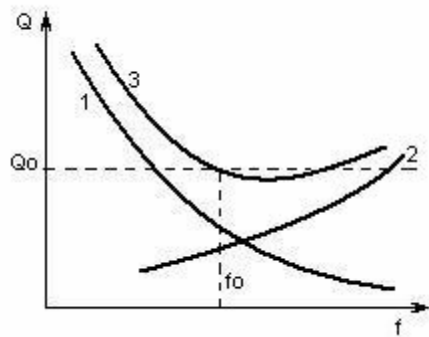


Fig2.2. Variación de la potencia reactiva en función de la frecuencia.

II.3. CÁLCULO DE LA POTENCIA REACTIVA NECESARIA PARA CORREGIR EL FACTOR DE POTENCIA.

A partir de la factura eléctrica

Cuando la carga total de una planta que se va a compensar no presenta variaciones importantes durante la jornada de trabajo, el cálculo de la potencia reactiva de los capacitores a instalar (kVAR_c) puede realizarse a partir de la factura eléctrica.

Para esto se escoge el mes donde el reporte de energía reactiva sea más elevado y se toman los valores de kWh y kVA_{rh} facturados. Se determina el factor de potencia promedio existente en la instalación, al que se le denominará cos (Ti). La potencia reactiva necesaria de los capacitores, para corregirlo a un nuevo valor de cos ϕ_2 , se puede calcular aplicando directamente la siguiente expresión derivada de las relaciones del triángulo representativo de la potencia aparente, activa y reactiva:

$$kVAR_c = kW(\tan\phi_1 - \tan\phi_2)$$

donde:

$$\tan\phi_1 = \tan(\cos\phi_1^{-1})$$

Con el objetivo de simplificar los cálculos, los fabricantes de capacitores han preparado materiales auxiliares, como el que se tiene en la Tabla 4.2, en la que se puede encontrar rápidamente el valor del multiplicador ($\tan\phi_1 - \tan\phi_2$). El factor de potencia

que se desea corregir está mostrado como ordenada y el factor de potencia deseado, como abscisa. La magnitud del multiplicador es leída en la intersección. Por ejemplo, considérese una carga de 1000 kW con un factor de potencia de 0.8, que se desea modificar a 0.9. De la Tabla 4.2 el multiplicador es 0.266; por lo tanto, la potencia de los capacitores es: $1000 \times 0.266 = 266$ kVAR.

Sin embargo, con sencillas herramientas de programación estos valores pueden obtenerse de forma más precisa, amigable y rápida.

Igualmente pueden hacerse cálculos semejantes en ramales, cargas de gran capacidad, etc., que presenten las características mencionadas, si se conectan medidores de potencia activa y reactiva.

A partir de los parámetros eléctricos de la instalación

Para nuevas instalaciones, el cálculo de la capacidad de los bancos de capacitores se realiza efectuando el balance de la potencia activa y reactiva de todos los receptores de la instalación, teniendo en cuenta los factores de utilización, de coincidencia y otros. Con esos resultados, se calculan los valores totales de P y Q y se determina el factor de potencia.

II.4. COMPENSACIÓN DE LA POTENCIA REACTIVA DE LA CARGA ASINCRÓNICA.

Existen instalaciones de capacitores individuales, de grupo y centralizada.

- **Compensación central.**
- **Compensación de grupo.**
- **Compensación individual.**

Compensación central: Cuando el principal propósito es reducir la potencia reactiva, adquiriendo las tarifas de los suministradores de potencia la compensación central es la preferida. Las condiciones de carga reactiva dentro de una planta no son afectadas si la compensación está hecha en la parte de alto voltaje (alternativa A), cuando la compensación es en la parte de baja (alternativa B), el transformador es aliviado. El costo de la instalación de alto voltaje y de bajo voltaje respectivamente y la posible necesidad de aliviar el transformador determinarán donde instalar los capacitores.

A continuación se muestran los esquemas que representan la compensación central en alto y bajo voltaje respectivamente.



Fig.2.3. Compensación central en la parte de alto voltaje a), compensación central en la parte de bajo voltaje b).

Compensación de grupo: La compensación de grupo (alternativa C), en vez de la compensación central es preferible si es posible utilizar grandes capacitores. En adición a lo obtenido en la compensación central, la carga en los cables es reducida y las pérdidas decrecen. Reducir las pérdidas hace que la compensación de grupo sea más provechosa que la compensación central. En la instalación de grupos, los condensadores se conectan a los puntos de distribución del circuito.

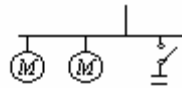


Fig. 2.4. Compensación de grupo.

Compensación individual: Este tipo de compensación se tiene principalmente a voltaje hasta 660 V. La ventaja especial de una compensación individual (alternativa D), es la existencia de dispositivos interruptores y protecciones para la máquina que será compensada y pueden además ser utilizados para la interrupción y protección de los capacitores. El costo está limitado solamente a la compra de los capacitores. Otra ventaja es la ganancia por la interrupción automática del capacitor dentro y fuera en paso con la carga. Esto significa que la compensación individual es únicamente motivada para aparatos y máquinas que tienen un buen factor de carga. Las máquinas pequeñas requieren capacitores pequeños y el precio por $kVAr$ crece. El costo de la instalación para compensación individual debe ser comparado con la compensación en grupo y la compensación central. Las pérdidas inferiores a compensación individual deben ser consideradas. En este caso los condensadores se conectan sólidamente a los terminales de los receptores. Esta forma tiene la desventaja esencial de la mala utilización de los condensadores, debido a que con la desconexión del receptor se desconecta la instalación compensadora.

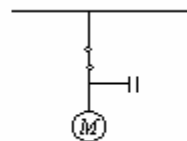


Fig.2.5. Compensación individual.

Cada tipo de compensación antes de ser usado lleva implícito un cálculo técnico económico para su implementación.

La variación de potencia reactiva desde vacío a plena carga originado por el aumento del flujo de dispersión en las partes frontales de las bobinas, provoca que un mayor número de líneas magnéticas se cierren a través del espacio de aire y aumente el consumo de energía reactiva. Este hecho se aprovecha para la compensación individual del factor de potencia independientemente de la carga que pueda llevar el motor en un momento dado, de manera que este cálculo se puede hacer sin necesidad de realizar ningún tipo de medición, solamente con los datos de chapa del motor.

La potencia reactiva del condensador viene dada por la de vacío:

$$Q_c = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_o \quad (2.12)$$

donde:

U : tensión de línea en Volts.

I_o : corriente en vacío del motor en Amperes.

Q_c : potencia reactiva del condensador en Volts Amperes reactivos.

La corriente en vacío se puede determinar de forma aproximada como:

$$I_o = 2 \cdot I_{1n} \cdot (1 - \cos \varphi_n) \quad (2.13)$$

donde:

I_{1n} : corriente nominal del motor en Amperes.

$\cos \varphi_n$: factor de potencia nominal.

El condensador no es más que una carga con carácter especial. Desde el condensador hasta el motor, la demanda de reactivo permanece invariable el condensador no suministra reactivo al motor, solo compensa el que está en línea, desde donde se encuentra él hasta la fuente.

II.4.1. Equipos compensadores.

Para la compensación de la potencia reactiva demandada por las instalaciones de las industrias, pueden ser aplicados los compensadores sincrónicos, los condensadores estáticos y utilizados los motores sincrónicos existentes en la instalación.

Los compensadores sincrónicos:

Son motores sincrónicos de construcción aligerada, sin carga en el eje, que pueden trabajar tanto en el régimen de generación de potencia reactiva (por medio de su sobreexcitación) como en el régimen de consumo (subexcitación). El cambio de la magnitud de la potencia reactiva generada o consumida del compensador se ajusta con la regulación de su excitación.

Las pérdidas de potencia activa en los compensadores sincrónicos a plena carga, en dependencia de su capacidad nominal, oscila entre 0.32-0.15 kW/kVAr, es decir constituye un apreciable valor.

Como desventajas de los compensadores sincrónicos pueden señalarse el encarecimiento y complejidad de su explotación (en comparación con los condensadores estáticos) y el considerable ruido durante la operación.

Entre las ventajas de estos compensadores encontramos, la posibilidad de una regulación suave y automática de la magnitud de la potencia reactiva generada, independientemente de la generación de potencia reactiva y voltaje en las barras, la suficiente estabilidad térmica y dinámica de los devanados durante las corrientes de cortocircuito y la posibilidad de restaurar las averías durante los trabajos de reparación.

El costo específico de los compensadores sincrónicos se incrementa considerablemente con la reducción de su potencia nominal. La característica mencionada anteriormente y las grandes pérdidas de potencia activa en ellos, condicionan la aplicación de compensadores sincrónicos solo de grandes potencias en grandes subestaciones. Son instalados exteriormente lo cual proporciona una disminución de los gastos.

Condensadores estáticos:

Por su acción, son equivalentes a un compensador sincrónico sobre excitado y pueden trabajar solo como generadores de potencia reactiva. Los capacitores como también se les denomina, se suministran en unidades de 4 -10 kVAr.

De tales unidades se forman baterías de la potencia requerida. Generalmente estas baterías se conectan en las redes trifásicas, en delta. Para la desconexión de los condensadores es necesario que la energía almacenada en ellos se descargue automáticamente, sin la participación del personal de servicio, a través de una resistencia conectada a la batería. Su magnitud debe ser tal que durante la desconexión no aparezca un sobrevoltaje en los terminales de los condensadores.

En comparación con otras fuentes de potencia reactiva los condensadores tienen las siguientes ventajas:

- Pequeñas pérdidas de potencia activa (0,0025-0,005 kW/kVAr).
- Simplicidad de la explotación (por la ausencia de partes rotatorias).
- Simplicidad del montaje (pequeño peso, no requieren bases o cimientos, etcétera).
- Para su instalación puede ser utilizado cualquier lugar seco.

Entre las desventajas de los condensadores se deben señalar la dependencia de la potencia reactiva generada por ellos del voltaje, dada por la ecuación:

$$Q = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot 10^{-3} \text{ kVAr} \quad (2.11)$$

Y su insuficiente solidez (fácilmente se averían, principalmente durante las fallas de cortos circuitos y a voltajes superiores al nominal).

El costo específico de las baterías de condensadores depende del voltaje y oscila entre los límites de 5 pesos/ kVAr para $U = 3 - 10 \text{ kV}$ hasta 14.5 pesos/kVAr para $U = 0.22 \text{ kV}$, pero prácticamente no depende de la potencia de la propia batería. Por ello, para la compensación de la potencia reactiva hasta 5-10 MVar en las instalaciones industriales, son las baterías de condensadores las que han obtenido una mayor difusión.

II.5. INFLUENCIA DE LA TENSIÓN EN LA MEJORA DEL FACTOR DE POTENCIA EN LOS MI.

Existe una relación cuadrática entre la carga del motor y la tensión óptima que hay que aplicar con esta carga. Esto se debe a que cuando se diseña el motor para una potencia dada, se realiza con un alto nivel de la demanda reactiva para el momento que él debe efectuar. Si ésta capacidad no se aprovecha, la mayor parte de la demanda reactiva en este caso no se utiliza. Al reducir la tensión aplicada se elimina la demanda reactiva sobrante. De ésta forma se mejoran las condiciones y la relación entre la potencia reactiva y activa.

La reducción de la tensión se justifica en los casos que el estado de carga del motor lo permita, observando la condición del momento de arranque requerido. La dificultad de aplicación de este método radica en que la reducción de la tensión generalmente no es individual.

La reducción de la tensión se efectúa a través de:

- Los taps de los transformadores de alimentación: es preciso que no afecten a otras cargas.
- Reconexión de las bobinas del motor: conmutación de la conexión fundamental.

El motor viene diseñado originalmente para dos niveles de tensión según el tipo de conexión, frecuentemente el cambio sucede desde una delta a una estrella ya que la tensión de fase que es lo que realmente necesita el motor de inducción, es raíz de tres veces menor que la tensión aplicada con lo cual en valor efectivo se reduce la tensión de alimentación, mejorando el factor de potencia y el consumo de reactivo.

II.6. ALGORITMO DE LA INVESTIGACIÓN.

