

Capítulo 6. Mediciones para Administración de Energía

6.1 Introducción

Durante los primeros tres cuartos del siglo XX la medición de potencia y energía eléctrica fue dominada por voltímetros, amperímetros y contadores electromecánicos convencionales. Solo durante las últimas décadas ha existido disponibilidad de dispositivos de estado sólido basados en microcontroladores para aplicación en el mercado comercial e industrial.

Estos nuevos dispositivos realizan las tareas de hasta 24 medidores de indicación convencional por el precio de 3. La comunicación por medio de protocolos tales como RS-485 para permitir que una PC supervise hasta 70 variables incluyendo horas y fechas, mínimos y máximos, indicación de temperatura, y alarmas de administración de energía.

Análisis de formas de ondas complejas también pueden ser realizados para problemas armónicos asociados típicamente con Variadores de Velocidad (ASD por sus iniciales en inglés) que han sido instalados en ventiladores y bombas para ahorrar energía. Puesto que los sistemas de medición son esenciales para que un proceso de administración de energía sea exitoso, se debe dar consideración a la aplicación de lo último en tecnología de medición.

Debe observarse que los medidores por si solos no ahorran dinero, puesto que ellos pueden ser muy costosos en términos de instalación y mantenimiento. Si embargo, por medio de una medición, registro y análisis apropiados el uso de medidores puede permitir tomar acciones correctivas que producen el resultado deseado de reducir energía por unidad de producción o por servicios realizados.

La experiencia ha demostrado que se puede conseguir una reducción en consumo del 1-2% después que los medidores son instalados tan solo con hacer saber a los usuarios que ellos están siendo supervisados. Hasta un 5% de reducción total puede ocurrir cuando los usuarios se vuelven proactivos en un mejor manejo en el uso de la energía. Ultimadamente, una reducción total de hasta un 10% se puede conseguir cuando la medición está conectada directamente al proceso por medio de un Controlador Lógico Programable (PLC por sus iniciales en ingles) o un Sistema de Control Distribuido (DCS por sus iniciales en ingles), en un arreglo de control de proceso automático de lazo cerrado.

6.2 Relaciones entre parámetros en un estudio de un sistema de potencia eléctrica

Si solo se dispone de instrumentación limitada, los parámetros desconocidos del sistema de potencia pueden ser calculados sobre la base de variables conocidas. Con el propósito de que sean validos, los cálculos deben estar basados en lecturas simultáneas de las variables conocidas. Por ejemplo, el factor de potencia puede ser calculado si la potencia (en kilowatts) y la potencia aparente (en kilovoltamperios) son conocidas, dado que las lecturas del vatímetro y el kilovoltamperímetro fueron tomadas simultáneamente, o razonablemente cercanas bajo condiciones de estado estable garantizadas. (Ver Figura 6-1)

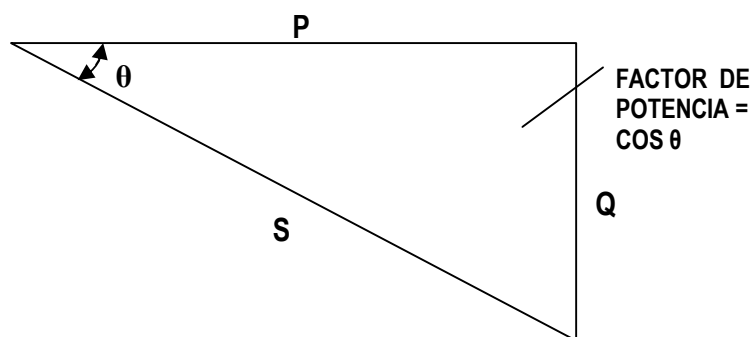


Figura 6-1. Relaciones entre los parámetros eléctricos

6.3 Unidades de medida

No es inusual encontrar que en la actualidad existe todavía una mala comprensión básica de la diferencia entre unidades de Potencia (una tasa de consumo), y unidades de Energía (la magnitud total consumida). Los datos de ingeniería presentados en la Tabla 6-1 son un intento de clarificar este punto.

Observe que las unidades de potencia, multiplicadas por un periodo específico de tiempo tal como minutos u horas, producen unidades de energía o trabajo. En otras palabras una unidad de potencia actuando durante un periodo específico de tiempo produce una cantidad específica de energía o trabajo útil.

Tabla 6-1. Datos de Ingeniería

Unidades de Potencia (Tasa)	Uso Típico	Unidades de energía o trabajo (cantidad)
Kw	Electricidad	kWh
SCFM	Aire	SCF
GPM	Agua	gal
Ton	Refrigeración	ton-h
lb/h	Vapor	lb
Hp	Trabajo	hp-h

6.4 Factores de costo típico

Un factor de costo típico o regla de cocina es útil de tener a la mano para estimar los costos de operación de una pieza específica de equipo durante un año, y para comparar los costos de suministrar energía calorífica de una variedad de fuentes. Las formulas para desarrollar varios factores de costos son presentadas desde a) hasta d) en el listado siguiente, junto con ejemplos. Notar que el termino MMBtu significa un millón de Unidades Térmicas Británicas. El termino M significa mil en el lenguaje del mundo financiero, así MM significa un millón.

a)
$$\frac{\$/\text{MMBtu de combustible}}{\text{\$/por galon de combustible}} = \text{MMBtu por galon}$$

Ejemplo:
$$\frac{\$1.00 \text{ por galon de combustible}}{0.148 \text{ MMBtu por galon}} = \$6.76 / \text{MMBtu}$$

b)
$$\frac{\$}{\text{kWh}} \times \frac{\text{kWh}}{\text{MMBtu}}$$

Ejemplo:
$$\frac{\$0.06}{\text{kWh}} \times \frac{\text{kWh}}{0.003413 \text{ MMBtu}} = \$17.58 / \text{MMBtu}$$

c)
$$\frac{\$/1 \text{ kW-año}}{\frac{h}{\text{año}} \times \frac{\$}{\text{kWh}}}$$

Ejemplo:
$$\frac{8760h}{\text{año}} \times \frac{\$0.06}{\text{kWh}} = \$526 / \text{kW-año}$$

d)
$$\frac{\$/1 \text{ hp- año}}{\frac{\text{kW}}{\text{hp}} \times \frac{h}{\text{año}} \times \frac{1}{\text{EFF}} \times \frac{\$}{\text{kWh}}}$$

Ejemplo:
$$\frac{0.746 \text{ kW}}{\text{hp}} \times \frac{8760h}{\text{año}} \times \frac{1}{0.89} \times \frac{\$0.06}{\text{kWh}} = \$441 / \text{hp-año}$$

Comparando el costo entre calentar con combustible a \$1 por galón y calentar con electricidad a \$0.06 por kilowattthora, la electricidad es casi tres veces más cara. Notar, sin embargo, que la eficiencia cuando se quema el combustible será un poco menor al 100% y debe ser tomado en consideración. Ver ecuaciones a) y b).

El termino \$/kW-año es utilizado cuando se determina el costo de operar una carga de 1 kW durante un periodo de un año (en este caso, 8760 horas).

El término \$/1 hp-año es útil para determinar el costo de operación de un motor de 1 hp durante un periodo de un año (en este caso 8760 horas). Notar que la eficiencia del motor debe ser estimada y usada en la formula. El valor de 0.89 es típico para motores de eficiencia normal de tamaño mayor o igual a 50 hp, trabajando a un promedio de carga igual o mayor al 75% durante periodo de tiempo especificado.

Una buena regla de cocina para la instalación de un contador de energía permanente está basada en el costo de la electricidad, el tamaño y eficiencia de la carga, las horas de

operación, y el costo del medidor. Por ejemplo, a \$0.06/kWh y 8700 horas de operación por año con una eficiencia del 89%, un motor de 200 hp consumirá $200 \times \$441$ o un valor de \$88,200 de electricidad por año.

La experiencia ha demostrado que una caída del 1% en consumo de energía puede esperarse tan solo del hecho que la carga está siendo medida. En otras palabras, alguien realmente se preocupa de cuanta energía esta siendo utilizada. Una reducción del 1% ahorrará \$882 por año en el ejemplo del párrafo anterior. Asumiendo que el costo del medidor instalado es \$1,000, el tiempo de retorno simple es menos que 14 meses, por debajo de la guía de dos años o menos seguida típicamente por la industria en la actualidad.

6.5 Seis Razones para medir

6.5.1 Cargar la energía a los departamentos individuales

Esta es la razón más básica para medir. Cada mes la factura total de energía es proporcionada a los diferentes departamentos. Este dato es usado para comparar costos contra el presupuesto de cada departamento y de esta manera desarrollar un valor de varianza del dólar. También se incluye el uso de medidores para facturación cuando la energía se le vende a una tercera parte tal como en arreglos de cogeneración.

6.5.2 Contabilidad de la energía usada

Las tendencias del consumo de la energía por unidad de producción son la base para el análisis inicial y las acciones correctivas resultantes.

6.5.3 Eficiencia de equipo y sistemas

La experiencia que la industria ha ganado de los procesos de prueba formales brinda los siguientes valores de referencia:

- a) Compresores de aire centrífugo a 125 psig:
3.2 a 4.0 kWh/1,000 pies cúbicos estándar (sf³)
- b) Accionamiento de enfriamiento centrífugo produciendo agua a 45 °F:
0.6 a 1.0 kW/ tonelada de refrigeración
0.6 a 1 kWh /ton-h de refrigeración
- c) Refrigeración entregada a espacio acondicionado:
1.0 a 2.0 kW por tonelada de refrigeración
1.0 a 2.0 kWh/ton-h de refrigeración
- d) Calderas de vapor a 250 psig:
Fuel oil numero 6 = 7.1 a 9.0 galones por 1,000 libras de vapor

6.5.4 Brindar información para auditorias de proyectos de energía

A medida que los fondos se vuelven más difíciles de obtener, las auditorias de proyectos de reducción de costos por administración de la energía han sido usadas más frecuentemente en los últimos años.

