

5960035

PN-1772-292
15N-54810

62

INSTITUTO CENTROAMERICANO DE INVESTIGACION

Y TECNOLOGIA INDUSTRIAL

- I C A I T I -

EL USO EFICIENTE
DE LA ENERGIA ELECTRICA
EN LA INDUSTRIA

Proyecto de Eficiencia Energética en la Industria Regional

1984

I N D I C E

INTRODUCCION	
1.	SISTEMAS ELECTRICOS INDUSTRIALES 9
2.	MOTORES ELECTRICOS DE ALTO RENDIMIENTO 19
2.1	¿Qué es un motor de alto rendimiento? 19
2.2	¿Qué es eficiencia? 19
2.3	¿Cómo se determina el rendimiento? 22
2.4	Pérdidas en un motor de inducción 22
2.4.1	Pérdidas de joule 22
2.4.2	Pérdidas en el hierro 22
2.4.3	Pérdidas por fricción 23
2.5	Resumen de distribución de pérdidas 24
2.6	Métodos de determinación de la eficiencia 24
2.6.1	Comparación de rendimientos determinados por métodos diferentes 25
2.7	Aspectos económicos de motores eficientes 26
2.7.1	Ciclo de vida 26
2.7.2	Ahorros directos y pérdidas en recuperación 28
2.7.3	Evaluación del factor de eficiencia (FE) 29
2.8	Efecto económico del mantenimiento preventivo 31
3.	FACTOR DE POTENCIA, COMPENSACION Y CONTROL DE DEMANDA 39
3.1	Factor de potencia 39
3.1.1	Definiciones 41
3.1.2	Secuencia de fase entre corriente y voltaje 42
3.1.3	División de una corriente alterna desfasada en sus componentes 42
3.1.4	Potencia aparente, efectiva y reactiva 43
3.2	Efectos de un bajo factor de potencia 44
3.2.1	Ventajas de la corrección del factor de potencia 45
3.3	Compensación 46

3.3.1	Significado de la compensación en redes de alimentación.	46
3.3.2	Potencia reactiva del condensador, corriente del condensador	47
3.3.3	Tipos de compensación	49
3.3.4	Compensación individual	50
3.3.5	Compensación individual de los transformadores	50
3.3.6	Compensación individual de los motores	51
3.3.7	Protección para motores trifásicos compensados	52
3.3.8	Precaución con autoexcitación	53
3.3.9	Conexión estrella-delta de motores trifásicos compensados	54
3.3.10	Compensación individual de lámparas fluorescentes	55
3.3.11	Compensación en grupo de lámparas fluorescentes	56
3.3.12	Compensación central en general	57
3.3.13	Construcción de un sistema de regulación de potencia desvatada	58
3.3.14	Localización del transformador de corriente	58
3.3.15	Capacitores de potencia	59
3.3.16	Motores síncronos	59
3.3.17	Controladores del factor de potencia (cfp)	60
3.4	Control de demanda	60
3.4.1	Conceptos básicos	61
3.4.2	Perfiles de demanda	62
3.4.3	Métodos de control de demanda	62
4	ILUMINACION	68
4.1	Principios de iluminación	68
4.1.1	Radiación	68
4.1.2	Visión	71
4.1.3	Medidas de iluminación	75
4.1.4	Color	75
4.1.5	Propiedades ópticas	77

b

4.2	Eficiencia y costo en iluminación	80
4.3	Tipos de lámparas	81
4.3.1	Lámpara incandescente	81
4.3.2	Lámparas fluorescentes	85
4.3.3	Lámpara de sodio. De alta presión (HPS) y de baja presión (LPS)	86
4.3.4	Lámparas de halógenos	91
4.3.5	Ejemplos de conservación de energía	91
4.3.6	Elementos y equipos de control en iluminación	93
4.4	Cantidad y calidad de luz requerida	94
4.5	Diseño del alumbrado. Ejemplo	94
4.6	Mantenimiento	99
4.7	Recomendaciones	100
4.8	Anexos	101
5.	VENTILACION Y ACONDICIONAMIENTO DE AIRE	109
5.1	Teoría fundamental de la refrigeración.	109
5.2	Operación y mantenimiento con miras a conservación de energía	112
5.3	Sistemas enfriadores de agua (Chiller)	115
5.4	Sistemas economizadores de la torre de enfriamiento	116
5.5	Ciclos de enfriamiento libre	117
5.6	Operación de compresores de velocidad variable	119
5.7	Sistemas de distribución y manejo de aire	121
5.8	Ciclo economizador (lado del aire)	125
5.9	Sistemas de control automáticos	126
5.10	Reducción de las horas de operación del sistema	126
5.11	Control de ciclo economizador	128
6.	EQUIPO PARA PROCESADO	133
6.1	Compresores	134
6.2	Medidas de mantenimiento	134
6.3	Ajuste del equipo y prácticas de operación	138
6.4	Tipos de compresores y sus rendimientos	138
6.5	Bombas	140