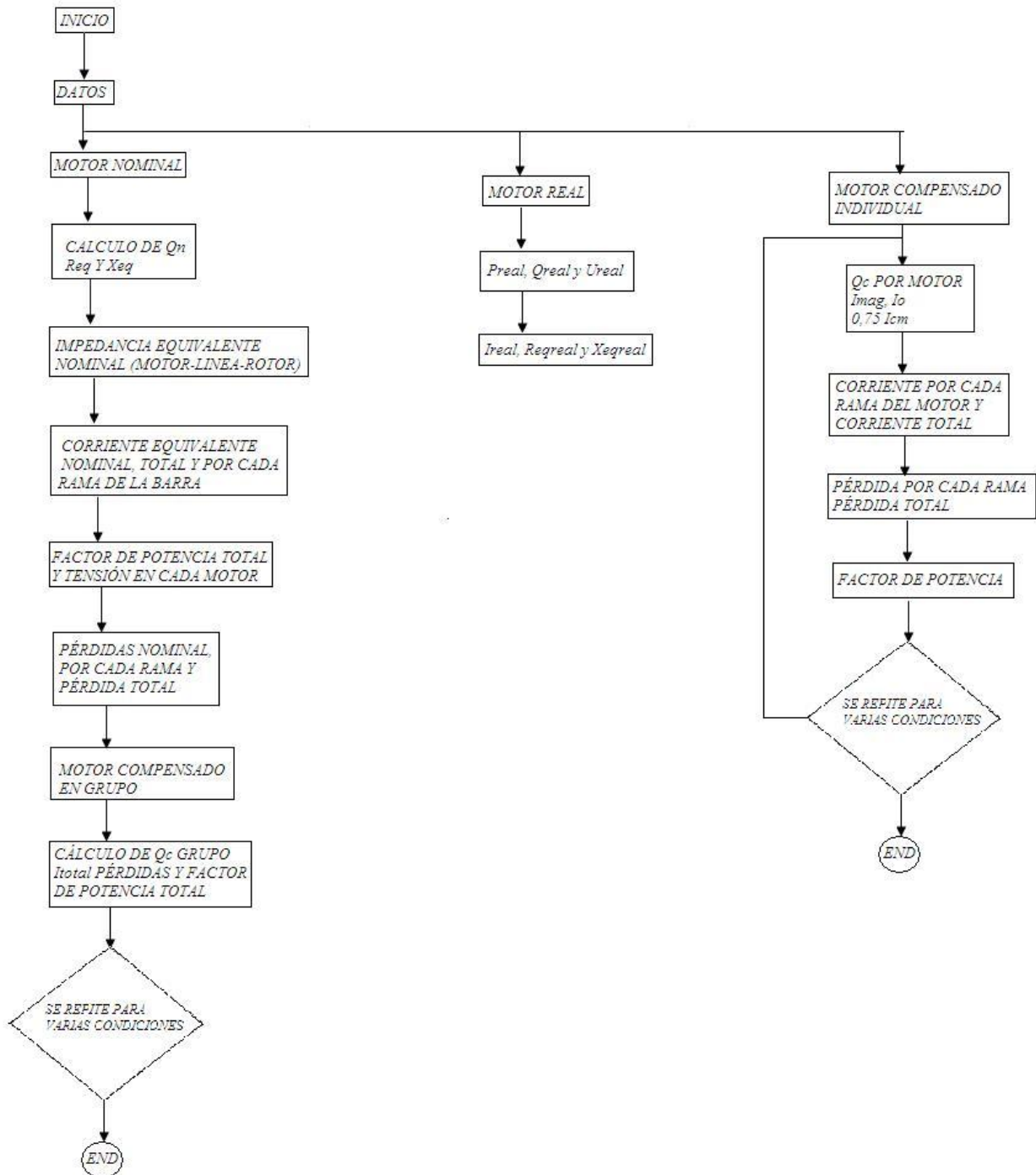


Figura 3.1. Algoritmo de la investigación.

II.7 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO II.

En este capítulo se describen los factores del motor de inducción que influyen en el consumo de potencia reactiva. También se tuvieron en cuenta los diferentes equipos compensadores, llegando a la conclusión de que los más convenientes a utilizar para la compensación; son los condensadores por todas las ventajas que poseen. En el mismo se hace referencia a las formas de compensación que pueden ser empleadas con el fin de reducir el consumo de reactivo en la industria y mejorar con ello el factor de potencia.

Capítulo III

Capítulo III. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

III.1 Introducción al análisis de los resultados.

III.2 Análisis de los resultados.

III.3 Influencia del bajo factor de potencia sobre algunos parámetros del motor.

III.4 Determinación de la capacidad a instalar para lograr aumentar el factor de potencia hasta 0.94.

III.5 Técnica de análisis de la influencia de la capacidad a través del software MATLAB.

III.6 Influencia del tipo de compensación en las pérdidas en el sistema..

III.7 Conclusiones Capítulo III.

III.1. INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.

Es necesario comprobar como influye el motor trifásico con rotor en jaula de ardilla en la potencia activa y la potencia reactiva de la industria. Es importante conocer no solo los valores de los indicadores del motor de inducción también el comportamiento gráfico resulta de gran interés, sobre todo cuando se decide influir sobre el motor, para ello se empleará el software MATLAB.

Resulta de suma importancia el conocimiento de la influencia del reactivo en el consumo de corriente y en la variación de tensión, pues estas incidirán en las pérdidas eléctricas y magnéticas respectivamente.

III.2. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.

Para el desarrollo de este punto, fue escogido el taller 07 de La Empresa Mecánica del Níquel. Este taller posee el mayor número de motores trifásico con rotor en jaula de ardilla de esta instalación, por lo que nos permitirá de forma más precisa obtener resultados que puedan demostrar la veracidad de lo planteado en los capítulos anteriores y cuantificar algunas de los parámetros que varían con el reactivo y mejorar los índices de eficiencia de la empresa.

Con las mediciones llevadas a cabo se realizó un circuito equivalente, el cual es resultado del promedio de los valores de los parámetros de la carga con carácter inductivo del taller.

Tabla 3.1. Parámetros del motor equivalente.

Parámetros del motor equivalente					
Potencia activa	Tensión	$\cos\phi$	Corriente	Potencia reactiva	Potencia aparente
115.69 kW	444.26 V	0.59	256.18 A	159.60 kVAr	197.12 kVA

Como es posible observar en los resultados el factor de potencia se encuentra por debajo de los valores establecidos por la Empresa Eléctrica Nacional, lo que indica que la potencia útil suministrada al taller no está siendo aprovechada al máximo y existen grandes pérdidas.

Para reducir estas pérdidas y aumentar la eficiencia del taller se determinará la capacidad a instalar para lograr un factor de potencia igual a 0.94.

Pero antes veremos el comportamiento de algunos parámetros del motor equivalente teniendo en cuenta el factor de potencia actual y el propuesto, es decir, antes y después de la compensación.

III.3. INFLUENCIA DEL BAJO FACTOR DE POTENCIA SOBRE ALGUNOS PARÁMETROS DEL MOTOR.

Influencia sobre la corriente:

Se tienen las ecuaciones siguientes:

$$P_1 = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 \quad (3.1)$$

$$P_1 = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi \quad (3.2)$$

Supongamos que las potencias y tensiones permanecen constantes, entonces se igualan los términos:

$$I_1 \cdot \cos \varphi_1 = I_2 \cdot \cos \varphi_2 \quad (3.3)$$

Despejando a I_2 de la ecuación 3.3; corriente después de la compensación, se obtiene que esta será igual a 160,8.

$$I_2 = \frac{I_1 \cdot \cos \varphi_1}{\cos \varphi_2} \quad (3.4)$$

Entonces la relación entre las corrientes será:

$$\left(\frac{I_1}{I_2} \right)^2 = 2.54 \quad (3.5)$$

Todo parece indicar que esta relación no tiene un valor elevado, pero debemos tener en cuenta su influencia en las pérdidas eléctricas.

Teniendo en cuenta que las pérdidas por efecto joule dependen del cuadrado de la corriente, podemos plantear que cuando el factor de potencia es de 0.59 la corriente aumenta en 2.54 veces en relación con la corriente para un valor de factor de potencia de 0.94, por lo tanto aumentará con ella las pérdidas eléctricas.

Influencia sobre la tensión:

Partiendo de la relación siguiente:

$$\frac{U_1}{U_n} = 1.01 \quad (3.6)$$

En este caso podemos ver que para un factor de potencia de 0.59 la tensión es 1.01 veces mayor. Esto implica aunque no parece ser un valor grande, un incremento de las pérdidas magnéticas, porque si aumenta la tensión de alimentación estas variarán proporcional a ella debido a que la rama de magnetización está conectada en paralelo con la de alimentación del circuito.

III.4. DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD A INSTALAR PARA LOGRAR AUMENTAR EL FACTOR DE POTENCIA HASTA 0.94.

Auxiliándonos del triángulo de potencias determinaremos el valor de la capacidad a instalar.

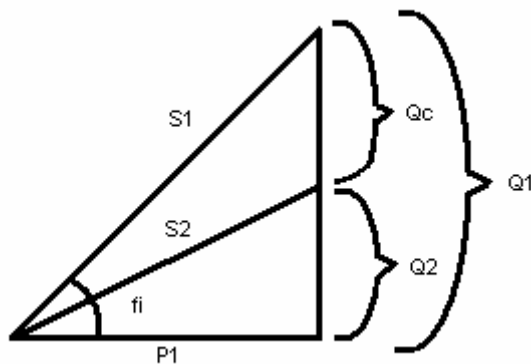


Fig. 3.1 Triángulo de potencias

donde:

P_1 : Es la potencia activa del motor equivalente.

Q_1 : Es la potencia reactiva consumida por el motor para un factor de potencia de 0.59, es decir, antes de la compensación.

Q_c : Representa la potencia del banco.

Q_2 : Es la potencia reactiva para un factor de potencia igual a 0.94, es decir después de la compensación.

S_1 : Es la potencia aparente antes de la compensación.

S_2 : Es la potencia aparente que consumirá el motor equivalente luego de haber sido realizada la compensación.

De la figura anterior se infiere que:

$$Q_c = Q_1 - Q_2 \quad (3.7)$$

También puede determinarse Q_c como:

$$Q_c = P_1 \cdot (tg \varphi_1 - tg \varphi_2) \quad (3.8)$$

$$Q_c = 116.33 \text{ kVAr}$$

Conocida la potencia reactiva se calculará el valor de la corriente I_c :

$$I_c = \frac{Q_c}{U} \quad (3.9)$$

$$I_c = 0.26 \text{ kA}$$

De la ecuación:

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} \quad (3.10)$$

donde:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (3.11)$$

$$\omega = 377$$

$$X_C = \frac{U}{I_C} \quad (3.12)$$

$$X_C = 1.71 \Omega$$

Despejando a c de la ecuación 3.10 tenemos:

$$C = \frac{1}{377 \cdot 1.71}$$

$$C = 1551.8 \mu f$$

III.5. TÉCNICA DE ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LA CAPACIDAD A TRAVÉS DEL SOFTWARE MATLAB.

Para determinar la incidencia de la capacidad mediante el software MATLAB se colocará en paralelo a la rama de magnetización del circuito equivalente en T un condensador como se ilustra en la figura 3.3.

Para confeccionar este circuito se escogió un motor con los siguientes datos:

Datos nominales del motor trifásico:

Tipo 4AH250M4, $2p = 4$, $f = 60\text{Hz}$, $P_n = 110\text{ kW}$, $U_n = 220$, $I_n = 195.5\text{ A}$, $R_1 = 0.03\ \Omega$, $R_2 = 0.0172\ \Omega$, $X_1 = 0.117\ \Omega$, $X_2 = 0.19\ \Omega$, $X_m = 4.33\ \Omega$, $L_m = 0.0154\text{ H}$, $L_1 = 0.0158\text{ H}$, $L_2 = 0.0158\text{ H}$, $s_n = 0.015$, $\cos \varphi = 0.908$.

Tabla 3.2 Comportamiento de algunas variables antes y después de la compensación.

Variables	Sin capacidad	Con capacidad (300 μf)
$\cos \varphi$	0.908	0.9516
I_1	188.2	182.16
I_2	176.3	179.1
I_0	35.38	35.9

En este caso la relación entre las corrientes antes de la compensación y luego de esta es de 1.03 aproximadamente, lo que significa que las pérdidas antes de la compensación son 1.03 veces mayor que las normales, véase la ecuación 3.13.

$$pel_1 = I_1^2 \cdot R_1 \quad (3.13)$$

La compensación permite un ahorro de potencia activa en el motor de 187.7 W.

Tabla 3.3 Comportamiento de las variables para un deslizamiento menor; menos carga.

variables	Sin capacidad	Con capacidad
$\cos \varphi$	0.8232	0.96
I_1	76.12	65.1
I_2	60.22	61.26
I_0	36.29	37.58

Teniendo en cuenta los valores de la tabla 3.3 se realizará el mismo análisis que para la tabla 3.2, solo que ahora el motor se encuentra con menos carga.

Se obtuvo como resultado de la relación de las corrientes un valor igual a 1.36, mayor que cuando se encontraba con un mayor estado de carga.

Por lo que podemos plantear que a medida que el motor se encuentra más cargado la reducción de corriente por concepto de capacidad es menor.

Diagrama en MATLAB para la simulación.

Este diagrama permitirá realizar la simulación deseada para con ello hacer un análisis más profundo y fundamentado del comportamiento de la potencia activa, reactiva y las corrientes antes y después de la compensación.

Comportamiento de las potencias activas y reactivas.

En la gráfica 3.4 se pueden observar las variaciones de las potencias P y Q antes y después de la compensación; analizado para el motor antes mencionado.

Si nos percatamos la variación de potencia activa es pequeña, sin embargo, el comportamiento de la potencia reactiva es distinto, es decir, el consumo de reactivo sin capacidad bajo carga como se observa en la figura 3.4, es mayor que el consumo luego de haberse efectuado la compensación.