6.5.5 Trabajo de mantenimiento: Identificar la ubicación de problemas de desempeño y brindar realimentación a los gerentes.

La recopilación de datos de consumo de energía para apoyar el trabajo de mantenimiento es vista como una herramienta viable, de gran ayuda en la identificación de problemas de desempeño de equipo. Como un beneficio colateral, los problemas de desempeño asociados con el personal operando el equipo también son identificados.

6.5.6 Identificando el potencial de ahorros de energía adicionales futuros

Con la meta de largo plazo de la administración de la mejora continua, los sistemas de medición y detección de tendencias brindan datos sobre los cuales basar las decisiones de adjudicación de recursos.

6.6 La importancia de las auditorias

Las auditorias basadas en un sistema de medición bien diseñado frecuentemente producirán resultados sorprendentes y a menudo pueden identificar ahorros considerables. Los resultados obtenidos con la auditoria normalmente estarán en proporción directa al esfuerzo realizado. Por ejemplo, en el control de demanda, muchos proveedores de equipos insisten sobre la importancia de un estudio de cargas de la planta para identificar aquellas que son candidatas adecuadas para corte programado de cargas. En algunos casos, los vendedores pueden reconocer la necesidad de un estudio semejante pero subestiman el tiempo y las horas hombre requeridas para hacer un trabajo robusto.

Es aparente que un método de estudio normalizado, formal necesita ser usado si se desea obtener información verdaderamente útil. El formulario para estudio mostrado en la tabla 6-2 es típico y es usado para tabular todas las cargas iguales o mayores a 5 hp (o 5 kVA). Una hoja debería ser usada para cada punto de conmutación de bus común o centro de control de motor (MCC por sus iniciales en inglés).

Este formato de estudio involucra usar diagramas eléctricos actualizados cuando estén disponibles, apoyados por verificaciones de campos para verificar condiciones exactas siempre que surjan dudas. Aproximadamente se requiere en promedio una hora hombre para completar cada hoja. Con algún tiempo de seguimiento para resolver preguntas ocasionales que surgen cuando se revisan los resultados de los estudios. Los datos reales de kilovoltamperios y kilowatt en uso se obtienen utilizando una variedad de medidores eléctricos descritos más adelante en este capítulo.

Los resultados típicos de estudios se pueden presentar en muchas formas. Dos ejemplos son mostrados en la Tabla 6-3 y en la Figura 6-2. La Tabla 6-3 describe el uso del sistema

eléctrico por función para una planta industrial típica y señala los usuarios mas importantes. En este ejemplo, aproximadamente el 34% de la carga total es asociada con la producción y distribución de agua enfriada para acondicionamiento de aire.

Un segundo método se ilustra en la Figura 6-2 usando diagramas de bloque para detallar la eficiencia del sistema eléctrico de la planta. Los datos para este diagrama se recogen usando medidores eléctricos portátiles, en combinación con el formulario de datos mostrado en la Tabla 6-2.

Notar en la Figura 6-2 que la eficiencia global de la planta es solo aproximadamente el 81%, lo cual significa que el 19% de toda la energía eléctrica se desperdicia como calor. Este calor desperdiciado puede requerir acondicionamiento de aire adicional para extraer el calor de las áreas de producción. De este diagrama típico, resulta evidente que los esfuerzos deberían ser dirigidos rápidamente a mejorar la eficiencia de 53.3% de los sistemas variadores de velocidad, los cuales usan el 7% de toda la energía eléctrica de la planta.

Con respecto a las auditorias de los sistemas de potencia eléctrica, los resultados de las mediciones pueden ser usados para compilar un perfil de energía que puede:

- a) Ayudar en el establecimiento y refinamiento del uso de energía por línea de producto, departamento o área
- b) Establecer y mejorar la contabilidad del uso de energía
- c) Permitir mediciones de reducciones de costos
- d) Ayudar a determinar capacidades de equipos y factores de carga para modificaciones futuras y expansión de la planta
- e) Proporcionar datos que varían respecto a estándares establecidos

Además un perfil de energía probablemente revelará áreas en donde los proyectos de conservación son más beneficiosos.

Tabla 6-2. Formulario Típico para Registrar Carga Eléctrica

Descripción y número de equipo	Responsable	kVA Conectados	kVA en operación	kW en operación	Cubículo	Costo de operación por día	Tiempo estimado de encendido/ apagado (min)
Ventilador K-7801.05		100			1D		10/
Ventilador K-7801.06a		25			2C		/50
Ventilador K-7801.06b		25			2D		
Elevador		75			2E		0/
Unidad de manejo de aire para S-3		7.5			3D		55/ 5
Panel de servicio K-15		30			31L		0/
Panel de iluminación K-78		30			31R		0/
Substation <u>KL-8</u>			MCC <u>K6-8-1</u>			Fecha (DD/MM/AA)_____	

NOTA: El estudio de las cargas eléctricas es esencial para entender donde se usa la energía. Este formato típico es para registrar datos de cargas eléctricas. Formularios similares pueden ser utilizados para cada centro de control de motores en la planta, y para todas las cargas mayores a 5 hp o 5 kVA.

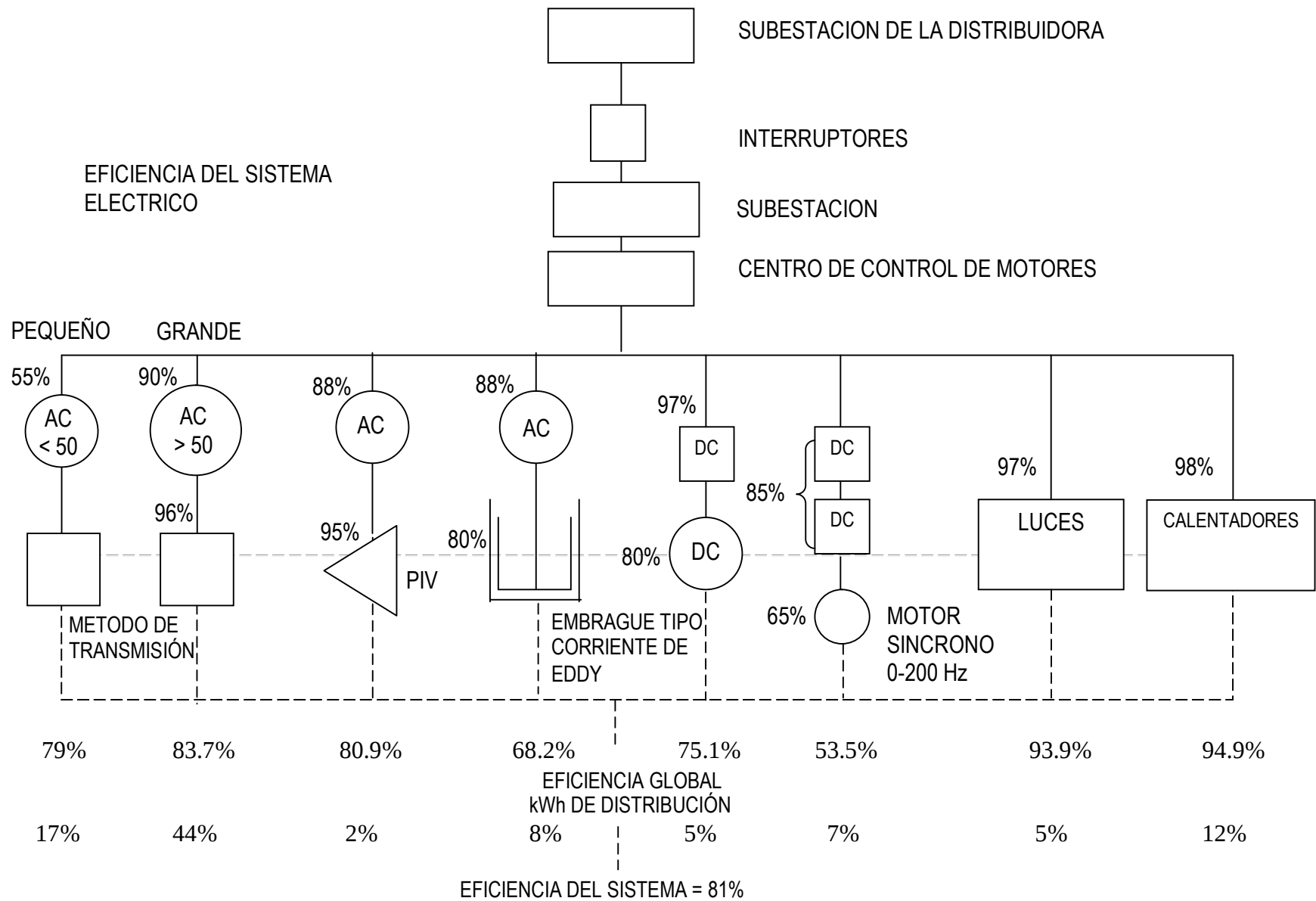


Figura 6-2. Retratando la Eficiencia de la planta

Tabla 6-3. Uso típico de un sistema eléctrico por función para una planta textil industrial típica

	% ^a de carga total		% de carga total
Ventiladores de HVAC ^b	13	Secado	3
Enfriadores	12	Absorción	3
Aire comprimido	11	Polimerización	2
Texturización	8	Giro de filamentos	1
Extrusores y medición	6	Secado de toallas	1
Aire	6	Rotación de filamentos	1
Bombas de agua de enfriamiento	5	Tratamiento de desechos	1
Otros	5	Gas inerte nitrógeno	1
Iluminación	5	Ventiladores de torres de enfriamiento	1
Filamentos	4	Haz	1
Bombas de agua fría	3	Misceláneos	7
		Total	100.0

^a Los valores porcentuales son redondeados al número entero más cercano

^b Calentamiento

6.7 Medidores de las Compañías Distribuidoras

Antes de tomar pasos para reducir la factura eléctrica de la planta; es importante familiarizarse con los instrumentos que las compañías distribuidoras usan para medir el consumo de potencia eléctrica. La unidad básica es el contador de energía eléctrica, o vatímetro (watthour meter), y los medidores industriales de estilo electromecánico son muy similares a aquellos usados en servicios residenciales. Los medidores industriales son mas complejos debido a la fuente de potencia polifásica y al uso de transformadores de medida para obtener voltajes y corrientes para el medidor.