6.6	Mantenimiento	142
6.7	Operación y control	143
6.8	Equipo de trituración y molienda	148
6.9	Manejo y transporte de materiales	151
6.10	Sistemas de manejo de aire	152
7.	INSTRUMENTACION	155
7.1	Introducción	155
7.2	Mediciones eléctricas. Voltímetros	155
7.2.1	Operación básica e instalación	156
7.2.2	Principios de operación	158
7.3	Voltímetros de corriente directa	160
7.3.1	Voltímetros de corriente alterna	163
7.3.2	Voltímetros electrónicos	163
7.3.3	Opciones de equipos	163
7.4	Amperímetros	170
7.4.1	Operación básica e instalación	170
7.4.2	Principios de operación	172
7.5	Vatímetros de CA e indicadores de demanda en kW	184
7.5.1	Operación básica e instalación	185

BIBLIOGRAFIA

d

INTRODUCCION

El punto de partida es conocido: de 1875 a 1975 aumentó el consumo de los energéticos a nivel mundial de 0.5 a 8 000 millones de toneladas-SKE* en forma exponencial. Las causas de esto son la industrialización y el aumento de la población mundial de 1 000 millones a unos 4 000 millones. En 1975 se cubrían dos terceras partes de la demanda de los energéticos primarios con petróleo y gas natural; el resto, es decir, carbón y otros energéticos de origen fósil, cubrían una tercera parte (ver figuras 0.1 y 0.2).

La distribución de las reservas de energéticos se encuentra en desequilibrio con el consumo de éstos. Lo anterior y la situación política del Oriente Medio dio origen al embargo del petróleo en 1973, lo que resultó, junto con una economía mundial en proceso de inflación, en un alza de los precios de los productos derivados del petróleo. Como una consecuencia lógica, los países industrializados tomaron conciencia sobre el "desperdicio" de la energía, y fue entonces cuando se originó la necesidad de la conservación de la energía mediante programas y técnicas para su mejor aprovechamiento en la industria que es el mayor consumidor.

Dentro del sector industrial centroamericano, la electricidad, el bunker y el diesel son los que se usan predominantemente. Hasta hace poco tiempo no se había prestado mucha atención a los procesos que consumen electricidad, porque la mejora de la eficiencia de tales sistemas resulta bastante difícil. Sin embargo, estos procesos son muy importantes en vista de que la electricidad está convirtiéndose en una de las fuentes que suplen la mayor parte de la energía destinada al uso industrial. Las figuras 0.5 y 0.6 muestran la distribución de los consumos por energéticos y la comparación de costos por 1.055×10^9 J (10^6 Btu). De estos resultados se deriva la necesidad de una política encaminada al ahorro energético a nivel regional y la introducción de programas y medidas

*) Tonelada-SKE: Energía producida por una tonelada de carbón mineral.