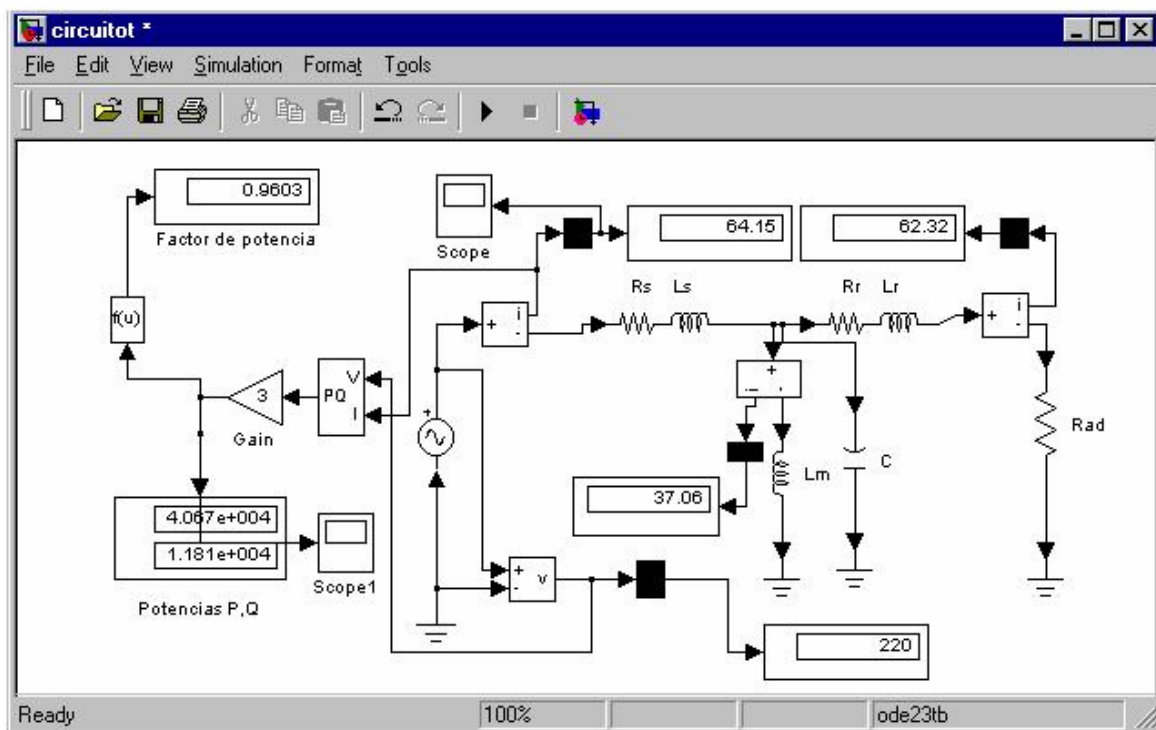


Fig.3.3 Diagrama en MATLAB. Representación del circuito equivalente en T.

En la figura 3.5 se muestran las corrientes antes y después de la compensación. De este gráfico se deduce que cuando no se ha realizado la compensación el consumo de corriente por parte de los motores, es mayor que la corriente consumida una vez compensada la potencia reactiva.

Con los resultados obtenidos de la simulación podremos plantear que en el motor antes de ubicar medios compensadores, las pérdidas eléctricas son mayores debido a que estas dependen del cuadrado de la corriente.

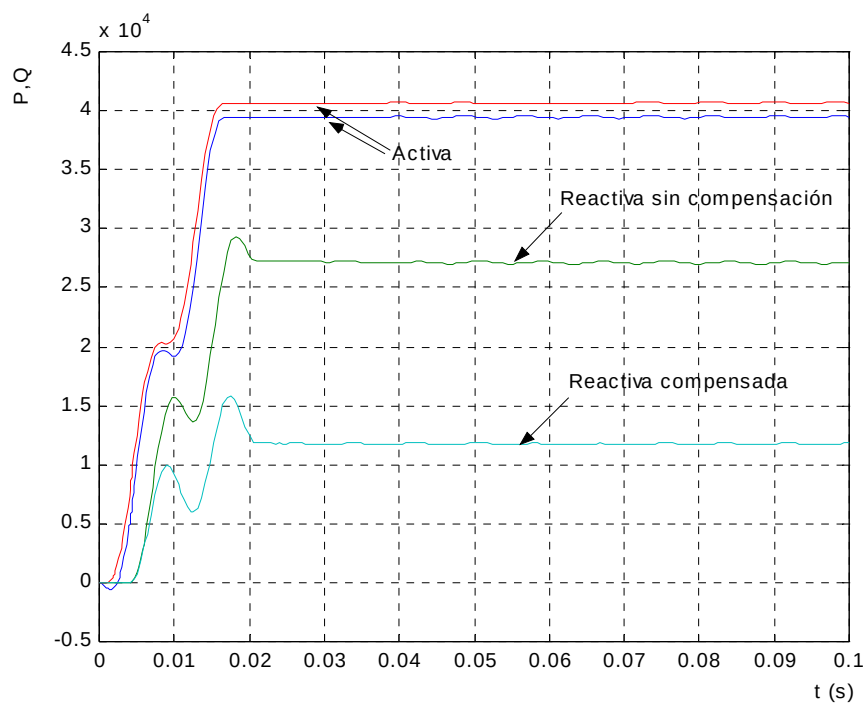


Fig 3.4 Potencias activas y reactivas bajo carga, antes y después de la compensación.

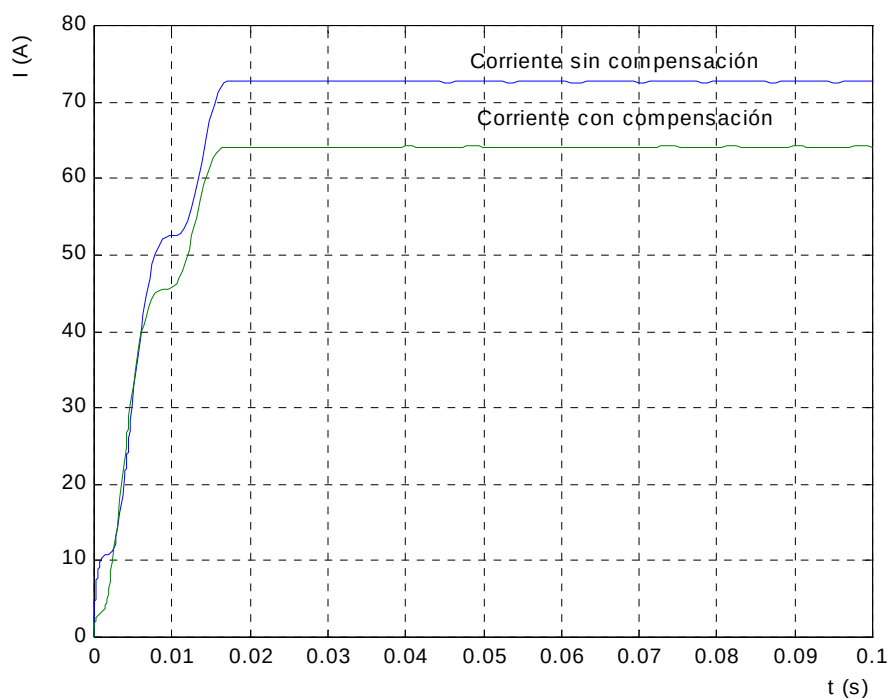


Fig. 3.5. Representación de las corrientes bajo carga antes y después de la compensación.

III.6. INFLUENCIA DEL TIPO DE COMPENSACIÓN EN LAS PÉRDIDAS DEL SISTEMA.

Aunque en este caso solo aparecen las pérdidas asociadas a las líneas de alimentación, los resultados son aplicables a cualquier sistema formado por otros elementos.

Se tomaron cinco motores perteneciente a una misma barra, figura 3.6 con el objetivo de mostrar el efecto que pueden provocar los motores de inducción y los métodos de compensación en las pérdidas en las líneas.

Los datos nominales de estos motores se reflejan en la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Datos nominales de los motores escogidos

Hp	Ns (rpm)	Nr (rpm)	Io (A)	In (A)	Iarr (A)	Ef1/2 (%)	Ef3/4 (%)	Efn (%)	Fp1/2 (%)	Fp3/4 (%)	Fpn (%)
40	1800	1770	16	49	303	94.0	94.2	93.6	77	82	76
75	3600	3565	23	89	568	94.3	94.5	94.1	81	86	88
100	1800	1780	31	118	758	95.0	95.2	94.5	80	85	87
125	1200	1185	46	151	949	94.7	94.9	94.5	77	84	86
150	1800	1785	47	178	1134	95.7	96.0	95.8	80	85	86

Hp → Potencia activa nominal de cada motor.

Ns → Velocidad del campo magnético, rpm.

Nr → Velocidad del rotor, rpm.

Io → Corriente de vacío, A.

In → Corriente nominal de cada motor, para 440 V, en A.

Ef ½ , ¾ , n → Eficiencia a ½ , ¾ y a plena carga en %.

Fp ½ , ¾ , n → Factor de potencia a ½ , ¾ y a plena carga en %.

La figura 3.6 generaliza la posibilidad de ubicación de bancos de capacitares para compensar el factor de potencia en motores de inducción, capacidades individuales, C1 a C5 y compensación en grupo Ceq y determinar las variaciones de las pérdidas en las líneas por este concepto.

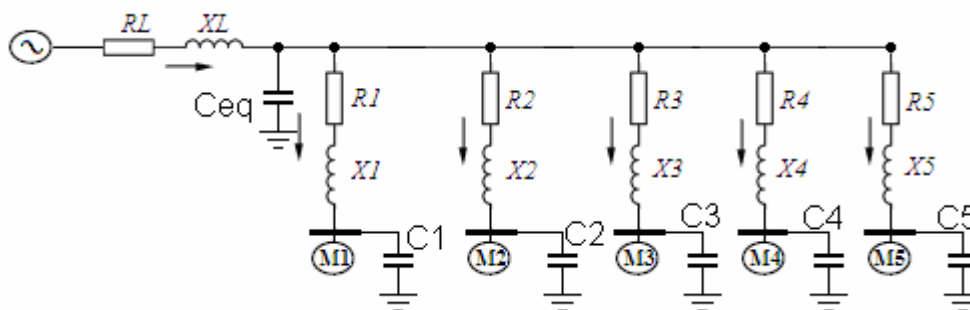


Fig. 3.6. Barra objeto de estudio.

Operación con carga nominal

Si los motores en la barra, objeto de estudio, están trabajando en régimen nominal existe un comportamiento de las variables como se refleja en la tabla 3.4,

Tabla 3.4. Comportamiento nominal por cada motor

	P _n (kW)	Q _n (kVAr)	I _{mn} (A)	I _n (A) (440 V)	cosφ _n (pu)	Σp _n (W)	U _m (V)	N _r (rpm)
M1-L1	29.84	25.52	49.00	47.41	0.760	0.223	447.61	1770
M2-L2	55.95	30.20	89.00	96.52	0.880	0.885	447.32	3565
M3-L3	74.60	42.28	118.00	125.81	0.870	0.885	447.32	1780
M4-L4	93.25	55.33	151.00	162.86	0.860	1.989	447.14	1185
M5-L5	111.90	66.40	178.00	188.63	0.860	2.419	447.23	1785

P_n → Potencia activa nominal de cada motor, kW.

Q_n → Potencia reactiva nominal de cada motor, kVAr.

I_{mn} → Corriente por el motor para la tensión U_m, en A.

U_m → Tensión nominal en el motor para U_n=480, V.

I_n → Corriente nominal de cada motor, para 440 V, en A.

cosφ_n → Factor de potencia nominal de cada motor

Σp_n → Pérdidas para régimen nominal, en cada alimentador, en W.

N_r → Velocidad nominal de cada Motor en rpm.

La tabla 3.5 muestra los resultados totales en la alimentación, en el caso de trabajo de los motores en régimen nominal. Se observa que existe un factor de potencia que normalmente es penalizado por la UNE, aún cuando no hay problemas de niveles de cargas.

Tabla 3.5 Comportamiento nominal del sistema

U _n (V)	U _{1n} (V)	I _{tn} (A)	F _{ptn}	Σp _{tn} (W)	Σp _{linea} (W)
480	447.84	620.43	0.8497	387.49	381.09

$U_n \rightarrow$ Tensión nominal de la subestación, V.

$U_{1n} \rightarrow$ Tensión nominal en barra, V.

$I_{tn} \rightarrow$ Corriente total nominal, A.

$F_{ptn} \rightarrow$ Factor de potencia total nominal

$\Sigma_{ptn} \rightarrow$ Pérdidas totales del sistema, W.

$\Sigma_{plnea} \rightarrow$ Pérdidas del alimentador principal, W.

Operación con carga real

La realidad es diferente a las condiciones nominales, se opera con un nivel de carga variable, la magnitud de tensión, sin tener en cuenta la calidad de la energía (frecuencia, asimetría y contenido de armónicos).

La tabla 3.6 muestra los resultados del comportamiento de cada motor bajo un estado de carga medio de 85%.