Los contadores de energía miden energía eléctrica por medio de la interacción de flujos magnéticos generados por las bobinas de voltaje y corriente que actúan para producir corrientes de eddy (parásitas) en el disco de aluminio rotatorio. El flujo de corrientes de eddy genera líneas magnéticas de fuerza que interactúan con el flujo en el entre-hierro para producir torque sobre el disco. El medidor es de esta manera un motor de inducción calibrado cuidadosamente, la velocidad del cual depende de la energía siendo medida. Cada revolución del disco del medidor representa un valor fijo de watthoras. El registro cuenta esas revoluciones por medio de un tren de engranajes y muestra este conteo como watthora.

La Figura 6-3 es un diagrama simplificado mostrando como el valor de demanda en kilowatt se obtiene desde el contador de energía de la distribuidora. Cada vez que el disco del medidor completa una revolución bajo la influencia de las bobinas de voltaje y de corriente, la foto celda energiza el relevador y transfiere los contactos A y B, produciendo pulsos de salida de kilowathora. Al final de intervalo de demanda usualmente 15, 30 o 60

minutos, un pulso de reloj es aplicado durante un tiempo de 2 a 6 segundos, significando que un nuevo intervalo ha comenzado.

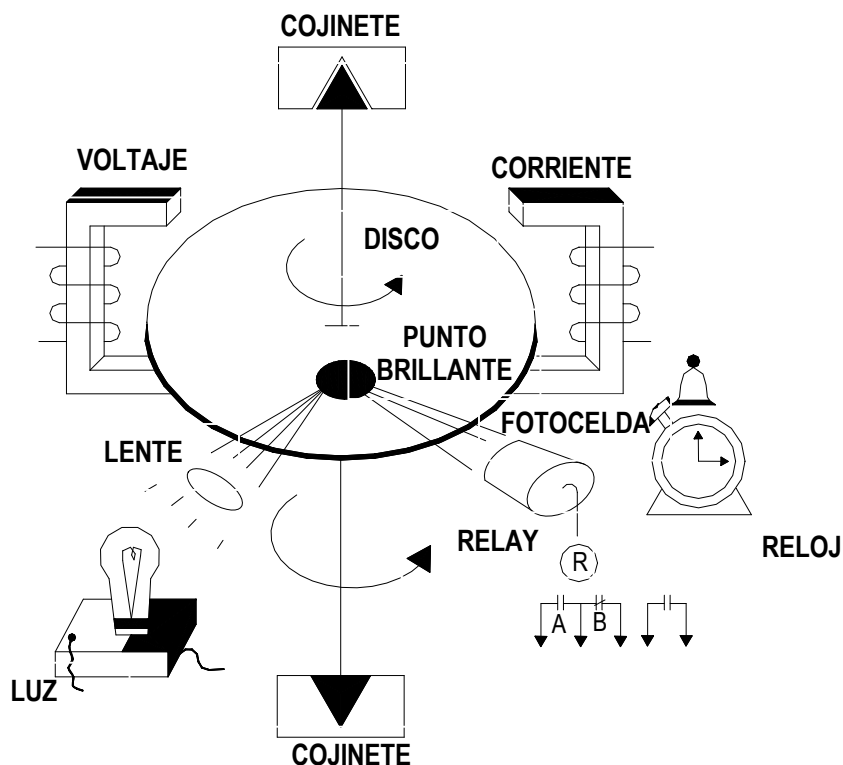


Figura 6-3. Medidor de energía (contador) simplificado

Los contactos A, B y Reloj son usados por el equipo de medición o control de demanda para desarrollar la curva mostrada en la parte inferior de la Figura 6-4. Los pulsos del contador son simplemente sumados a lo largo del intervalo de demanda. Una línea conectando la parte superior de las columnas de pulsos, describe la acumulación de pulsos del contador durante el intervalo. Los kilowatthora por pulso reales y el número de pulsos total registrado durante el intervalo dependerán de la carga de la planta y de las relaciones del Transformador de Potencial (PT) y el Transformador de Corriente (CT) para el contador de energía específica.

Es importante notar en este punto que la pendiente de la línea en la Figura 6-4, matemáticamente hablando, es definida como incremento sobre recorrido, lo cual es kilowatthora dividido entre tiempo (media hora en este caso), lo cual es igual a la demanda en kilowatt. Lo que es lo mismo, a los kilowatthora totales de energía consumida, dividida entre el tiempo en el cual fue consumida, produce demanda en kilowatt promedio (kWd) para potencia entre intervalo de tiempo. Esto significa que detectando la pendiente de la línea al inicio del intervalo, una acción correctiva puede ser tomada para reducir la pendiente por medio de la desconexión de cargas, disminuyendo el kWd promedio a un valor más aceptable.

Se concluye que una línea plana de pendiente cero indicaría que ya no se consume energía, una demanda cero para potencia. Llevado al extremo, una línea con pendiente negativa indicaría un consumo de energía negativo con una inversión de flujo de potencia; por ejemplo, generación en planta de potencia hacia el sistema de transmisión de la compañía distribuidora. Esto es poco probable que ocurra puesto que la mayoría de medidores de la distribuidora tienen mecanismos para impedir registro inverso. Para registrar kilowatthora siendo exportados a la compañía distribuidora se deben añadir medidores separados.

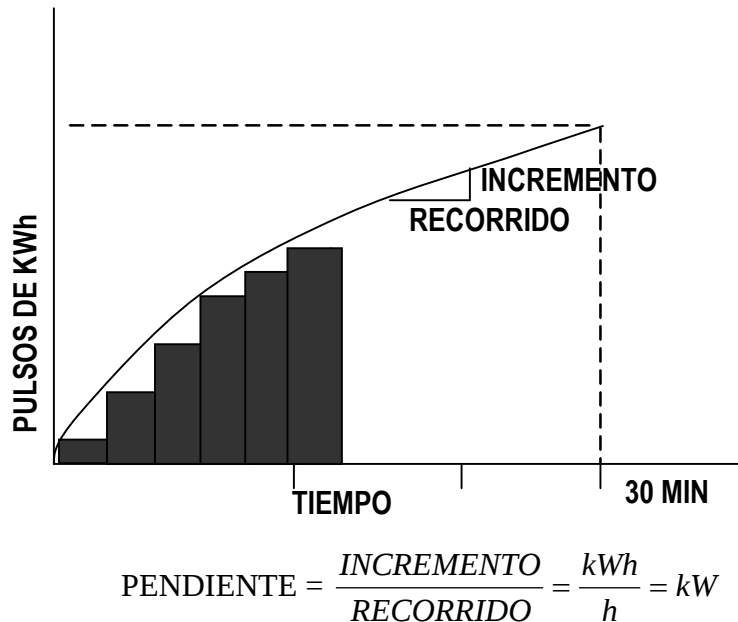


Figura 6-4. Curva de Demanda

6.8 Conceptos de Demanda

La longitud exacta del intervalo de demanda varía según la distribuidora, siendo uno de los más comunes 30 minutos. Esta longitud de intervalo es frecuentemente asociada con el tiempo en que los generadores, transformadores, y líneas de transmisión de las compañías de potencia, acumulan suficiente calor debido a condiciones de sobrecarga para hacer daño permanente al equipo.

Sin embargo, a medida que los picos kWd se incrementan, y algunos consumidores intentan técnicas para evitar los picos, los intervalos de demanda están siendo reducidos hasta 15 minutos, o hasta 5 minutos. En unas pocas tarifas se usa un intervalo móvil, en donde no existe un comienzo y final identificado para el intervalo. El pico kWd es por lo tanto el kWd promedio mas alto para cualquier intervalo de 30 minutos sucesivo durante el periodo de facturación de la compañía de potencia. Existen algunas situaciones extremas en donde la distribuidora se rehusará a suministrar al consumidor la información de los pulsos de kilowatthora. En ese caso, PT's y CT's y un contador de energía eléctrica apropiado u otros transductor deben ser instalados con el propósito de obtener la información de la demanda en kilowatt. Si el medidor de la compañía distribuidora está accesible, un transductor óptico puede ser colocado sobre la carátula del medidor y el transductor puede leer al contador de

la compañía distribuidora. La salida del transductor puede entonces ser enviada al sistema de administración de energía.

Las distribuidoras desearían suministrar potencia sobre una base continua sin variaciones extremas, sin picos ni valles que requerirán grandes desplazamientos en la cantidad de equipo de generación siendo conectados. Por esta razón, las facturas de las compañías distribuidoras reflejan el efecto de tales variaciones en la demanda utilizando un concepto de factor de carga. El factor de carga se define como la relación de la demanda promedio entre la demanda pico y es ilustrado por el camioncito viajando a través del camino montañoso en la Figura 6-5. Con picos grandes y valles profundos, el camión, representando a la compañía distribuidora, tiene que usar mucho combustible para alcanzar la cúspide de los picos montañosos y tiene que frenar mucho para desacelerar en los valles profundos. Este arreglo produce un factor de carga relativamente bajo de 0.5.