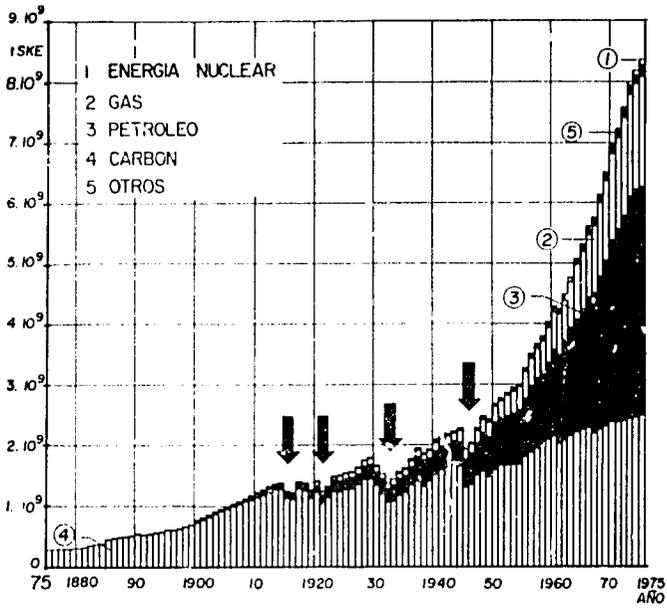


FIGURA 0.1 CONSUMO MUNDIAL DE ENERGETICOS PRIMARIOS

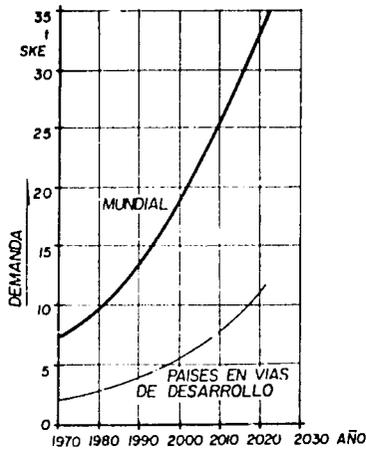


FIGURA 0.2 PRONOSTICO DEL CONSUMO DE ENERGIA

que lleven a una utilización racional y económica de la energía en cualquiera de sus formas: mejoramiento del aislamiento en sistemas de calor, optimización de la iluminación, uso de fuentes regeneradoras de energía como el viento y la energía solar. A esto hay que agregarle la ayuda a la investigación, desarrollo e introducción al mercado de tecnologías sobre conservación de energía. De especial importancia es también la asesoría al sector privado sobre las posibilidades de ahorro de energía. La conservación de energía eléctrica deberá ser parte integral de un programa global de administración de energía que cubra en su totalidad las formas y el consumo de energía.

Para el desarrollo de un programa de ahorro de energía eléctrica a nivel empresarial y su realización en medidas concretas, se recomienda hacer un balance energético y un diagrama de flujos de energía (figura 0.3) en todos los porcentajes y aplicaciones posibles en las diferentes áreas (total de fuerza motriz, iluminación, aire acondicionado, calentamiento, etc.), complementado con un flujo de costos.