Tabla 3.6. Comportamiento real por cada motor para $k_c = 85\%$

	Pr (kW)	Qr (kVAr)	Imr (A)	Ir (A) (475V)	cosϕ_r (pu)	Σ_{pr} (W)	Umr (V)	Nr (rpm)
M1-L1	25.36	22.97	22.24	30.83	0.741	0.048	458.89	1770
M2-L2	47.56	27.18	48.47	57.81	0.868	0.223	458.73	3565
M3-L3	63.41	38.05	63.83	77.07	0.857	0.367	458.74	1780
M4-L4	79.26	49.80	78.77	96.34	0.847	0.465	458.66	1185
M5-L5	95.12	59.76	94.53	115.61	0.847	0.608	458.69	1785

$I_r \rightarrow$ Corriente del motor directo a 475 V

$I_{mr} \rightarrow$ Corriente del motor con caída de tensión V

$P_r \rightarrow$ Potencia activa real de cada motor, kW.

$Q_r \rightarrow$ Potencia reactiva real de cada motor, kVAr.

$U_{mr} \rightarrow$ Tensión real en el motor para $U_r = 475$, V.

$\cos\phi_r \rightarrow$ Factor de potencia real de cada motor

$\Sigma_{pr} \rightarrow$ Pérdidas para régimen real, en cada alimentador, en W.

$N_r \rightarrow$ Velocidad nominal de cada Motor en rpm.

La tabla 3.7 muestra los resultados totales en la alimentación, en el caso de trabajo de los motores en régimen real con 85% de carga promedio. Se observa que existe un factor de potencia más bajo que para carga nominal, como se espera en caso de motores subcargados, aún cuando no hay problemas de niveles de cargas, ya que un 85% es adecuado.

Tabla 3.7 Comportamiento real del sistema

Ur (V)	U1r (V)	Itr (A)	Fptr	Σ_{ptr} (W)	$\Sigma_{plinear}$ (W)
475	459	307.28	0.8417	95.05	93.48

Ur → Tensión real de la subestación, V.

U1r → Tensión real en barra, V.

Itr → Corriente total real demandada por el grupo de moores, A.

Fptr → Factor de potencia total real

Σ_{ptr} → Pérdidas totales del sistema bajo condiciones reales, W.

$\Sigma_{plinear}$ → Pérdidas del alimentador principal reales, W.

La figura 3.7 muestra una comparación del factor de potencia nominal y para la carga del 85% representada en las tablas 3.4 y 3.6,

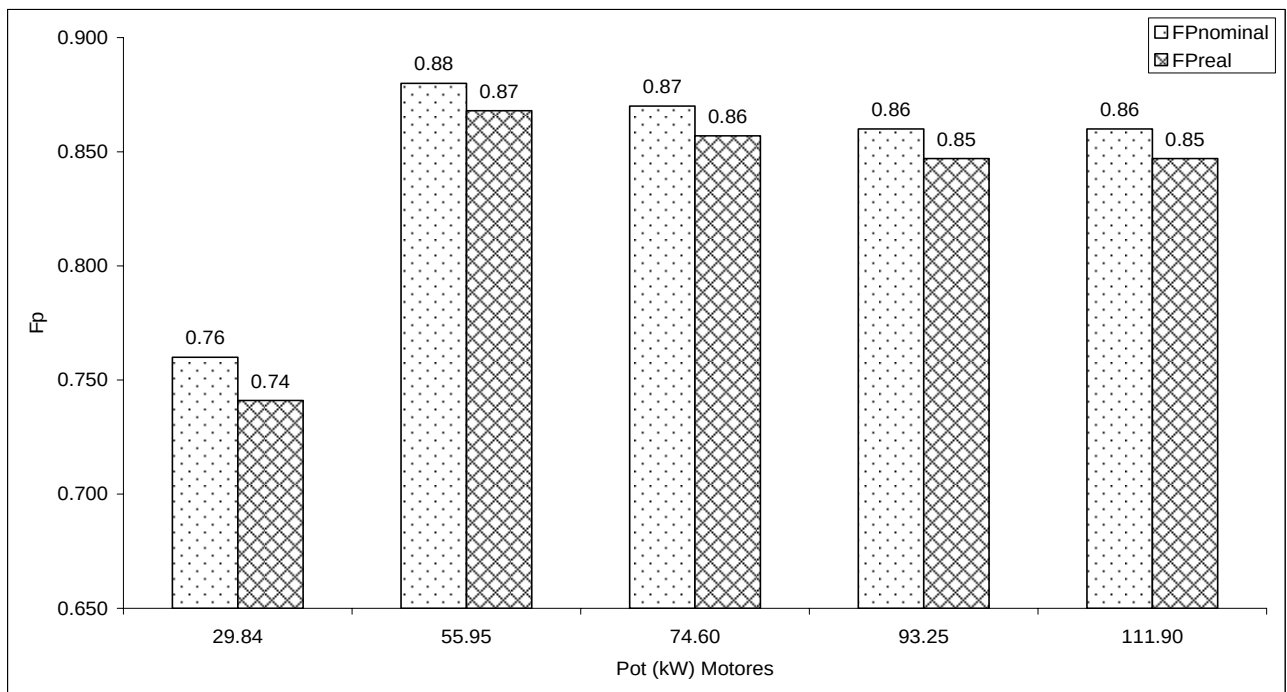


Figura 3.7. Factor de potencia nominal y real de cada motor

Figuras semejantes a 3.7 se pueden realizar con la corriente, potencia, etc, al disminuir la corriente del motor por la disminución de la carga, disminuyen las pérdidas en las líneas, siendo menores que para régimen nominal. Este reflejo se observa comparando las pérdidas totales en líneas de la tabla 3.5 y 3.7 (387.49 W vs 95.05 W), sin embargo no se puede razonar solo en ello, pues la UNE penalizará por bajo factor de potencia y se puede disminuir ese nivel de pérdidas realizando la compensación de potencia reactiva.

Compensación individual

Se realiza la compensación individual, conectando capacidad en cada motor (1 a 5), en los motores 2 a 5 (cuatro motores, dejando al de menor potencia, luego se dejan sin capacidad a los dos primeros motores (3 a 5). En el segundo experimento se conectó capacidad para la compensación de forma inversa, desconectando del mayor valor hasta el mínimo. El objetivo era diversificar la forma en que pudiera realizarse, sin llegar a definir un valor óptimo.

La tabla 3.8 muestra los resultados: en la primera columna se ubican los motores sin conectarle capacidad, la segunda muestra los motores con capacidad. Las filas de 2 a 6 representan el caso general donde todos los motores se le conectaron capacidades, reflejando su valor en la columna 4 (Qci en KVA).

Tabla 3.8: Variación en cada motor con compensación individual

Mot. Sin C.	Mot. Con C.	Pr (kW)	Qci (kVA)	$\cos\phi_r$ (pu)	ImrCI (A)	Σp_{mCI} (W)	Umr (V)
	1	25.36	9.15	0.741	16.52	0.027	458.89
	2	47.56	13.15	0.868	42.50	0.172	458.73
	3	63.41	17.72	0.858	55.39	0.276	458.74
	4	79.26	26.29	0.847	66.84	0.335	458.66
	5	95.12	26.86	0.847	81.18	0.448	458.69
1 (M1)	2 a 5	25.36	0	0.741	22.08	0.048	458.89
1 a 2 (M2)	3 a 5	47.56	0	0.868	48.47	0.223	458.73
1 a 3 (M3)	4 a 5	63.41	0	0.858	63.83	0.367	458.74
1 a 4 (M4)	5	79.26	0	0.847	78.77	0.465	458.66

5 (M5)	1 a 4	95.12	0	0.847	94.53	0.608	458.69
4 a 5 (M4)	1 a 3	79.26	0	0.847	78.77	0.465	458.66
3 a 5 (M3)	1 a 2	63.41	0	0.858	63.83	0.367	458.74
2 a 5 (M1)	1	47.56	0	0.868	48.47	0.223	458.73

P_r → Potencia activa real de cada motor, kW.

Q_{ci} → Potencia reactiva capacitiva a conectar por cada motor, kVAr.

$\cos\phi_r$ → Factor de potencia real de cada motor

I_{mrCI} → Corriente ante del motor en presencia de corrección del fp, A.

Σp_{mCI} → Pérdidas de los alimentadores a cada motor, W.

U_{mr} → Tensión real en el motor, V.

El cálculo de la capacidad a instalar se tomó por recomendaciones prácticas de compensar el 75% de la potencia reactiva nominal, que el motor aún en vacío necesitaría, sin llegar a tomar valores capacitivos.

La columna 6, I_{mrCI} (A), muestra las variaciones que experimentan las corrientes por cada alimentador, no del motor, en presencia de compensación capacitiva.

Las filas de 7 a 14 representan las variantes de conexiones de capacidades individuales en motores, se observa en la columna 6 como la corriente de cada alimentador se reduce en presencia de compensación, al igual experimentan variaciones las pérdidas.

La tabla 3.9 resume para cada caso anterior las variaciones generales y la figura 3.8, para complementar la información.

Tabla 3.9: Resultados generales de la compensación individual

Cant. Mot	Nivel	I_{tCI} (A)	$\cos\phi_{ci}$ (pu)	$\Sigma proCI$ (W)	$\Sigma ptCI$ (W)
5 Motores	1 a 5	262.03	0.986	68.11	69.27
4 Motores	2 a 5	264.56	0.978	69.29	70.47
3 Motores	3 a 5	268.72	0.963	71.49	72.77
2 Motores	4 a 5	275.94	0.937	75.38	76.66
1 Motores	5	289.77	0.893	83.13	84.54
4 Motores	1 a 4	270.41	0.957	72.39	73.71
3 Motores	1 a 3	282.42	0.916	78.96	80.40
2 Motores	1 a 2	292.53	0.884	84.72	86.16
1 Motores	1	300.97	0.859	89.68	91.23

I_{tCI} → Corriente total bajo compensación individual, A

$\cos\phi_{ci}$ → Factor de potencia

$\Sigma proCI$ → Pérdidas en el alimentador, en W.

$\Sigma ptCI$ → Pérdidas totales del sistema, W.

Compensación en grupo

La tabla 3.10 resume el comportamiento de las corrientes, factor de potencia y pérdidas en totales en presencia de compensación en grupo, se ha tomado una capacidad equivalente a cada variación realizada en el caso individual a fin de comparar los efectos para capacidades totales equivalentes en ambos casos.

Tabla 3.10 Variación con compensación en grupo

Corrida	Eq. Mot. Con C.	$\cos\phi_t$ (pu)	I_{tCG} (A)	Q_{cg} (kVA)	$\Sigma proCG$ (W)	$\Sigma ptCG$ (W)
1	1 a 5	0.917	415.46	93.17	172.45	170.88
2	2 a 5	0.912	404.49	84.02	163.54	161.97
3	3 a 5	0.904	388.82	70.88	151.24	149.67
4	4 a 5	0.893	367.93	53.16	135.58	134.02
5	5	0.871	337.49	26.86	114.33	112.76
6	1 a 4	0.902	383.40	66.30	147.09	145.53
7	1 a 3	0.882	352.61	40.01	124.66	123.09
8	1 a 2	0.866	332.28	22.29	110.87	109.87
9	1	0.853	317.45	9.15	101.33	99.77

Las figura 3.9 y 3.10 reflejan una comparación de comportamiento para las compensaciones individuales y en grupo.

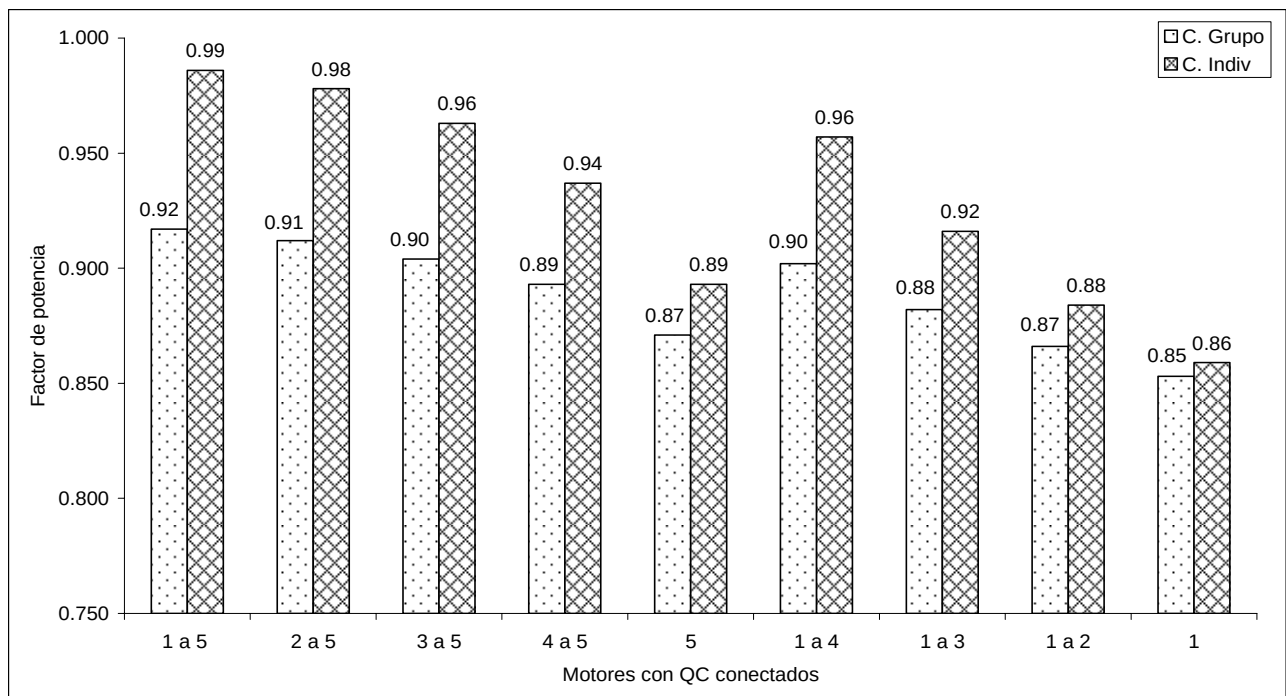


Figura 3.9. Factor de potencia global para compensación individual y en grupo

La figura 3.9 representa las variaciones del factor de potencia para ambas compensaciones, en presencia de capacidades equivalentes. En las variantes realizadas siempre la compensación individual resultó con factores de potencias globales mayores que la compensación en grupo, debido a que la componente reactiva de la corriente disminuye en mayor grado, en la combinación en paralelo de motores, mientras que en grupo solo disminuye la componente principal.