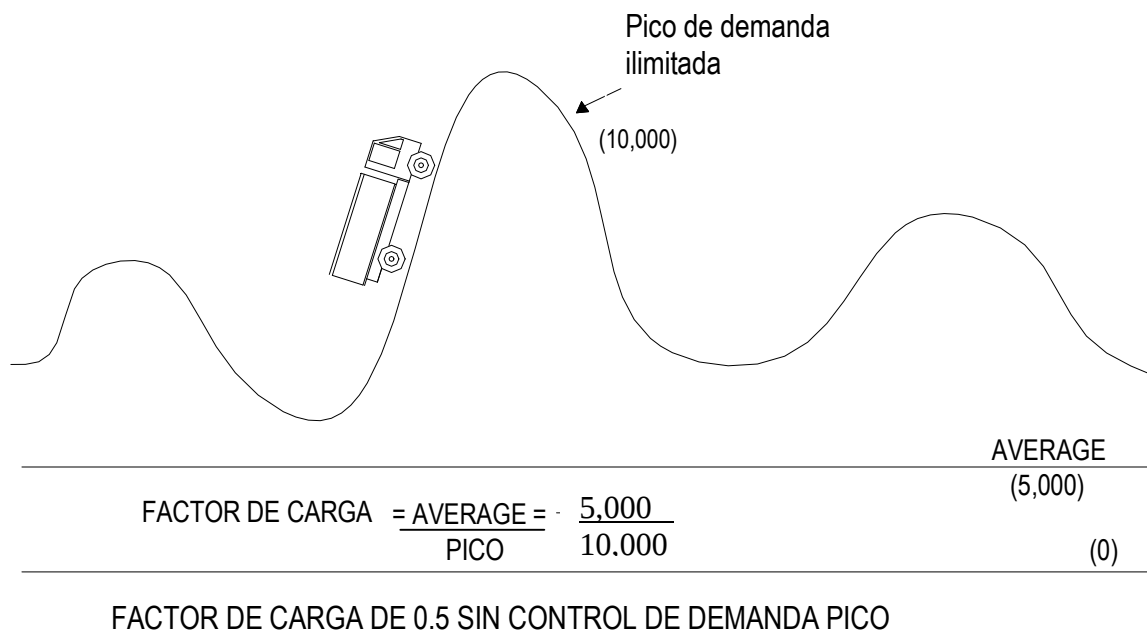


Figura 6-5. Factor de Carga sin control de demanda de picos

El factor de carga puede ser mejorado limitando los valores de los picos y rellenando los valles tal como se muestra en la Figura 6-6. Ahora un carro pequeño, representando una carga en kilowatt más pequeña sobre la compañía distribuidora, puede ser usado para viajar sobre picos montañosos más pequeños con menos frenado requerido en valles menos profundos. El factor de carga mejorado es ahora 0.63. El factor de carga ideal es 1.0 significando que la demanda es absolutamente constante sin picos ni valles. Naturalmente que esto no es posible en la realidad. Lo mejor que se puede esperar será aproximadamente 0.98 para un periodo mensual, y 0.85 para un valor anual.

La carátula de un contador electromecánico convencional se muestra en la Figura 6-6. El diagrama ilustra un PT y un CT conectado a una de las tres fases de entrada del medidor. El CTR en la carátula del medidor significa “CT ratio” (Relación del transformador de corriente) y el 800/ 5 indica que cuando fluyen 800 amperios a través del conductor de fase, fluyen 5 amperios a través del secundario del CT en el medidor. El PTR en la carátula del medidor significa “PT ratio” (relación del transformador de potencial) y el 600/1 indica que con 120 voltios sirviendo las bobinas de potencial del medidor, el primario está conectado a una alimentación de 7,200 voltios ($120 \text{ V} \times 60 = 7,200 \text{ V}$).

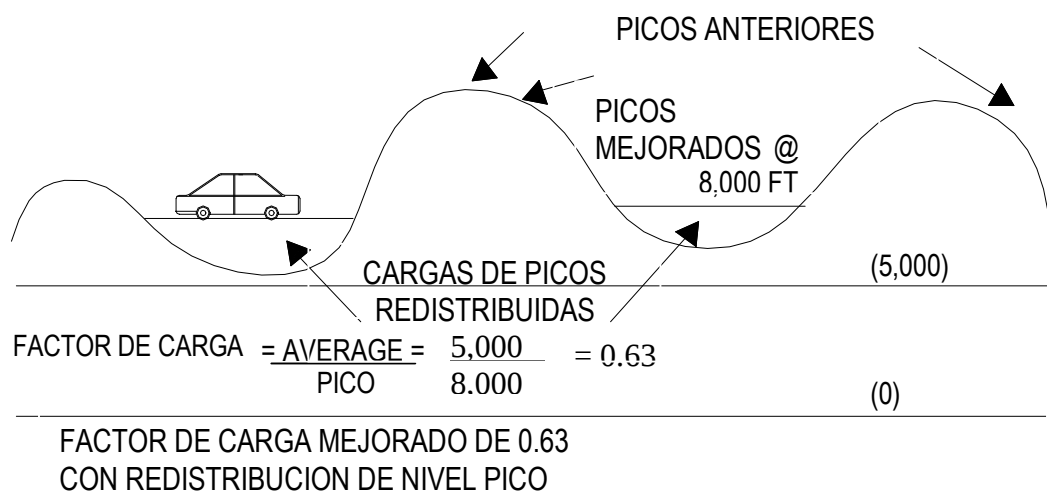


Figura 6-6. Factor de Carga con redistribución de carga pico

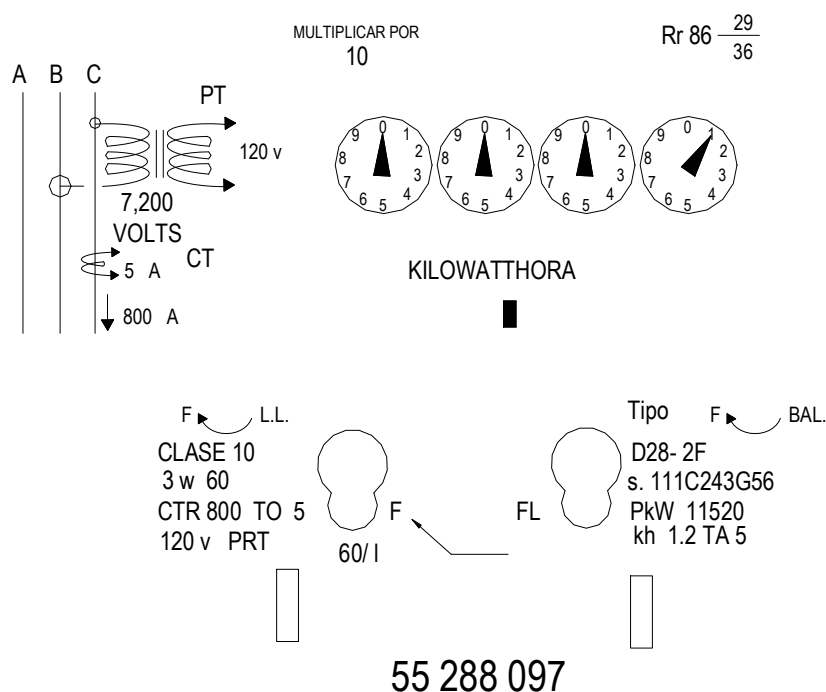


Figura 6-7. Contador de energía de tipo electromecánico

La lectura de las agujas de los contadores para obtener el valor de kilowatt-hora es algunas veces una gran fuente de confusión, debido a que las agujas giran en direcciones opuestas. La aguja más a la derecha gira una revolución completa, lo cual avanza la aguja adyacente a la izquierda en un número. En este ejemplo, la aguja más a la derecha se lee como 5 (y permanece como 5 hasta que la aguja toca la marca del 6). La segunda aguja de la derecha se lee como un 8, y se convertirá en un 9 cuando la aguja más a la derecha alcance el cero. La tercera aguja desde la derecha se lee como un 9 (no un cero como usted podría esperar), y no se convertirá en un cero hasta que la manecilla del segundo dial desde la derecha suba hasta cero.

Usando el mismo razonamiento, el segundo dial desde la izquierda se lee como un 5 y el dial más a la izquierda se lee como un 1. Resulta aparente que el medidor debe ser leído de derecha a izquierda para determinar los valores correctos de la posición de las agujas de cada dial. Las lecturas del medidor en este caso deberían ser registradas como 15,985. Este valor sería usado como una lectura actual, de la cual una lectura previa sería restada. Esa diferencia es luego multiplicada por 10,000 para obtener los kilowatt-hora a través de los alimentadores primarios durante el intervalo de tiempo especificado, tal como un mes.