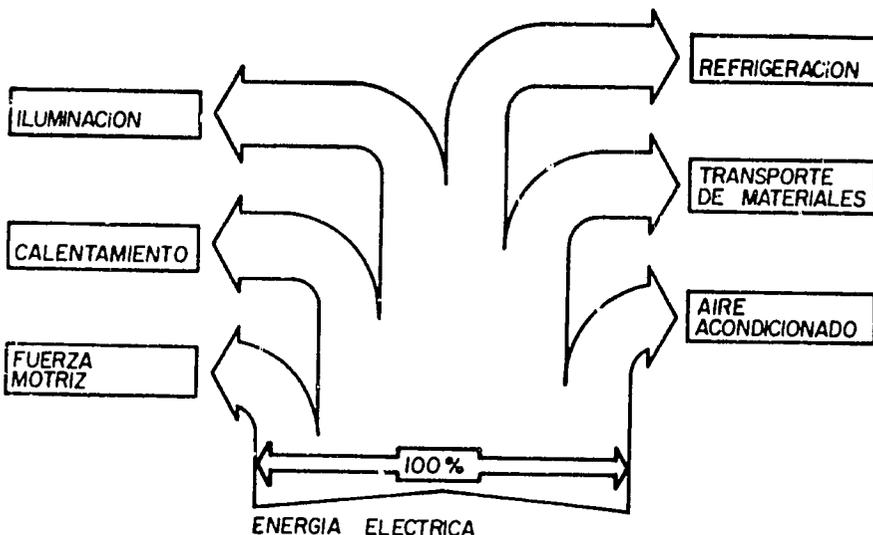


FIGURA 0.3: DIAGRAMA DE FLUJOS DE ENERGIA ELECTRICA EN UNA EMPRESA

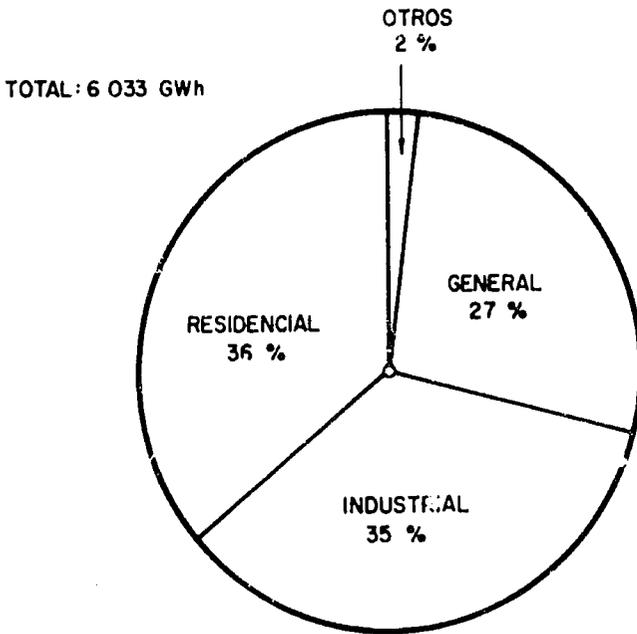


FIGURA 0.4: DISTRIBUCION DEL CONSUMO DE ENERGIA ELECTRICA EN CENTROAMERICA

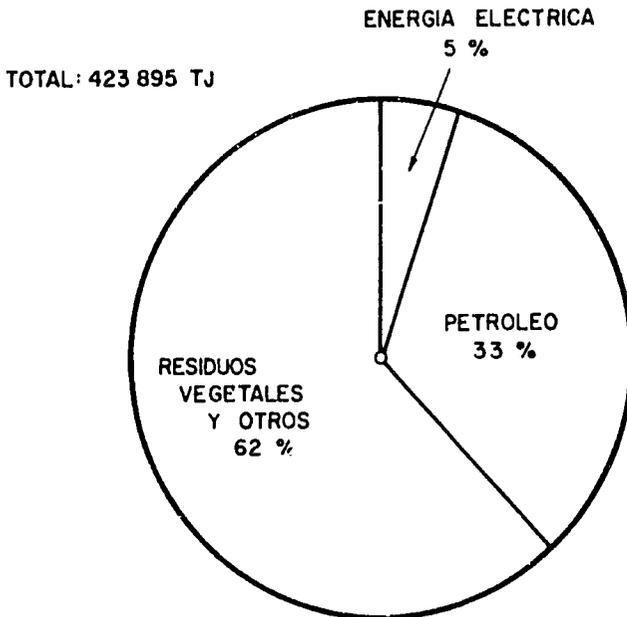


FIGURA 0.5: ENERGETICOS CONSUMIDOS EN CENTROAMERICA

Para la reducción del total de la energía eléctrica comprada por la empresa es primordial observar los siguientes principios básicos:

- evitar el uso innecesario de energía útil, es decir, el consumo de energía que no lleva a un adelanto en la producción o prestación de servicios.
- reducción de la demanda de energía útil para fines específicos mediante controles automáticos.
- incremento del grado de eficiencia en la conversión de energía mediante mejoras técnicas de los sistemas.
- concepción integrada de conservación de energía en procesos de producción completos en todos sus pasos, revisando condiciones o parámetros como temperaturas, presiones y velocidades que recorre una línea.

La figura 0.4 nos muestra la distribución del consumo de energía eléctrica en diferentes áreas. Esta es una distribución representativa para los países del área centroamericana.

La figura 0.5 muestra la distribución porcentual de los energéticos más consumidos en el área.

El diagrama de barras de la figura 0.6 muestra una comparación entre los costos por 1.055×10^9 joule (millón de Btu) generados en los diferentes países del área a base de electricidad, bunker y diesel. Estos costos están calculados tomando como base una combustión total o conversión de energía sin pérdidas. Tomando un rendimiento de conversión del 80 por ciento, aumentan los costos por 1.055×10^9 J (millón de Btu) en un 25 por ciento.