Se puede inferir que la utilización de compensación individual mejora el factor de potencia en mayor magnitud para capacidad instalada equivalente, de otra forma para obtener el mismo factor de potencia por vía global hay que aumentar la capacidad a instalar.

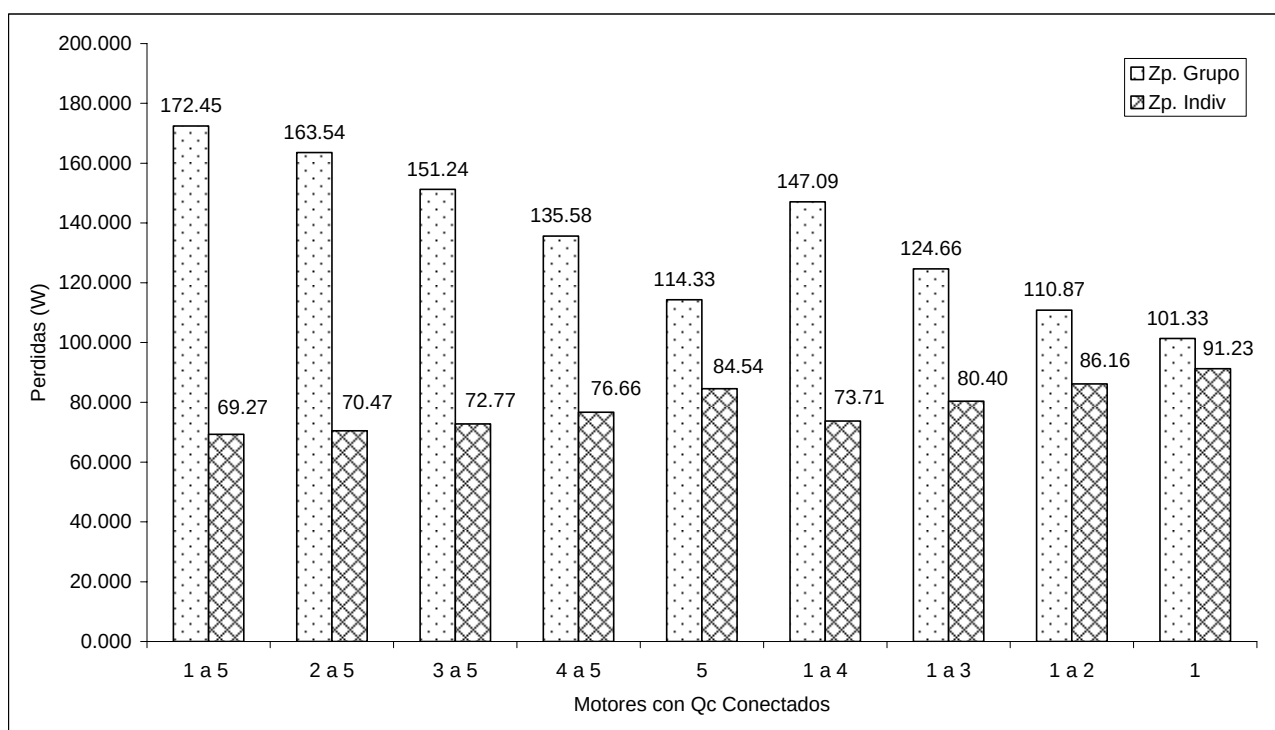


Figura 3.10. Pérdidas globales para compensación individual y en grupo

La figura 3.10 muestra las variaciones en las pérdidas totales del sistema para ambos tipos de compensación. Al igual que para el caso del factor de potencia, para la compensación individual se han obtenidos pérdidas por debajo de las obtenidas por compensación en grupo, por el mismo concepto.

Las variaciones se hacen más notables mientras mayor sea la capacidad a instalar, equivalente a la suma de individuales, y se diferencian en menor caso para baja capacidad, aunque esto es aparejado

a una reducción de pérdidas menos efectiva, que puede seguir influyendo en un bajo factor de potencia, aún penalizado por la UNE.

Potencia en kVA liberado por compensación

La tabla 3.11 muestra los resultados de la comparación para la compensación en grupo e individual referente a los kVA liberados

Tabla 3.11: Potencia en kVA liberado por compensación

	Comp. en grupo		Comp. Individual	
	kVA2	Δ kVA	kVA2	Δ kVA
1 a 5	285.20	25.51	265.24	45.47
2 a 5	286.76	23.95	267.41	43.30
3 a 5	289.30	21.41	271.57	39.14
4 a 5	292.86	17.85	279.11	31.60
5	300.26	10.45	292.86	17.85
1 a 4	289.94	20.77	273.28	37.43
1 a 3	296.51	14.20	285.51	25.20
1 a 2	301.99	8.72	295.84	14.87
1	306.59	4.12	304.45	6.26

De la tabla 3.11 y la figura 3.11 se deduce que durante la compensación individual se libera una mayor cantidad de potencia aparente que para compensación en grupo, aunque la diferencia no es grande, si se plantea el reto del análisis del trabajo en la carga.

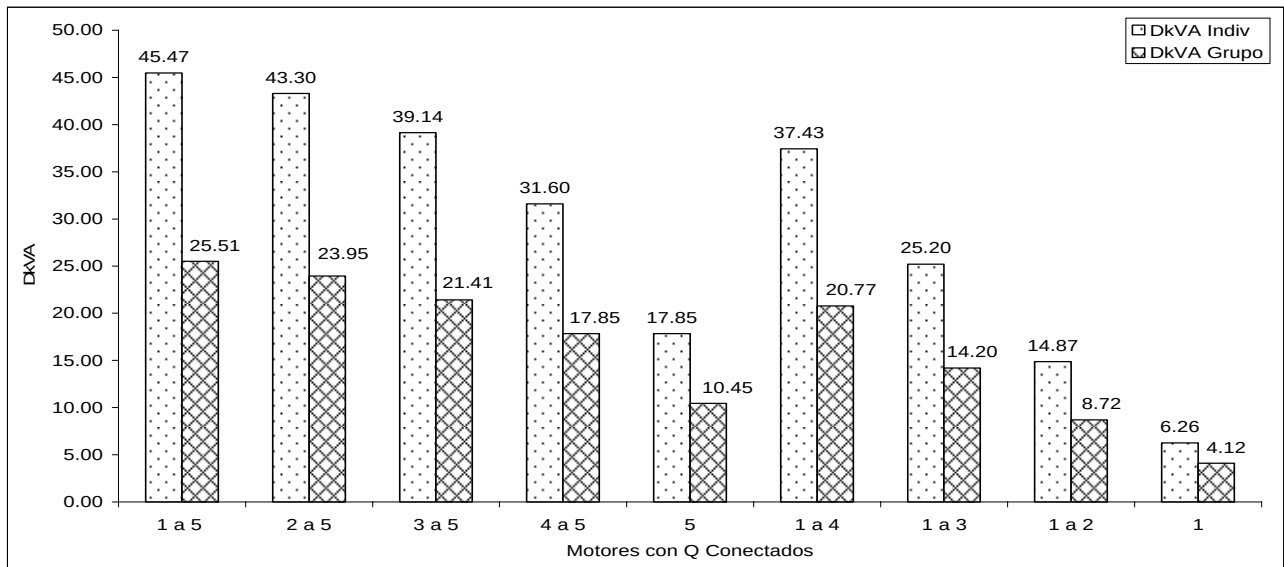


Figura 3.11: Potencia en kVA liberado por compensación

III.7. CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO III.

En este capítulo se determina la influencia que sobre las potencias activas y reactivas tienen el motor de inducción con rotor en jaula de ardilla. Se demostró a través de cálculo y de la simulación como el reactivo sin compensar provoca un incremento en el consumo de la corriente lo que trae consigo un aumento de las pérdidas eléctricas.

Fue determinada también la variación de tensión, pudiendo demostrar que un aumento del consumo de potencia reactiva provoca que aumente la tensión de alimentación por consiguiente las pérdidas magnéticas.

Se realizaron varias simulaciones en MATLAB que permiten observar de forma gráfica el comportamiento de los indicadores simulados.

La compensación individual supera técnicamente la compensación en grupo debido a la cercanía con la carga.

Conclusiones Generales

CONCLUSIONES GENERALES.

En el presente trabajo se logró realizar un estudio de las principales características del motor de inducción. Se tienen en cuenta para este estudio otros parámetros de las máquinas asíncronas, entre los que se encuentran el proceso de transformación de energía llevada a cabo en el motor y el funcionamiento de estos bajo condiciones distintas a las nominales. Para determinar la influencia del motor en el reactivo de la industria, se analizaron en primer lugar los factores que determinan el aumento del consumo de esta potencia y los equipos compensadores, llegando a la conclusión de que en caso de que no se efectúe la compensación mediante medidas organizativas se utilizarán condensadores estáticos. Las distintas formas de compensación, centralizada, compensación en grupos y compensación individual, deben ser bien analizadas antes de su implementación. Por último se determina la capacidad que debe ser instalada con el objetivo de elevar el factor de potencia actual que es de 0,59 hasta 0,94, por lo que disminuye el consumo de potencia reactiva, el valor de esta capacidad es de 1151,2 μf con lo que se reducirán las pérdidas y aumentará la eficiencia del taller.

Recomendaciones

RECOMENDACIONES

Después de realizado este trabajo proponemos como recomendaciones las siguientes:

- Utilizar este trabajo como material de estudio no solo en el centro sino a escala industrial, para profundizar en el conocimiento de los motores de inducción.
- Realizar el mismo análisis en los demás talleres de la empresa con el objetivo de determinar la influencia de toda la carga inductiva en el consumo de reactivo de la empresa.
- Determinación del número de condensadores y la ubicación de los mismos, para la compensación de la potencia reactiva.
- Emplear una de las formas de compensación propuestas, no sin analizarlas antes.

Bibliografía

Bibliográfica Consultada:

- [1]. Feodorove, A. A; Rodríguez, L. E. Suministro Eléctrico de Empresas Industriales. Editorial Pueblo y Educación. 1980.
- [2]. Kostenko, M; Piotrovsky, L. Máquinas Eléctricas. Tercera Edición. Ciudad de la Haban. Editorial Pueblo y Educación. 1982.
- [3]. Mc Person, G. An Introductuon to Electrical Machines and Transformers. Second Edition. 1989.
- [4]. Palma, L. F. J. Estudio de la carga actual de los motores asincrónicos e incidencia sobre el reactiva de la planta termoeléctrica de la Empresa Ernesto Che Guevara. Tesis de diplomado. ISMM. 1996.
- [5]. Reactive Power Compensation whit capacitors. Electrical Systemsand users. 1999.
- [6]. Romero, R. I. “Caracterización del motor de inducción, influencia en la industria”. CINAREM.2000
- [7]. SIEMENS – Motores Eléctricos – 1997.
- [8]. Voldek, A. I. Máquinas Eléctricas. Tomo II. La Habana. Editorial Pueblo y Educación. 1974.
- [9]. Weg – Manual de Motores Eléctricos.

Anexos

Anexo A. Aspectos Tecnológicos de las Máquinas Eléctricas:

- 4.1. Formas Constructivas.**
- 4.2. Carcasas y grados de protección.**
- 4.3. Clases de aislamiento.**
- 4.4. Potencia asignada de un motor.**
- 4.5. Pérdidas, calentamiento y refrigeración.**
- 4.6. Clases de servicio normalizadas.**

4.1 Formas constructivas

En la instalación de las maquinas eléctricas hay que considerar los requisitos de la maquina accionada en cuanto a la forma de efectuar el acoplamiento mecánico con el motor y la forma de anclaje de este. La posición en que se deberá instalar la maquina es función no solo de las características mecánicas del equipo al cual se acopla, sino también de la disponibilidad de espacio en el interior o en los alrededores de la maquina accionada o del local de la instalación. Los parámetros que se adoptan para la clasificación de estas formas constructivas son:

- a) La forma de fijación de la maquina, según sea por medio de patas a una base con rafles o directamente a la propia maquina accionada por medio de una brida.
- b) La existencia o no de cojinetes y de tapas laterales (la dos o solo una) y la propia disposición de esos cojinetes y de tapas, cuando existen.
- c) La existencia o no de un segundo extremo de eje libre, además de la existencia del primer extremo de eje libre como parte integrante del propio motor y no de la maquina accionada.