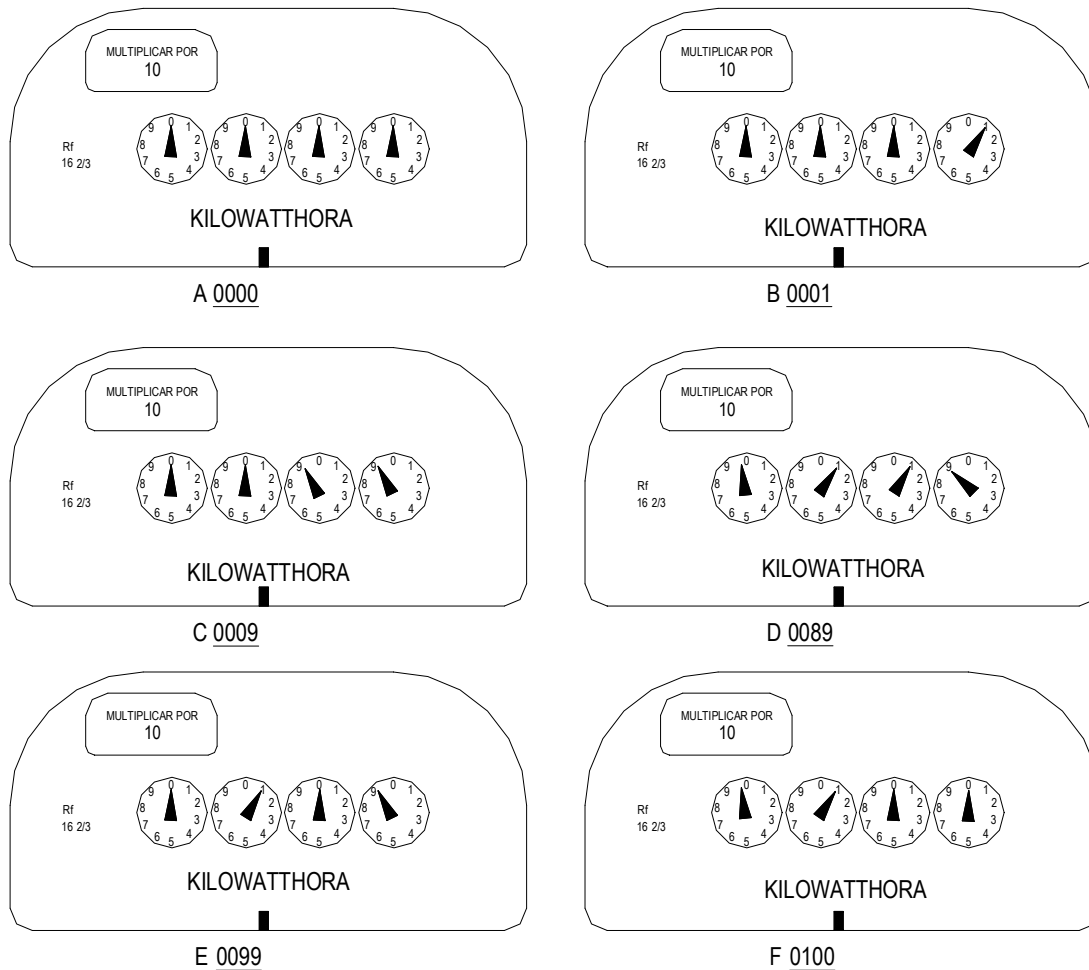


Figura 6-8. Lecturas de Contador

6.9 Medidores de demanda

6.9.1 Introducción

El gas y el agua se venden por metros cúbicos y la electricidad por kilowatt-hora. El costo de producir y entregar esos bienes no es estrictamente proporcional al volumen en un caso o la cantidad de electricidad en el otro. Debido a que la electricidad no puede ser almacenada, el costo de servir a un cliente que usa, por ejemplo un motor de 100 hp, durante una hora al día es mayor que el costo de servir a un cliente que usa un motor de 10 hp diez horas al día. Aunque ambos usan el mismo número de kilowatt-hora. El motor de cien caballos de potencia, requiere un generador mayor, cables de mayor tamaño, y transformadores, interruptores, fusibles y protecciones mayores a lo largo de la línea. Todo esto requiere un gasto que debe ser recuperado, ya sea como una tarifa más alta para todos los consumidores, o como un cargo apropiado por servicio más una tarifa menor por los kilowatt-hora.

Con el propósito de cobrar este gasto de reserva, se ha adoptado el término demanda. El medidor de demanda es instalado al lado del contador convencional, ya sea como un dispositivo separado, o como una anexión al contador. El consumidor paga entonces un monto determinado por la demanda máxima para el mes previo, más los kilowatt-hora.

El cargo por demanda está basado en la carga mayor para un período de tiempo corto, digamos 15 o 30 minutos, que ocurrió durante el mes.

6.9.2 medición de demanda en general

La demanda es medida en kilowatts, etc. No en kilowatt-hora, etc. Es mostrada por un dispositivo indicador, y no por un dispositivo integrador.

La demanda es usualmente medida en kilowatts, pero en donde el factor de potencia es importante, se miden también las demandas de kilovoltampere reactivos y a veces los kilovoltampere. Es muy raro que a un consumidor se le facture demanda instantánea, a menos que los picos cortos elevados, sean de tal magnitud como para interferir con la estabilidad del sistema.

6.9.3 El medidor de demanda como un patrón

La demanda no es una magnitud distintiva. Sin embargo, esta puede ser expresada en unidades fundamentales para propósitos de facturación. Parece casi innecesario medir kilowatt-hora y demanda con exactitud, cuando la mejor tarifa posible puede reflejar las condiciones de costos solo aproximadamente. Sin embargo, los medidores exactos han llegado a ser esperados con el propósito de establecer la confianza del consumidor en la distribuidora. Comprar y vender basados en medición y precio, es necesario para tener un patrón de medida acordado por ambas partes en una transacción. Para ser considerado como un patrón, un instrumento debe estar construido de tal forma que se facilite la calibración, en términos de magnitudes patrón.

Los intervalos de tiempo sobre los cuales la potencia es promediada pueden estar determinados de la siguiente manera. De la una en punto a la 1:15 es un intervalo, 1:15 a 1:30 es otro intervalo, 1:30 a 1:45 es aún otro intervalo, y así sucesivamente. El día completo y el mes están divididos en bloques de 15 minutos. El bloque que muestra el valor de demanda más elevado o máximo, es aquel usado generalmente para propósitos de facturación.

Hay varias formas en que puede ser determinada la potencia promedio. Es poco probable que la potencia sea absolutamente estable durante cualquier período de 15 minutos. Más aún, es alta un minuto y baja al minuto siguiente. El tipo de medidor generalmente usado es el llamado medidor de demanda por integración, el cual da la demanda directamente en kilowatts. Si los kilowatt-hora consumidos en un período de 15 minutos son conocidos, es comparativamente simple determinar la potencia promedio, por ejemplo si de 1:00 a 1:15 los kilowatt-hora consumidos fueron 62, la potencia sería simplemente 62 dividido entre $\frac{1}{4}$, o 248 kW.

Si de 1:15 a 1:30 los kWh consumidos fueran 84, los kW serían 336. Pero sería muy tedioso leer todos los contadores de energía exactamente cada 15 minutos, de manera que el medidor de demanda lo hace automáticamente.

Los medidores de demanda de indicación generalmente consisten de un contador de energía estándar, en los cuales el registro de integración es reemplazado por una combinación de registro de watt-hora y demanda.

Aquí el término indicación significa que usan agujas y escalas como instrumentos de indicación para distinguirlos de medidores de registro, y también porque la demanda es expresada por definición como watts promedio o potencia sobre un período de tiempo y no como watt-hora o energía.

Todos los modelos principales de contadores de energía, tanto monofásicos como trifásicos, pueden ser equipados con registros de demanda que son compatibles físicamente con el montaje usual del dial de integración ordinario.

Estos registros de demanda usualmente retienen el mecanismo de registro de integración y el dial, y además, hay un tren de engranajes separado también accionado por el elemento del medidor, el cual empuja la aguja de demanda directamente hacia un dial graduado, marcado en kilowatts. Los registros para corrientes alternas también contienen un motor miniatura de tipo síncrono, operado desde la misma alimentación cuya función es medir los intervalos de tiempo requeridos sobre los cuales se promedia la demanda.

6.10 Medidores de estado sólido multi-tarea

Durante muchas décadas, el único tipo de medidor usado para medir consumo fue un dispositivo electromecánico. Esos dispositivos desempeñan sus tareas de manera satisfactoria, operan confiablemente, y han permanecido virtualmente sin cambios durante muchos años. Aún en la actualidad los medidores electromecánicos son los dispositivos de medición dominantes en los sistemas de potencia, y las compañías distribuidora continúan usándolos y comprándolos. Sin embargo, existe un nicho creciente de aplicaciones en donde un dispositivo más avanzado presenta muchas ventajas. Esto ha fomentado el desarrollo de medidores de estado sólido basados en microcontroladores.

6.11 Ubicación del medidor contra requerimientos de medida

Un diagrama unificar de la distribución eléctrica para una planta típica es mostrado en la Figura 6-9. La fuente de suministro de potencia que viene de la distribuidora es mostrada a la izquierda, alimentando el transformador de la subestación primaria T1. Si la subestación primaria es propiedad de la distribuidora, entonces la alimentación primaria puede ser uno de varios niveles de alto voltaje, tales como 35 kV, 69 kV, etc. El secundario de T1 es comúnmente uno de entre varios niveles de medio voltaje tales como 6.9 kV, 12.47 kV, etc. Los motores individuales de gran tamaño (arriba de 200 hp) pueden ser alimentados por una subestación tal como T2, en uno de varios niveles de medio voltaje tales como 2.16 kV o 4.16 kV.

Adentrándose más en el sistema, las restantes cargas de motores son alimentadas típicamente por una subestación secundaria (o más) tal como T3. El voltaje secundario más común es 480. Los circuitos de iluminación son usualmente alimentados desde un panel de iluminación alimentado por un transformador seco pequeño (10-45 kVA) T4, con un voltaje primario nominal de 480 V y un secundario 208/120 V, con una conexión de transformador estrella aterrizada. Ocasionalmente los circuitos de luces funcionarán a 277 V fase a neutro, alimentado a través de un interruptor de circuito trifásico de 480 V en el lado secundario de T3.