La designación de estas diferentes alternativas (en la figura 1 se pueden ver las disposiciones mas frecuentes) se lleva a cabo en el sistema simplificado de las Normas CEI mediante las letras IM (International Mounting Arrangement) seguidas de las letras B o V y dos dígitos, que indican:

- La letra B, que se trata de maquinas de eje horizontal y la letra V, de maquinas de eje vertical.

- Un numero de uno o dos dígitos que define la existencia o no de patas/ bridas, tipo de extremo de eje (diferenciado hacia arriba y hacia abajo para motores de eje vertical) , la accesibilidad de la brida , la existencia de tapas laterales y la fijación (suelo , techo, paredes, etc.) , de acuerdo con la figura 1.

4.4 Carcasas y grados de protección

La carcasa o envolvente de las maquinas eléctricas tiene las siguientes misiones:

- Sirve para fijar y sustentar las chapas magnéticas del estator.
- Transmite al suelo, o a la base o elemento en donde se apoya la maquina, el par de reacción que se ejerce sobre la misma.
- Evacua el calor producido por las perdidas. En su totalidad si se trata de maquinas de refrigeración superficial o solo parcialmente si existe un sistema de refrigeración específico.
- Sustenta los escudos porta cojinetes y eventualmente otros elementos auxiliares (tacogeneradores, sondas de temperatura, etc.)
- Protege los elementos internos de la maquina de la penetración de agentes externos (agua, polvo, partículas sólidas, etc.)

Símbolo	Esquema	Cojinetes	Carcasa	Eje	Generalidades
B3		2 tapas con cojinetes	Con patas	Libre	Montado sobre subestructuras
B35		2 tapas con cojinetes	Con Patas	Libre	Brida del lado de la carga. Montada sobre subestructura con fijación suplementaria por la brida
B5		2 tapas con cojinetes	Sin patas	Libre	Brida del lado de la carga. Fijada por la brida.
B6		2 tapas con cojinetes	Sin patas	Libre	Igual que B3, pero con tapas giradas 90°. Montada en pared, patas a la izquierda.
V1		2 tapas con cojinetes	Sin patas	Libre, para abajo	Brida del lado de la carga. Fijada por la brida abajo
V3		2 tapas con cojinetes	Sin patas	Libre, para arriba	Brida del lado de la carga. Fijada por la brida arriba

V36		2 tapas con cojinetes	Con patas	Libre, para arriba	Brida del lado de la carga. Montada sobre pared o subestructura con fijación suplementaria por la brida.
V5		2 tapas con cojinetes	Con patas	Libre, para abajo	Igual que B3. Montada sobre pared o subestructura.
V6		2 tapas con cojinetes	Con patas	Libre, para arriba	Igual que B3. Montada sobre pared o subestructura.

Figura 1. Tipos de formas constructivas según Norma CEI–Code I.

En las maquinas de tamaño pequeño y medio la construcción de la carcasa viene fijada, primordialmente, por las exigencias en cuanto al grado de protección de los elementos internos y a la necesidad de evacuación de calor al exterior.

En las normas CEI-34 y NEMA MG-1 se establece un sistema de especificación, en función del grado de protección conseguido, de aplicación general para cualquier aparato eléctrico bajo envolvente metálica. Según dicha norma, el grado de protección se designa con las letras IP (Índice de Protección) seguidas de tres dígitos, de los que, en el caso de maquinas eléctricas, solo se utilizan dos.

El significado de dichas cifras es el siguiente:

1. "cifra: caracteriza la protección de las personas frente a contactos bajo tensión y/ o piezas en movimiento en el interior, así como la protección de la maquina frente a la penetración de cuerpos sólidos extraños (Tabla 1)
2. "cifra: caracteriza la protección contra la penetración de agua (Tabla 2)
3. "cifra: caracteriza la protección contra daño mecánicos. No suele aparecer en maquinas eléctricas.

Los grados de protección mas habituales en las maquinas eléctricas son el IP23, que corresponde a motor abierto, en el que el aire de ventilación entra en el interior de la maquina, e IP44 e IP54, que corresponden a motor cerrado (el aire de refrigeración circula por el exterior de la carcasa, que dispone de aletas).

4.4 Clases de aislamiento

La función principal del aislamiento en las maquinas eléctricas consiste en separar partes que se encuentran a potenciales diferentes (conductores entre si, con respecto a la carcasa, a las chapas metálicas, etc.) Como ya se ha comentado anteriormente, la calidad del aislamiento suele determinar la fiabilidad de servicio de una maquina, ya que es el elemento mas sensible, especialmente a las temperaturas elevadas.

Se puede calcular de forma aproximada¹ la vida útil de un aislante por medio de la formula conocida como ley de Montsinger, que es una particularización de la ley de Arrhenius:

$$t_{util} = C \cdot e^{-\alpha T} \quad (1)$$

en donde:

t_{util} Es la vida esperada, en años, para el aislante.

C Es una constante que depende de las características del material

α Es una constante que depende de la clase térmica del material (Tabla 3)

T Es la temperatura a que esta sometido de forma permanente el aislante en grados centígrados.

Los valores de α están normalmente comprendidos entre 0.07 y 0.09, lo que hace que, por cada 8 o 10° C de elevación de temperatura, la vida útil se acorta en un factor de 2.

Tabla 2. Grado de protección 1^{ra} cifra significativa.

Primera cifra significativa	Grado de protección	
	Descripción abreviada	Definición
0	No protegido	Ninguna protección especial.
1	Protegido contra cuerpos sólidos superiores a 50 mm	Una gran superficie del cuerpo humano (por ejemplo, la mano), pero ninguna protección contra una penetración deliberada. Cuerpos sólidos de más de 50 mm de diámetro.
2	Protegido contra cuerpos sólidos superiores a 12 mm	Los dedos u objetos análogos que no excedan de 80 mm de longitud. Cuerpos sólidos de más de 12 mm de diámetro.

¹ Los valores calculados tienen un significado estadístico, no determinista. Se refieren al tiempo en el que el 10% de los elementos de la muestra han presentado fallos.

3	Protegido contra cuerpos superiores a 2.5 mm.	Herramientas, alambres, etc., de diámetro o espesor superiores a 2.5 mm. Cuerpos sólidos de más de 2.5 mm de diámetro.
4	Protegido contra cuerpos sólidos superiores a 1 mm	Alambres o bandas de espesor superior a 1 mm. Cuerpos sólidos de más de 1 mm de diámetro.
5	Protegido contra el polvo	No se impide del todo la penetración de polvo, pero éste no puede penetrar en cantidad suficiente como para perjudicar el buen funcionamiento del material.
6	Totalmente protegido contra el polvo.	No hay penetración de polvo.

Tabla 3 Grados de protección. 2ª cifra significativa.

Segunda Cifra Significativa	Grado de Protección	
	Descripción Abreviada	Definición
0	No protegido	Ninguna protección especial
1	Protegidas contra las caídas verticales de gotas de agua	Las gotas de agua que caen verticalmente no deben producir efectos perjudiciales
2	Protegido contra las caídas de agua con una inclinación de 15°	La caída vertical de agua no deben producir efectos perjudiciales cuando la envolvente esta inclinada hasta 15° de su posición normal.
3	Protegido contra el agua en forma de lluvia	El agua que caiga en forma de lluvia en una dirección que tenga respecto de la vertical un ángulo inferior o igual a 60° no debe producir efectos perjudiciales
4	Protegido contra las proyecciones de agua	El agua proyectada sobre la envolvente desde cualquier dirección no debe producir efectos perjudiciales
5	Protegido contra los chorros de agua	El agua lanzada sobre la envolvente por una boquilla desde cualquier dirección no debe producir efectos perjudiciales
6	Protegido contra los embates del mar	Con mar gruesa o mediante chorros potentes el agua no deberá penetrar en la envolvente en cantidad perjudicial
7	Protegido contra los efectos de la inmersión	No debe ser posible que el agua penetre en cantidad perjudicial en el interior de la envolvente sumergida en agua, con una presión y un tiempo determinado
8	Protegido contra la inmersión prolongada	El material es adecuado para la inmersión prolongada en agua en las condiciones especificadas por el fabricante

Esto hace que la potencia que es capaz de suministrar una maquina venga esencialmente por la calidad de su aislamiento o, dicho de una forma mas precisa, por la capacidad de los materiales aislantes empleados de soportar la temperatura sin perder sus cualidades aislantes. Las Normas UNE 21-305 y CEI 85 especifican una clasificación de los diferentes aislantes atendiendo a su comportamiento térmico, y los agrupa en las diferentes *clases de aislamiento*. Sus características fundamentales se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4: Clasificación térmica de los aislantes.

Denominación Clase	Temp. Máx.	Tipos de materiales
Y	90 ⁰	Materiales fibrosos a base de celulosa o seda, no impregnados en líquidos aislantes (*)
A	105 ⁰	Materiales fibrosos a base de celulosa o seda, impregnados con líquidos aislantes o materiales semejantes (*)
E	120 ⁰	Fibras orgánicas sintéticas
B	130 ⁰	Materiales a base de poliéster y polimidicos aglutinados con materiales orgánicos o impregnados en estos
F	155 ⁰	Materiales a base de fibra de mica , amianto y fibra de vidrio aglutinados con materiales sintéticos, como siliconas, poliésteres o epoxidos .
H	180 ⁰	Materiales a base de mica, asbestos o fibra de vidrio aglutinados con siliconas de alta estabilidad térmica, armadías (NOMEX) (**).
200	200 ⁰	Mica, vidrio, cerámica, etc.
220	220 ⁰	Mica, vidrio, cerámica, etc., poliamidas (KAPTON) (**)
250	250 ⁰	Mica, vidrio, cerámica, etc. ,poliamidas (KAPTON) (**).

(*) Este tipo de materiales esta actualmente en desuso

(**) NOMEX y KAPTON son marcas registradas de Du Post Co.

4.4 Potencia asignada de un motor

Se entiende por potencia asignada de un motor eléctrico en régimen continuo (es decir suministrando una potencia constante de forma ininterrumpida) aquella que el motor puede suministrar en condiciones normales de funcionamiento ² durante una vida útil suficientemente larga. Es un valor que determina el fabricante en función, principalmente, de la duración de los aislamientos, que como se ha dicho constituyen por lo general el factor limitativo por efecto del calentamiento.

Durante el funcionamiento en régimen permanente la potencia solicitada al motor (en W) es el producto del par (en N. m) por la velocidad angular (en rad/s).

$$p = m \cdot \omega \quad (2)$$

Es importante señalar que la potencia solicitada al motor la define la carga, con independencia de la potencia asignada del motor. Una carga que demande 80kW, los solicitará tanto si es movida por un motor de 60kW como si por uno de 120kW. En el primer caso el motor estará sobrecargado y, si es capaz de suministrar el par solicitado, sufrirá un severo calentamiento. En el segundo, el motor trabajará parcialmente descargado, con bajo factor de potencia si es de c.a, y desde luego en condiciones de explotación económica poco favorables.

Cuando el motor funciona con un régimen de carga variable, es mas difícil establecer cual es la potencia media efectiva, necesaria para una adecuada elección de la potencia nominal del motor. Es lógico pensar que si un motor trabaja en vacío una buena parte del ciclo de trabajo podrá admitir sobrecargas temporales de mayor intensidad (siempre que pueda suministrar el par de la carga), ya que la elevación de temperatura será menor que la máxima admisible.

Teniendo en cuenta que las pérdidas por efecto Joule en los devanados son proporcionales al cuadrado de la intensidad, y admitiendo en primera aproximación que esta es proporcional a la potencia del motor y que la elevación de temperatura es directamente proporcional a las pérdidas, la *potencia eficaz* durante el ciclo de trabajo se puede calcular como el valor medio cuadrático de la potencia instantánea durante un periodo completo:

$$P_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt} \quad (3)$$

Esta potencia eficaz es la que, aplicada de forma continua, produciría la misma sollicitación térmica que la carga real considerada.

En las situaciones reales hay otros muchos factores, como son el funcionamiento² intermitente con periodos de reposo (o incluso con periodos de frenado, que producen calentamientos mucho más fuertes que en marcha normal) o la forma de refrigeración del motor. No es lo mismo un motor refrigerado por un ventilador dispuesto sobre el propio eje que otro en el que el ventilador esta accionado por un motor independiente.

² Las condiciones de funcionamiento aceptadas como normales son las de funcionamiento son las de funcionamiento a una altitud inferior a 1.000 metros, temperatura ambiente no superior a 40⁰ C, ambiente con bajo nivel de humedad y de polvo, ausencia de vibraciones, y , en el caso de motores de corriente alterna trifásicas , alimentación con tensiones equilibradas y sin distorsión armónica apreciable .