Puntos de medición permanente de voltaje, corriente, kilowatts, y kilowatt-hora pueden ser instalados en las ubicaciones A hasta D. En los puntos A, B, y C siempre se usan transformadores de medida, y también es posible usarlos en D y E. Los Analizadores de energía portátiles deben ser conectados a los secundarios de los transformadores de medida en A, B, y C, y pueden ser conectados directamente en D y E. las pinzas de corriente que vienen como parte de los accesorios de los analizadores, tienen un valor máximo de aislamiento de 600 V pueden ser conectadas directamente en los puntos D y E.

Tome en cuenta que cuando se usan transformadores de medida en los puntos A, B, y C, las relaciones de transformación correspondientes deben ser usadas en los multiplicadores que se programan en los analizadores.

La lista siguiente de puntos para verificar debe ser usada para poder realizar un estudio de energía efectivo y seguro:

- a) Haga planes detallados antes de realizar el estudio
- b) Use formularios preparados de manera que los registros pueden comparados año con año

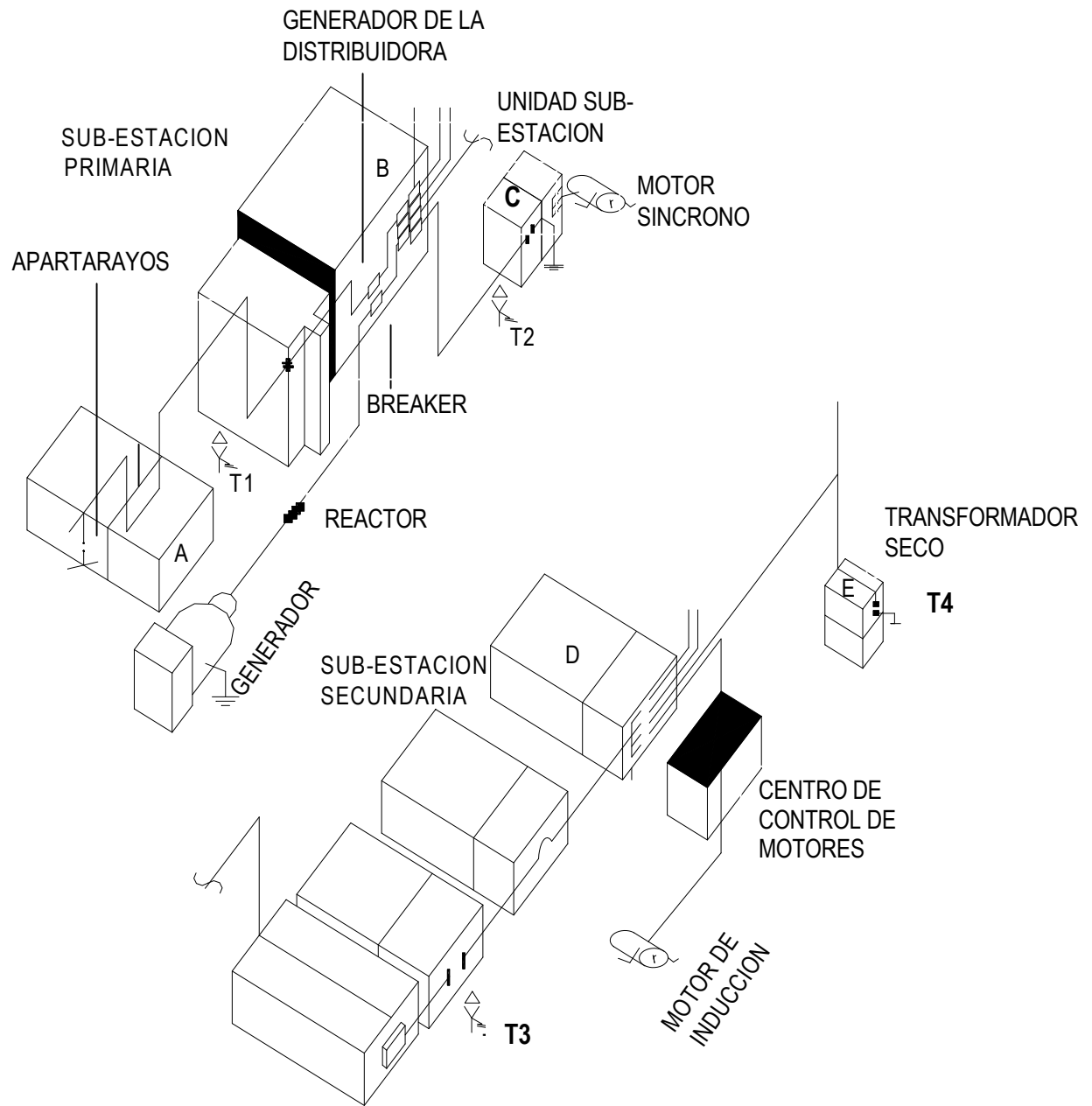


Figura 6-9. Sistema de Distribución de Potencia Eléctrica

- c) para cargas constantes en donde la eficiencia puede ser determinada en corto tiempo, considere usar medidores indicativos tipo analógico.
- d) Donde las cargas fluctúan usar medidores con capacidad de toma de datos automática (*logging*), o dispositivos de registro en papel.
- e) verificar equipo nuevo cuando sea instalado para verificar su desempeño, y para proporcionar datos para referencia en futuros estudios
- f) Asegúrese de realizar el estudio cuando el equipo está en uso a su carga de producción normal.
- g) Asegúrese de que el equipo ha alcanzado condiciones de operación normales
- h) Prepare la logística del equipo de prueba (puntas de prueba, fusibles, etc.)
- i) Asegúrese de que el personal realizando las pruebas son calificados para trabajar con equipo energizado, y de cuentan con equipo de seguridad necesario.
- j) Consultar procedimientos de seguridad tales como NFPA 70E-1995 o *IEEE Yellow Book*.

6. 12 Técnicas de medición y ejemplos prácticos

No es inusual determinar que los motores pueden representar del 40-60% de la carga eléctrica total en un edificio, y más del 70-90% de la carga eléctrica en una planta industrial. Debido a que los motores representan tan grande porcentaje del uso de electricidad, es de suma utilidad revisar la operación de motores de inducción tipo jaula de ardilla y delinear un método simple para determinar los caballos de fuerza a la salida del motor mientras este se encuentra en funcionamiento.

El motor de inducción está constituido de dos partes, (ver figura 6-10). En el exterior se encuentra una bobina de alambre devanada sobre un núcleo de acero laminado conocido como el estator. La velocidad síncrona de un motor de inducción es la velocidad a la cual el flujo del estator rota sobre el estator cuando se conecta a alimentación de potencia trifásica. Esta [velocidad] es determinada por la frecuencia en Hertz de la corriente en el estator y el número de polos a los cuales el motor está conectado. (Ver tabla 6-4). A 60 Hz se obtienen las velocidades síncronas siguientes:

Velocidad síncrona = $120 \times \text{frecuencia} / \text{número de polos}$ expresada en rpm

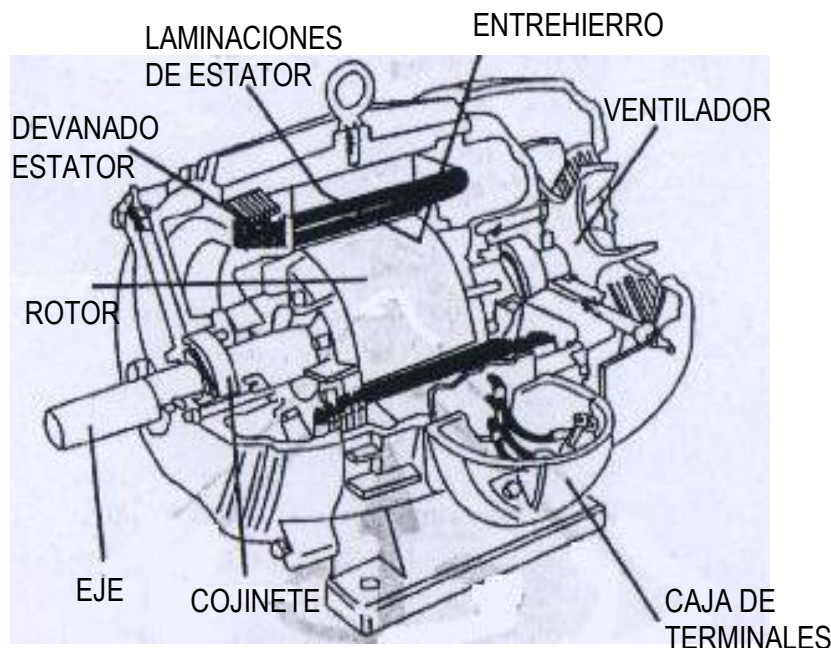


Figura 6-10. Motor de inducción trifásico ac

Tabla 6-4- Velocidades de motor típicas

Número de polos	Velocidades síncronas
2	3600
4	1800
6	1200
8	900
10	720
12	600

El campo magnético producido en el devanado del estator está pulsando continuamente en extremos del entrehierro y hacia la segunda parte más fundamental del motor, el rotor. El rotor está constituido de acero laminado y usualmente barras de aluminio con anillos terminales. Al atravesar el campo magnético las barras del rotor, este induce un voltaje entre ellas en la misma forma que se induce un voltaje en los devanados secundarios de un transformador

Ya que las barras del rotor son parte de un circuito cerrado a través de los anillos terminales, una corriente intensa se induce en estas [barras]. La corriente en el rotor en consecuencia produce su propio campo magnético interactuando con el campo magnético rotativo del estator, provocando un empuje sobre el rotor. El rotor nunca se acopla con el campo magnético del estator, y de hecho, de hacerlo, se detendría la acción de transformador a través del entrehierro, y ya no se transferiría energía al eje del motor.