En el segundo caso, el motor continúa evacuando calor durante los periodos de reposo, mientras que en el primero la eficacia de la refrigeración a velocidad baja o nula se reduce enormemente.

Una expresión práctica para el cálculo de la potencia eficaz es la siguiente:

$$P_{ef} = \sqrt{\frac{P_{fi}^2}{\sum t_{fi} + \frac{t_{pi}}{k_v}}} \quad (4)$$

Donde:

P_{ef} Es la potencia eficaz con el sentido que se le ha atribuido anteriormente

P_{fi} Es la potencia solicitada al motor durante el periodo de funcionamiento i

t_{fi} Es la duración del periodo de funcionamiento i

t_{pi} Es la duración del periodo de parada i

k_v Es un coeficiente comprendido entre 1 y 3 que depende de la forma de refrigeración del motor

4.5. Pérdidas, calentamiento y refrigeración

Las maquinas eléctricas son dispositivos de conversión de energía que, en comparación con otros dispositivos técnicos, presentan unas perdidas de energía muy pequeñas en términos relativos. Ello significa que las irreversibilidades del proceso global son muy pequeñas. De hecho, el proceso de conversión electromecánica en si es completamente reversible. Las irreversibilidades asociadas al mismo son debidas al carácter no ideal de los materiales electrotécnicos (resistencia de los conductores y perdidas asociadas al campo magnético) o mecánicos (rozamientos).

Estas perdidas de energía producidas durante el funcionamiento de las maquinas eléctricas se convierten en energía térmica cuya evacuación implica una elevación de la temperatura de la maquina sobre la temperatura ambiente que resulta necesaria para que se produzca un flujo de calor desde la maquina a la atmósfera o al medio refrigerante externo. Tanto los procesos que originan dichas perdidas como su valor por unidad de tiempo (potencia de perdidas) y la forma en que se transmiten al exterior (método de refrigeración) condicionan la temperatura que pueden llegar a alcanzar cada una de las partes de la maquina y, por tanto, la clase de aislamiento de la misma.

De acuerdo con la tabla 5 podemos clasificar las pérdidas, por su origen, en pérdidas en el cobre (o en los devanados), en el hierro o pérdidas mecánicas. Es una primera aproximación cabría pensar que las pérdidas en los conductores se deben al efecto Joule, a causa de la intensidad que circula por los devanados, por lo mismo que las pérdidas en el hierro cabe asociarlas a los fenómenos de histéresis y de corrientes de Foucault en aquellas máquinas en donde existen máquinas en donde existan campos alternativos.

Tabla5: Clasificación de las pérdidas en máquinas eléctricas.

	Normales	Adicionales
Perdidas eléctricas (en conductores)	Efecto Joule en el cobre (RI^2). Por la resistencia de contacto en escobillas	Por variación local de la inducción y por efecto pelicular
Perdidas en el hierro	Normales (histéresis + corrientes parasitas)	Debido al efecto del rasurado pulsaciones de densidad de flujo) y a los armónicos de campo magnético
Perdidas mecánicas	Rozamiento en: Escobillas, Cojinetes, Fricción y Ventilación	

Sin embargo, en máquinas reales pueden producirse pérdidas en el cobre en devanados que no conducen corriente (en vacío) o pérdidas en el hierro en máquinas cuyo campo magnético es constante en el tiempo. Estos dos tipos de pérdidas constituyen lo que se denomina pérdidas adicionales o suplementarios.

Finalmente existen las pérdidas mecánicas o asociadas al sistema mecánico y que tienen su origen básicamente en tres fuentes: pérdidas por rozamiento, pérdidas por fricción y pérdida por ventilación. Las primeras se producen allí donde hay un elemento fijo que roza con uno móvil. Es el caso de las pérdidas que se producen en los cojinetes que soportan el rotor de la máquina, ya sean estos de fricción o de bodas. Pero también se producen en las máquinas que poseen escobillas fijas al estator que rozan contra algún elemento conductor situado en el rotor. Las segundas se producen por fricción de las partes móviles con el aire (o el fluido) en contacto con ellas. Estas pérdidas solo se podrían evitar haciendo funcionar la máquina en el vacío, pero en este caso no habría fluido refrigerante en contacto con la máquina para evacuar las demás pérdidas de energía. Finalmente las pérdidas por ventilación corresponden a la potencia necesaria para impulsar el caudal de fluido de refrigeración.

Esta impulsión puede producirse por medio de un ventilador calado sobre el propio eje de la maquina o por un ventilador externo accionado por un motor auxiliar. Esta ultima solución se utiliza en maquinas que deban funcionar durante largos periodos a muy baja velocidad, en las que la eficiencia del ventilador sobre el propio eje para producir la circulación forzada de fluido refrigerante seria enormemente baja.

4.6 Clases de servicio normalizadas.

Aunque existen en la práctica infinidad de regímenes de servicio con carga variable, dependiendo de las características de cada accionamiento, la Norma UNE 20-113 (o su correspondiente, la CEI 34-1) define una serie de regímenes de servicios normalizados, cada uno de los cuales lleva asociado un denominado *factor de marcha* t_r definido como el cociente entre el tiempo de funcionamiento en carga y la duración total del ciclo de trabajo. Las ocho *clases de servicio normalizadas* se designan por las letras S1 a S* y se resumen en la tabla 6.

Tabla 6: Clases de servicio normalizadas.

Clase	Denominación	Observaciones
S1	Servicio Continuo	Funcionamiento a plena carga hasta alcanzar la temperatura de equilibrio
S2	Servicio de corta duración	Potencia constante durante un tiempo determinado. No se alcanza la temperatura final
S3	Servicio intermitente periódico	Funcionamiento cíclico a potencia constante alternado tiempos de funcionamiento y de parada
S4	Servicio intermitente periódico con arranques	Lo mismo que S3 pero con influencia apreciable del arranque en el calentamiento
S5	Servicio intermitente periódico con arranque y frenado	Lo mismo que S4 pero con influencia apreciable del frenado en el calentamiento
S6	Servicio continuo periódico	Funcionamiento cíclico a potencia constante alternado tiempos de funcionamiento en carga y en vacío
S7	Servicio continuo periódico con arranque	Lo mismo que S6 pero con influencia apreciable del arranque en el calentamiento
S8	Servicio continuo periódico con arranque y frenado	Lo mismo que S7 pero con influencia apreciable del frenado en el calentamiento

Anexo B: Tablas.

Tabla: 7 Datos de los motores a reparar.

No	Potencia(kW)	Velocidad(rpm)	Voltaje nominal(V)
1	0,65	1800	440
2	0,65	3600	440
3	0,66	1800	440
4	0,66	1800	440
5	0,66	1800	440
6	0,66	1800	440
7	0,73	3600	440
8	0,75	1800	440
9	0,75	1800	440
10	0,75	1800	440
11	0,75	1800	440
12	0,75	1800	440
13	0,75	3600	440
14	0,95	3600	440
15	0,95	3600	440
16	0,95	1800	440
17	0,95	3600	440
18	1,1	1200	440
19	1,5	1800	440
20	1,5	1800	440
21	1,5	1800	440
22	1,5	1800	440
23	1,5	1800	440
24	1,5	1800	440
25	1,5	1800	440
26	1,5	1800	440
27	1,5	1800	440
28	1,8	1800	440
29	2,2	1800	440
30	2,2	1800	440
31	2,2	1200	440
32	2,2	3600	440
33	2,2	1200	440
34	2,2	1200	440

35	2,2	1200	440
36	3	1800	440
37	3	1800	440
38	3	1800	440
39	3	1800	440
40	3	1800	220
41	3	1800	440
42	3	1800	220
43	3	1800	440
44	3	1800	440
45	3	1200	440
46	3,2	3600	440
47	4	1200	220
48	4	1800	440
49	4	1800	440
50	4	1800	440
51	4	1800	440
52	4	1800	440
53	4	1800	440
54	5,5	1800	440
55	5,5	1800	220
56	5,5	1800	440
57	5,5	1800	440
58	5,5	1800	440
59	5,5	3600	440
60	7,5	1800	440
61	7,5	1800	440
62	7,5	1200	440
63	7,5	1200	440
64	7,5	1800	440
65	7,5	1800	440
66	7,5	1800	440
67	7,5	1800	440
68	7,5	1800	220
69	7,5	1800	440
70	7,5	1800	440
71	7,5	1800	440
72	10	1800	220
73	10	1800	220
74	11	1800	440

75	11	1800	440
76	11	1800	440
77	11	885	440
78	11	885	440
79	11	1800	440
80	11,5	1800	440
81	17	1200	440
82	17	1800	440
83	17	1800	440
84	17,5	1800	440
85	18,5	1200	440
86	18,5	1200	440
87	18,5	1200	440
88	22	900	440
89	22	885	440
90	22	1800	440
91	22	1800	440
92	22	885	440
93	22	885	440
94	22	885	440
95	22	1200	440
96	22	900	440
97	22	900	440
98	22	885	440
99	30	1800	440
100	30	1200	440
101	30	1200	440
102	30	1200	440
103	30	1200	440
104	40	3600	440
105	40	1200	440
106	55	1800	440
107	55	1800	440
108	55	1200	440
109	55	1800	440
110	55	1800	440
111	55	1800	440
112	55	1800	440
113	55	1800	440
114	55	1800	440

115	55	1200	440
116	55	1200	440
117	55	1800	440
118	55	1800	440
119	55	1800	440
120	55	1800	440
121	55	1200	440
122	55	1800	440
123	55	1800	440
124	55	1800	440
125	55	1800	440
126	55	1800	440
127	55	1800	440
128	55	1800	440
129	55	1800	440
130	75	3600	440
131	86	1800	440
132	90	885	440
133	90	900	440
134	90	885	440
135	90	885	440
136	90	885	440
137	90	885	440
138	90	885	440
139	110	3600	440
140	110	1200	440
141	110	3600	440
142	110	885	440
143	110	885	440
144	120	1800	440
145	120	1200	440
146	121	1200	440
147	132	885	440
148	160	1200	440
149	220	1800	440
150	315	3600	440

Tabla: 8 Leyenda correspondiente a la Metodología 1.

Leyenda para la utilización de la Metodología 1	
ACON	Área del conductor (mm ²).
AMP	Corriente de fase (A).
AN	Área neta de la ranura (mm ²).
ALFA	Paso de bobina (grados eléctricos).
ATD	Área de los dientes bajo el polo (mm ²).
ATR	Área de la culata o tras la ranura (mm ²).
B	Altura de la ranura (mm).
BCC	Densidad del flujo máximo permisible en la culata (T).
BETA	Paso de ranura.
BTH	Densidad de flujo máxima permisible en el diente.
BINT	Intercepto de las rectas en las características del factor de espaciamento.
DAX	Longitud axial bruta del grupo (mm).
ACOR	Densidad de corriente (A/mm).
DMD	Anchura mínima del diente (mm).
DN	Longitud axial neta del núcleo (mm).
EF	Eficiencia.
F	Frecuencia.
FD	Factor de distribución.
FDA	Factor de devanado para el devanado auxiliar.
FDP	Factor de devanado para el devanado principal.
FE	Factor de espaciamento.
EP	Factor de paso.
EPP	Flujo por polo.
GA	Espesor del aislamiento (mm).
IM	Corriente del devanado principal.
NA	Numero de vueltas del devanado auxiliar.
NF	Numero de vueltas por fase.
NC	Numero de vueltas por bobina.
NM	Numero de vueltas del devanado principal.
NP	Numero de vueltas por polo.
NR	Numero de conductores por ranuras.
NT	Numero de vueltas totales.
P	Numero de polos.
PEND	Pendiente en la recta en las características de factor de espaciamento.
S	Numero de ranuras.
SB	Base mayor de la ranura (mm).
ST	Base menor de la ranura (mm).
PC	Espesor de la cuña (mm).
VN	Numero de conductores de ventilación.
WN	Ancho de cada conducto de ventilación (mm).
Z	Numero de bobinas por polo y por fase.

Tabla: 9. Valores de inducción mag. Estandarizados según la potencia mecánica.

Parámetro	Potencia (Kw.)	Mínimo	Máximo
$B\delta$	>100	0.90	1.00
$B\delta$	10-100	0.70	0.90
$B\delta$	1-10	0.60	0.70
$B\delta$	≤ 1	0.30	0.60
B_c	>100	1.40	1.70
B_c	10-100	1.30	1.60
B_c	1-10	1.20	1.60
B_c	≤ 1	1.10	1.50
B_z	>100	1.80	2
B_z	10-100	1.40	1.80
B_z	1-10	1.40	1.60
B_z	≤ 1	1.30	1.50
$J(A/mm^2)$	>100	3	5
$J(A/mm^2)$	10-100	4	5.50
$J(A/mm^2)$	1-10	5	6
$J(A/mm^2)$	≤ 1	6	8
$A(A)$	>100	350	600
$A(A)$	10-100	250	400
$A(A)$	1-10	200	300
$A(A)$	≤ 1	150	200
Ku 1 capa	>100	0.45	0.45
Ku 1 capa	10-100	0.43	0.43
Ku 1 capa	1-10	0.40	0.40
Ku 1 capa	≤ 1	0.37	0.37
Ku 2 capa	>100	0.42	0.42
Ku 2 capa	10-100	0.40	0.40

Ku 2 capa	1-10	0.37	0.37
Ku 2 capa	≤1	0.35	0.35

Tabla 10: Valores de Imag. En el entrehierro según el número de polo, el paso polar y el tipo de máquina.