6.12.1 Deslizamiento

El fenómeno de deslizamiento es muy importante para el funcionamiento de motores de inducción. En condición de sin carga, el rotor casi se las arregla para mantenerse a la velocidad síncrona del campo magnético rotativo del estator. La única energía transferida a través del entrehierro es la requerida para vencer la fricción en los cojinetes y la resistencia del aire. Al aumentar la carga, la velocidad del rotor tiende a caer cada vez más y más detrás del campo magnético, provocando que se corten más líneas de flujo y que más energía se transfiera a través del entrehierro y al eje del rotor. La velocidad real del rotor es siempre a la tasa correcta para transferir la cantidad de energía necesaria para manejar la carga en aquel preciso momento.

A plena carga, la velocidad del motor ha caído hasta alcanzar el valor de placa del motor. La diferencia en velocidad entre el campo magnético rotatorio síncrono y la velocidad real del rotor es lo que se conoce como deslizamiento (*slip* en inglés). Un motor de cuatro-polos trifásico de bajo deslizamiento típico (velocidad síncrona de 1800 rpm), tendría una velocidad nominal a plena carga de 1750 rpm. La norma NEMA (National Electrical Manufacturer Association) para motores de bajo deslizamiento (diseño de torque A y B) requiere que el deslizamiento no exceda 5% a plena carga.

Los fabricantes de motores pueden cambiar la curva velocidad-torque de sus motores. Cuatro diferentes características velocidad-torque han sido parcialmente normalizadas por NEMA como motores de diseño A, B, C, y D. (ver tabla 6-5 y figura 6-11). Esas características cuando la frecuencia fija de 60 Hz era la dominante en la industria. La figura 6-11 (a) muestra las curvas torque-velocidad para esos motores a 60 Hz.

Tabla 6-5. Características de diseño de motores NEMA

Diseño NEMA	Corriente arranque	Torque arranque	Deslizamiento a carga nominal
A	Normal	Normal	Bajo
B	Normal	Normal	Bajo
C	Normal	Elevado	Bajo
D	Bajo	Muy alto	Alto

El motor de diseño B es el más usado en la industria. La figura 6-11 (b) muestra sus curvas velocidad-torque con puntos importantes identificados.

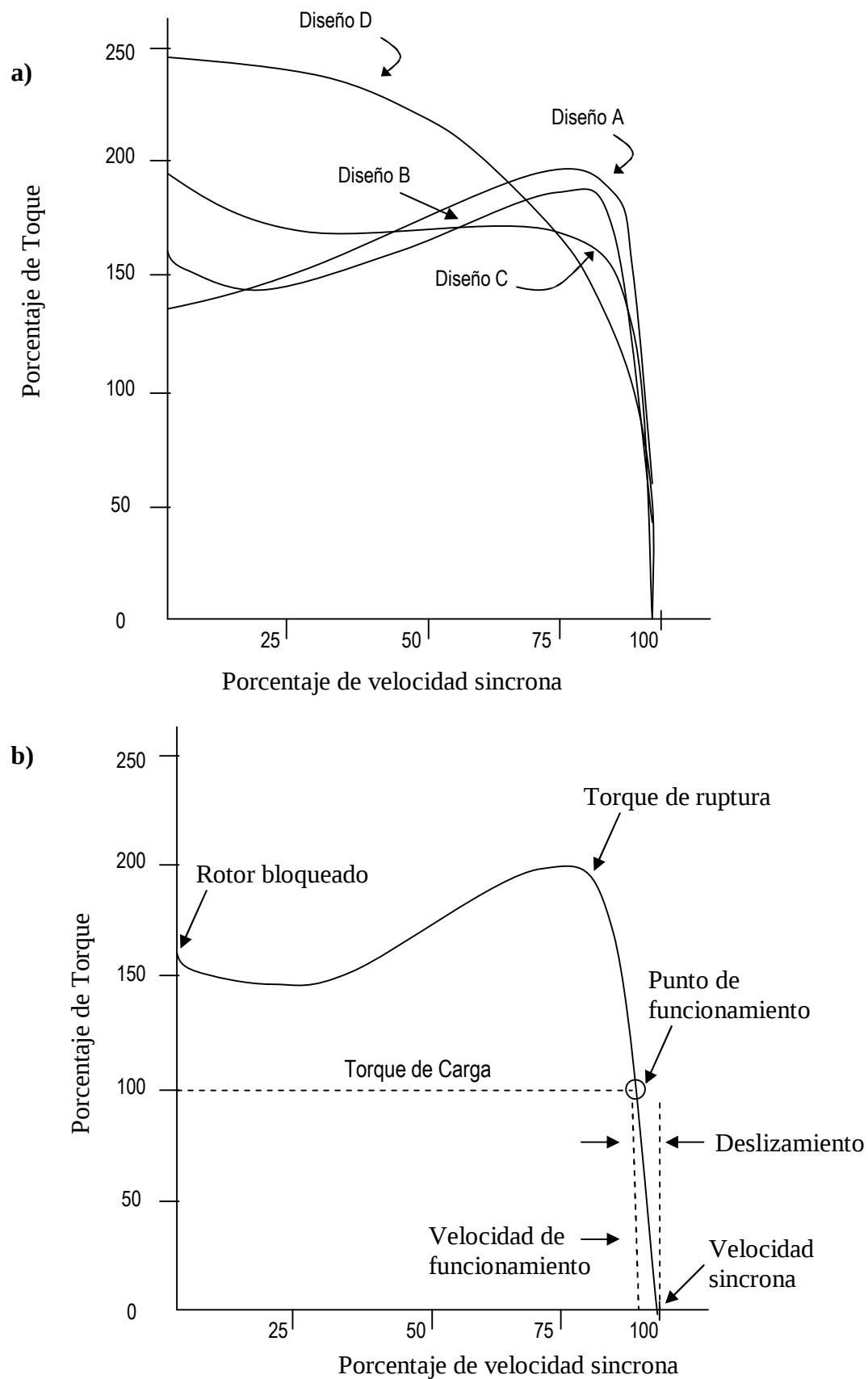


Figura 6-11- Curvas velocidad-torque típicas para motores de diseño NEMA

6.13 Potencia del motor

Los motores están dimensionados en caballos de fuerza (hp). Esta es una medida de cuanto trabajo mecánico puede hacer el motor en una cantidad específica de tiempo, y fue desarrollada por James Watt al tratar de convencer a los industriales de reemplazar la potencia animal por su máquina de vapor.

Un caballo de fuerza (1 hp) es equivalente a casi 746 W, de manera que una regla conveniente para hacer estimaciones rápidas de la potencia eléctrica equivalente es tres cuartos de un kilowatt igual a 1 hp. Los kilowatts de entrada al motor serían en realidad un poco mayores debido a las pérdidas. Una regla de cocina relacionada es que 1 hp de salida mecánica usa 1 kVA de entrada. Estas son solamente aproximaciones a ser usadas cuando información más precisa no está disponible.

Algunas fórmulas para determinar los hp incluyen las siguientes:

$$\text{hp} = (\text{Velocidad en rpm}) \times (\text{Torque en lb-pie}) / 5252$$

$$\text{hp} = (\text{Trabajo hecho en una hora [en pie-lb/h]}) / 1\,980\,000$$

$$\text{hp} = (\text{Número de kW}) / (0.746)$$

6. 14 Estudios de Motores

Cuando los motores se encuentran funcionando en el rango de eficiencia del 70-80%, la reducción en potencia que se logra por cada punto porcentual en mejoras es de aproximadamente 1 kW por cada hp de carga funcionando.

De esta manera si un motor de 100 hp funciona de manera continua durante un año, los ahorros resultantes de mejorar su eficiencia porcentual un punto porcentual serían

$$8760 \text{ h/año} \times 1 \text{ kW/100 hp} \times \$0.06/\text{kWh} \times 0.01 \text{ p.u.} = \$526 / \text{año}$$

Si un motor adecuado más pequeño ya está disponible, los costos por cambiarlo una vez son estimados entre \$500 a \$600, en materiales y mano de obra. Para identificar candidatos se requiere un estudio de motores.

La detección y cambio de motores grandes funcionando con carga menor a su capacidad por motores de menor tamaño y/o mayor eficiencia contribuirá grandemente a mejorar la eficiencia y el factor de potencia del sistema. Estos motores subcargados pueden ser detectados mediante el uso de dispositivos tales como tacómetros digitales de lectura estroboscópica.

Nótese que se requiere un tacómetro de tipo digital para leer la velocidad hasta el último dígito. Por esta razón, los tacómetros estroboscópicos usados comúnmente, en los que la velocidad se determina leyendo las 4 marcas en un dial plástico, no son adecuados para detectar deslizamiento en rpm.

La velocidad real de un motor de inducción depende del diseño del motor y de la carga en el eje del motor. La velocidad nominal a plena carga se indica en la placa del motor. El deslizamiento calculado a partir de los datos de placa es exacto al $\pm 1\%$ debido a variaciones en niveles y balance de voltaje entre terminales del motor. El deslizamiento rpm a plena carga es la diferencia entre la velocidad síncrona en rpm y los rpm a plena carga.

$\text{Deslizamiento (rpm)} = \text{velocidad síncrona (rpm)} - \text{velocidad a plena carga (rpm)}$

Para un motor de cuatro polos con una velocidad a plena carga de 1799, sería

$$1800 - 1700 = 100 \text{ rpm}$$

La medición del deslizamiento para determinar la carga del motor es una técnica útil cuando se afronta una auditoria de energía típica involucrando un número de motores debido a las variaciones en (1) datos de placa de los motores, (2) voltaje de línea en el motor, y (3) los efectos de la temperatura en el estator del motor pueden tender a promediarse sobre una base estadística. La técnica del deslizamiento puede no resultar tan útil o tan exacta cuando si se va a evaluar un solo motor.