Valores de Imag. en el entrehierro según el número de polos, el paso polar y el tipo de máquina.			
Número de polos	Paso polar (cm)	Tipo de máquina	Bδ (T)
2	4	Protegidas	0,8
4	4	Protegidas	0,8
6	4	Protegidas	0,8
8	4	Protegidas	0,8
2	4	Cerrada ventilada	0,8
4	4	Cerrada ventilada	0,8
6	4	Cerrada ventilada	0,8
8	4	Cerrada ventilada	0,8
2	4	Pequeñas	0,5
4	4	Pequeñas	0,6
2	6	Protegidas	0,8
4	6	Protegidas	0,8
6	6	Protegidas	0,7
8	6	Protegidas	0,72
2	6	Cerrada ventilada	0,8
4	6	Cerrada ventilada	0,8
6	6	Cerrada ventilada	0,65
8	6	Cerrada ventilada	0,67
2	6	Pequeñas	0,51
4	6	Pequeñas	0,65
2	8	Protegidas	0,8
4	8	Protegidas	0,69
6	8	Protegidas	0,72
8	8	Protegidas	0,73
2	8	Cerrada ventilada	0,8
4	8	Cerrada ventilada	0,64
6	8	Cerrada ventilada	0,66
8	8	Cerrada ventilada	0,68
2	8	Pequeñas	0,52
4	8	Pequeñas	0,8
2	10	Protegidas	0,63
4	10	Protegidas	0,7
6	10	Protegidas	0,73
8	10	Protegidas	0,76
2	10	Cerrada ventilada	0,59
4	10	Cerrada ventilada	0,65
6	10	Cerrada ventilada	0,67
8	10	Cerrada ventilada	0,69

2	10	Pequeñas	0,53
4	10	Pequeñas	0,8
2	20	Pequeñas	0,67
4	20	Pequeñas	0,74
6	20	Protegidas	0,76
8	20	Protegidas	0,79
2	20	Cerrada ventilada	0,62
4	20	Cerrada ventilada	0,66
6	20	Cerrada ventilada	0,69
8	20	Cerrada ventilada	0,7
2	20	Pequeñas	0,8
4	20	Pequeñas	0,8
2	30	Protegidas	0,72
4	30	Protegidas	0,77
6	30	Protegidas	0,79
8	30	Protegidas	0,82
2	30	Cerrada ventilada	0,64
4	30	Cerrada ventilada	0,68
6	30	Cerrada ventilada	0,7
8	30	Cerrada ventilada	0,72
2	30	Pequeñas	0,8
4	30	Pequeñas	0,8
2	40	Protegidas	0,75
4	40	Protegidas	0,79
6	40	Protegidas	0,81
8	40	Protegidas	0,8
2	40	Cerrada ventilada	0,65
4	40	Cerrada ventilada	0,69
6	40	Cerrada ventilada	0,71
8	40	Cerrada ventilada	0,8
2	40	Pequeñas	0,8
4	40	Pequeñas	0,8

Tabla 11. Valores del coeficiente K_e :

Valores del coeficiente K_e		
Numero de polos	Diámetro exterior del estator (m)	K_e
2	0,0166	0,97
2	0,05	0,972
2	0,1	0,9725
2	0,106	0,974
2	0,1312	0,976
2	0,1375	0,977
2	0,156	0,98
2	0,175	0,982
2	0,22	0,9832
2	0,24	0,9845
2	0,25	0,985
2	0,3	0,986

2	0,31	0,9862
2	0,35	0,986
2	0,41	0,9878
2	0,42	0,988
2	0,43	0,988
2	0,6	0,99
2	0,98	0,99
2	1	0,99
4	0,0166	0,945
4	0,05	0,947
4	0,1	0,951
4	0,106	0,952
4	0,1312	0,958
4	0,1375	0,96
4	0,156	0,9625
4	0,175	0,965
4	0,22	0,97
4	0,24	0,9715
4	0,25	0,9725
4	0,3	0,976
4	0,31	0,977
4	0,34	0,9782
4	0,35	0,98
4	0,41	0,9822
4	0,42	0,9825
4	0,43	0,9827
4	0,6	0,9853
4	0,98	0,9896
6	1	0,9896
6	0,0166	0,911
6	0,05	0,92
6	0,1	0,98
6	0,106	0,93
6	0,1312	0,938
6	0,1375	0,94
6	0,156	0,946
6	0,175	0,95
6	0,22	0,957
6	0,24	0,96
6	0,25	0,962
6	0,3	0,966
6	0,31	0,9668
6	0,35	0,97
6	0,41	0,973
6	0,42	0,9713
6	0,43	0,974
6	0,6	0,98
6	0,98	0,988
8	1	0,988

8	0,0166	0,9
8	0,05	0,9
8	0,1	0,9
8	0,106	0,9
8	0,1312	0,9
8	0,1375	0,905
8	0,156	0,912
8	0,175	0,919
8	0,22	0,933
8	0,24	0,937
8	0,25	0,94
8	0,3	0,949
8	0,31	0,95
8	0,35	0,955
8	0,41	0,96
8	0,42	0,961
8	0,43	0,961
8	0,6	0,97
8	0,98	0,979
10	1	0,98
10	0,0166	0,954
10	0,05	0,954
10	0,1	0,954
10	0,106	0,954
10	0,1312	0,954
10	0,1375	0,954
10	0,156	0,954
10	0,175	0,954
10	0,22	0,954
10	0,24	0,954
10	0,25	0,954
10	0,3	0,954
10	0,31	0,954
10	0,35	0,954
10	0,41	0,954
10	0,42	0,954
10	0,43	0,954
10	0,6	0,954
10	0,98	0,972
12	1	0,974
12	0,0166	0,941
12	0,05	0,941
12	0,1	0,941
12	0,106	0,941
12	0,1312	0,941
12	0,1375	0,941
12	0,156	0,941
12	0,175	0,941
12	0,22	0,941

12	0,24	0,941
12	0,25	0,941
12	0,3	0,941
12	0,31	0,941
12	0,35	0,941
12	0,41	0,941
12	0,42	0,941
12	0,43	0,941
12	0,6	0,941
12	0,98	0,963
12	1	0,965

Anexo C: Algoritmo para el cálculo de la eficiencia y las características de funcionamiento.

Para iniciar la aplicación del algoritmo y ganar en precisión se parte de los parámetros del circuito equivalente del motor de inducción y otros datos nominales siguientes:

- Tipo de conexión ‘Delta’ o ‘Estrella’;
- Velocidad nominal, n_n en rev/min
- Parámetros del circuito equivalente (R_s , R_r , X_s , X_r , R_m y X_m).
- Temperatura ambiente a la que se midió la resistencia, T_t en °C.

Los datos siguientes pueden ser vectores filas

- Temperatura de trabajo del devanado T_s , en °C.
- Velocidad del rotor, rpm , en rev/min
- Tensión de alimentación (de línea) según la conexión, U_{al} en V.

Metodología de cálculo principal

Deslizamiento normal

$$S_t = \frac{n_1 - rpm}{n_1} \quad (5)$$

Resistencia del estator y deslizamiento corregido para la temperatura de ensayo

$$R_s = R_t \cdot \left(\frac{T_s + k}{T_t + k} \right) \quad S_s = S_t \cdot \left(\frac{T_s + k}{T_t + k} \right) \quad (6)$$

donde: R_s , $S_s \Rightarrow$ Resistencia del devanado en Ohm y deslizamiento a la temperatura, T_s .

R_t , $S_t \Rightarrow$ Resistencia del devanado en Ohm y deslizamiento medido a T_t

$T_s \Rightarrow$ Temperatura específica del devanado en °C

$T_t \Rightarrow$ Temperatura cuando fue medida la resistencia en oC.

$k \Rightarrow$ Coeficiente 234.5 para el Cu y 225 para el aluminio.

Después de esto se toma la tensión y corriente de fase según la conexión del devanado del estator:

Para estrella $U_f = \frac{U_L}{\sqrt{3}}; \quad I_f = I_L$ y para delta $I_f = \frac{I_L}{\sqrt{3}}; \quad U_f = U_L$

(7)

Deslizamiento a plena carga

$$s_{fl} = \frac{n_1 - n_n}{n_1} \quad (8)$$

La reactancia del rotor se obtiene considerando la clase de diseño del motor según NEMA

Tabla 11: Distribución empírica de reactancias de dispersión en motores de inducción

Clase de Motor	Descripción	Fracción de $X_1 + X_2$	
		X_1	X_2
A	Par de arranque normal, corriente de arranque normal	0.5	0.5
B	Par de arranque normal, corriente de arranque baja	0.4	0.6
C	Par de arranque alto. corriente de arranque baja	0.3	0.7
D	Par de arranque alto. alto deslizamiento	0.5	0.5
Rotor devanado	El desempeño varía con la resistencia del rotor	0.5	0.5

Fuente: Norma 112 de IEEE

La resistencia que refleja las pérdidas adicionales de acuerdo al rango de potencia se toma por la siguiente expresión

$$R_{sl} = k_{pot} R_r \frac{(1 - s_n)}{s_n} \quad \text{Donde } k_{pot} \text{ es el coeficiente de potencia según la tabla 12.}$$

Tabla 12: Valores asumidos de las pérdidas adicionales*.

Rango de potencia		Pérdidas adicionales en porcentaje de la potencia de salida nominal
1-125 hp	1-90 kW	1.8%
126-500 hp	91-375 kW	1.5%
501-2499 hp	376-1850 kW	1.2%
2500 hp y mayores	1851 kW y mayores	0.9%

Fuente: IEEE Std 112-1996

Circuito equivalente empleado para el análisis

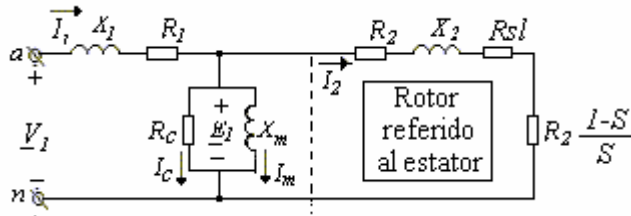


Figura 2: Circuito equivalente en T.

Impedancia del rotor en función del deslizamiento corregido

$$Z_r = \left(\frac{R_r}{S_s} + R_{sl} \right) + j \cdot X_r \quad (9)$$

Impedancia del estator

$$Z_s = R_s + j \cdot X_s \quad (10)$$

Impedancia de la rama de magnetización para circuito equivalente con rama en paralelo

$$Z_m = \frac{R_m \cdot jX_m}{R_m + j \cdot X_m} \quad (11)$$

Impedancia equivalente del motor según circuito equivalente (Z_{total})

$$Z_{total} = Z_s + \frac{Z_r \cdot Z_m}{Z_r + Z_m} \quad (12)$$

Circuito equivalente de Thevenin

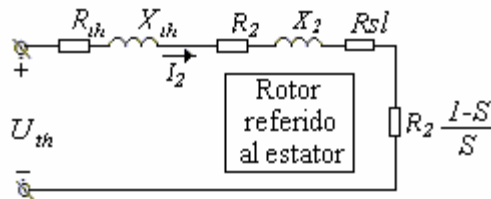


Figura 3: Circuito equivalente de Thevenin

Tensión e impedancia equivalente de Thevenin

$$U_{th} = U_f \cdot \frac{Z_m}{Z_s + Z_m} \quad Z_{th} = Z_s \cdot \frac{Z_m}{Z_s + Z_m} \quad (13)$$

Corriente del estator en forma compleja

$$I_{cs} = \frac{U_f}{Z_{total}} \quad (14)$$

Tensión en la rama de magnetización

$$U_m = U_f - I_{cs} \cdot Z_s \quad (15)$$

Corriente del rotor en forma compleja

$$I_r = \frac{U_{th}}{Z_{th} + Z_r} \quad (16)$$

Componente reactiva y activa de la corriente de magnetización

$$I_{mr} = \frac{U_m}{jX_m} \quad I_{ma} = \frac{U_m}{R_m} \quad (17)$$

Potencia de entrada calculada por el CE en W.

$$P_{inc} = 3 \cdot \left(I_s^2 \cdot R_s + I_r^2 \cdot \left(\frac{R_r}{S} + R_{sl} \right) + I_{ma}^2 \cdot R_m \right) \quad (18)$$

Potencia de salida sin tener en cuenta las pérdidas mecánicas

$$P_{sal} = 3 \cdot I_r^2 \cdot R_r \cdot \frac{1-S}{S} \quad (19)$$

Las pérdidas adicionales con la carga estimada

$$P_{sl} = 3 \cdot I_r^2 \cdot R_{sl} \quad (20)$$

Eficiencia y factor de potencia por el circuito equivalente, en %

$$Eff = \frac{P_{sal}}{P_{inc}} \cdot 100\% \quad f_{ps} = \frac{P_{inc}}{3 \cdot U_f \cdot I_f} \quad (21)$$