La exactitud de los datos de placa es tratada en la norma NEMA MG-1 1993 en la sección 12.46, y el texto no ha sido cambiado desde los años sesenta. La norma establece: “La variación en los datos de placa o datos publicados sobre la velocidad de motores monofásicos o polifásicos, de corriente alterna no debe exceder 20 por ciento de la diferencia entre la velocidad síncrona y la velocidad nominal cuando se miden a voltaje, frecuencia y carga nominales, a una temperatura ambiente de 25°C. En la práctica la mayoría de fabricantes puede conseguir mantenerse dentro del 5% de los datos de placa, pero existen excepciones.

La variación en deslizamiento con el voltaje es proporcional al inverso del cuadrado de la relación de voltajes. Por ejemplo un motor con un voltaje nominal de 460 V, funcionando con un voltaje de línea con una reducción del 5% (437 V) tendría un incremento en el deslizamiento a plena de carga al 110.8% del valor de placa.

Una prueba del motor que también puede ser hecha es tomar la relación entre los amperios medidos y los amperios de placa a plena carga. Esta relación es válida si los amperios medidos se encuentran por arriba del 55-65 % del valor nominal a plena carga, el cual es el rango en que los amperios son lineales con la carga.

Otra prueba a realizar es la medición de la potencia de entrada al motor usando un vatímetro portátil. Al comparar los kilowatts medidos con un valor calculado de kilowatts basado en el valor de eficiencia asumida usualmente disponible con el fabricante del motor producirá una verificación más acerca de la carga real del motor. Por ejemplo

Carga del motor = kilowatts medidos / [hp de placa] x (0.746) x (0.88)]

La determinación más exacta de la carga del motor es usando datos de prueba real con dinamómetro de un laboratorio certificado.

En resumen la prueba del deslizamiento es útil para identificar ahorros potenciales en auditorías energéticas resultantes de cambiar motores subcargados por motores más pequeños, de eficiencia más elevada.

Como se detalla en la figura 6-12, la medición a la salida del motor se basa en el principio de que el deslizamiento en rpm es lineal desde el 10% de carga hasta el 110% de carga.. Por ejemplo el motor de cuatro polos discutido antes, se encontró trabajando a 1760 rpm. Si la potencia de salida de datos de placa es de 10 hp, ¿Cuál es la salida real en las condiciones medidas?

Deslizamiento a plena carga = $1800 - 1700 = 100 \text{ rpm} = 100\%$ de plena carga

Deslizamiento de operación = $1800 - 1760 = 40 \text{ rpm}$

Carga real = deslizamiento de operación / deslizamiento a plena carga = $40/100 = 0.40$

Carga de salida = $10 \text{ hp} \times 0.40 = 4 \text{ hp}$

Tome nota que por debajo del 50% de los amperios a plena carga, la corriente del motor deja de ser una medición válida de la carga del motor. Debido a la disminución en el factor de potencia del motor, más y más amperios de la corriente aparente son amperios reactivos a medida que la carga disminuye.

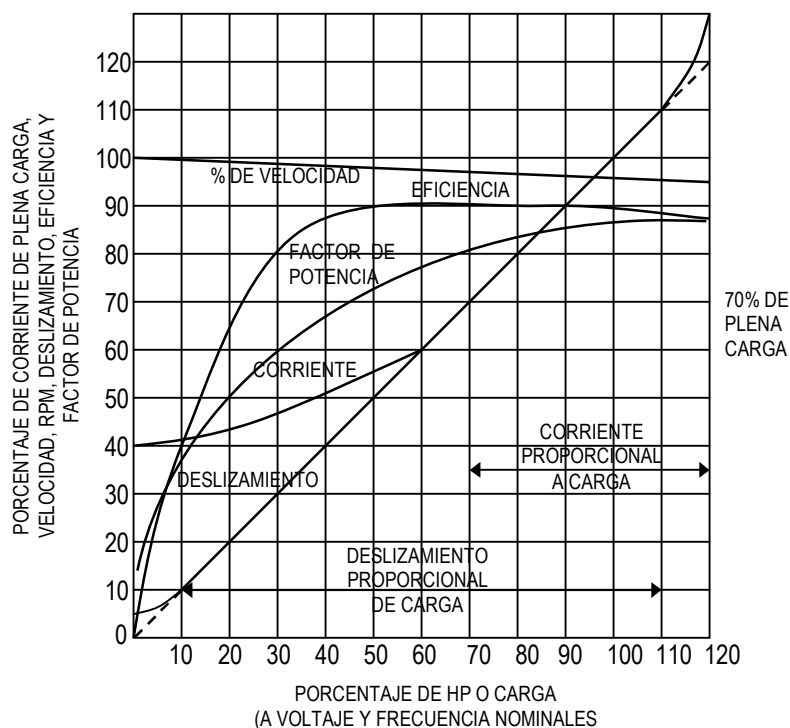


Figura 6-12. Curva típica para motor de inducción de diseño NEMA B

6.15 Realizando un estudio de motor

En la figura 6-12 se observa que el factor de potencia y la eficiencia disminuyen a medida que el motor maneja menos carga. Así, un estudio de motores es una de las áreas primarias de consideración en una auditoría de energía inicial en una instalación. Para ayudar en este estudio un formato como el de la figura 6-13 es recomendable para garantizar que toda la información pertinente es recogida. Los datos del motor pueden obtenerse del fabricante, o por medio de herramientas tales como el software *Motormaster* desarrollado para el Departamento de Energía de EE.UU.

El ejemplo de la figura 6-14 ilustra un motor de 75 hp manejando una carga de ventilación de 36 hp. El retorno simple calculado con cambiarse a un motor de eficiencia nominal de 0.88 de 40 hp es 0.527 años

HOJA DE DATOS DE PRUEBA PARA MOTOR DE INDUCCION

Compañía	_____	Planta	_____	Fecha	_____
Edificio	_____	Depto.	_____	Aplicación	_____
Numero de Taller de Motor	_____	Numero de Fase y Hz	_____		
Marca	_____	Tamaño del cuadro	_____		
Modelo/Tipo	_____	Clase de aislamiento	_____		
Numero de Serie	_____	Eficiencia nominal	_____		
Factor de Servicio	_____	Tipo de torque NEMA	_____		
Tipo de Caja	_____	Incremento de temp.	_____		
a) HP a plena carga	_____	Valores Calculados			
b) Voltios	_____	n) Deslizamiento de operación (e-k)	_____		
c) Amperios	_____	p) Porcentaje de carga (n/f)(100%)	_____		
d) Velocidad a plena carga	_____	q) HP de salida (a)(p)(100%)	_____		
e) Velocidad sincrona	_____	r) kW de salida (q)(0.746)	_____		
2 polos = 3,600, 4 polos= 1,800, 6 polos = 1,200		s) Porcentaje de Eficiencia (r/j)(100%)	_____		
f) Deslizamiento a plena carga	_____	t) kVA de entrada (g)(h)(1.732)(1000)	_____		
Valores Medidos		u) Factor de potencia (j)/(t)(100%)	_____		
g) Voltios promedio	_____	v) Perdidas en kW (j-r)	_____		
h) Amperios promedio	_____	w) \$ /año de Operación (j)(l)(m)	_____		
j) kW promedio	_____	x) \$/año de Perdidas (v)(l)(m)	_____		
k) Velocidad de operación, rpm	_____	y) Ahorros de energía anuales debido	_____		
i) Horas de operación a plena carga	_____	a cambio a un motor de _____ hp de alta eficiencia (r)(l)(m)(100/s-100/EFF)	_____		
m) Precio promedio de la electricidad (\$kWh)	_____	Costo del motor	_____		
		Retorno simple, años	_____		

Figura 6-13. Hoja de datos de prueba para motores de inducción

HOJA DE DATOS DE PRUEBA PARA MOTOR DE INDUCCION

Compañía	_____	Planta	_____	Fecha	_____
Edificio	_____	Depto.	_____	Aplicación	_____
Numero de Taller de Motor	_____	Numero de Fase y Hz	_____		
Marca	_____	Tamaño del cuadro	_____		
Modelo/Tipo	_____	Clase de aislamiento	_____		
Numero de Serie	_____	Eficiencia nominal	_____		
Factor de Servicio	_____	Tipo de torque NEMA	_____		
Tipo de Caja	_____	Incremento de temp.	_____		
a) HP a plena carga	_____	Valores Calculados			
b) Voltios	_____	n) Deslizamiento de operación (e-k)	_____		
c) Amperios	_____	p) Porcentaje de carga (n/f)(100%)	_____		
d) Velocidad a plena carga	_____	q) HP de salida (a)(p)(100%)	_____		
e) Velocidad sincrona	_____	r) kW de salida (q)(0.746)	_____		
2 polos = 3,600, 4 polos= 1,800, 6 polos = 1,200		s) Porcentaje de Eficiencia (r/j)(100%)	_____		
f) Deslizamiento a plena carga	_____	t) kVA de entrada (g)(h)(1.732)(1000)	_____		
Valores Medidos		u) Factor de potencia (j)/(t)(100%)	_____		
g) Voltios promedio	_____	v) Perdidas en kW (j-r)	_____		
h) Amperios promedio	_____	w) \$ /año de Operación (j)(l)(m)	_____		
j) kW promedio	_____	x) \$/año de Perdidas (v)(l)(m)	_____		
k) Velocidad de operación, rpm	_____	y) Ahorros de energía anuales debido	_____		
i) Horas de operación a plena carga	_____	a cambio a un motor de _____ hp de alta eficiencia (r)(l)(m)(100/s-100/EFF)	_____		
m) Precio promedio de la electricidad (\$kWh)	_____	Costo del motor	_____		
		Retorno simple, años	_____		

Figura 6-14. Ejemplo 1, motor con carga