COSTO POR GENERACION DE UN MILLON DE BTU
(= 1.055 x 10⁹) CON DIFERENTES ENERGETICOS

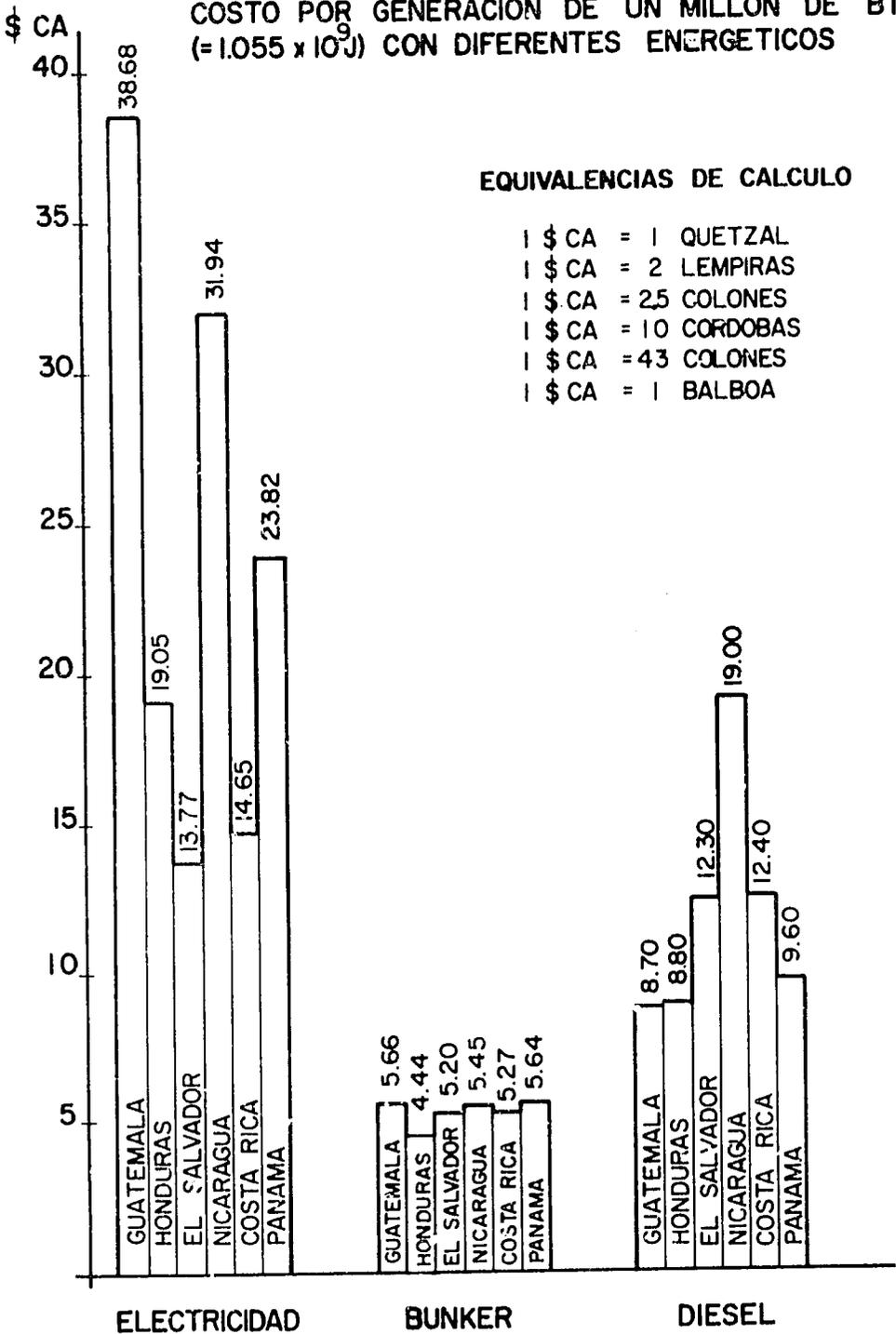


FIGURA 0.6

FUENTE: SIECA (1982)

A continuación presentamos (figura 0.7) la cadena de conversión de energía desde la energía almacenada en los energéticos hasta la energía utilizada en las maquinarias de proceso en la industria:

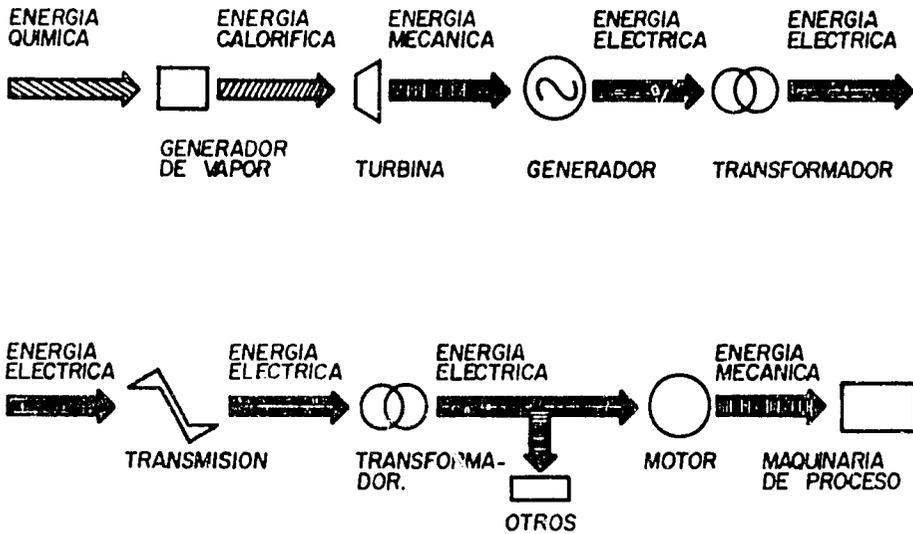


FIGURA 0.7: CADENA DE CONVERSION DE ENERGIA

En este flujograma podemos observar la importancia que tiene la mejor utilización de cada uno de los elementos que forman esta cadena, si consideramos que cada paso de conversión es realizado mediante pérdidas inevitables. Es decir que cada uno de los elementos tiene un grado de rendimiento ($E < 1$) determinado por las pérdidas. Un proyecto de conservación de energía puede influir casi en todos los elementos de la cadena, mediante el uso eficiente de la energía final. La conservación de energía eléctrica deberá ser parte integral del programa global de administración de energía que cubra la planta en su totalidad. Este manual trata de los varios aspectos que deben incluirse en tal programa, considerando sistemas de alambrado y distribución de potencia en plantas, motores eléctricos eficaces, factor de

potencia, corrección de éste y control de demanda, uso eficaz de la iluminación y conservación de energía en maquinaria de proceso.

1. SISTEMAS ELECTRICOS INDUSTRIALES

La electricidad desempeña un papel muy importante en las instalaciones industriales, ya sea accionando motores e instrumentos, iluminando ambientes o moviendo equipo procesador. La continuidad de la producción industrial misma puede depender de un sistema eléctrico que no cause problemas. Por lo tanto, los elementos básicos del sistema eléctrico de una planta deben diseñarse para que funcionen con óptimo rendimiento y que suministren los voltajes apropiados para la maquinaria. Ya sea que se trate de la instalación de alambrado en una fábrica nueva o de una ampliación, deben respetarse siempre algunos aspectos fundamentales que son importantes en el diseño de los sistemas de distribución de energía. Estos aspectos deben atenderse cuando la nueva red de alambrado se planea y se añade a la planta para conseguir el más alto rendimiento en la operación y en el uso de energía.

El primer paso que hay que dar para conseguir un buen diseño de un sistema eléctrico para cualquier planta, es establecer las demandas de energía que hay en los diferentes puntos de consumo. Es necesario establecer el número y el consumo de todos los motores eléctricos, bombas, compresores, unidades de refrigeración y otros equipos, y cuál será la energía demandada en iluminación e instrumentos. En base a lo anterior, se calculará la demanda total prevista. Deberá tenerse un plano de distribución que muestre la subestación principal, el centro de distribución de energía eléctrica y la localización de los motores o equipos de mayor consumo; también es indispensable determinar el tipo del sistema de distribución eléctrica de la planta y los niveles de voltaje para la red y el equipo que se usará. Asimismo, deberá estudiarse la factibilidad técnica y económica de generar la energía eléctrica en el mismo sitio.

Cuando ya se conocen todos los factores mencionados, es necesario realizar una consulta con la empresa eléctrica correspondiente, en caso de que deba comprarse la energía eléctrica. Las decisiones que se adopten como resultado de esta consulta pueden afectar la operación del sistema eléctrico,

el diseño del equipo de protección y de los circuitos automáticos de transferencia y el tipo de equipo que se seleccione. Deben establecerse las características físicas y eléctricas del equipo y de la empresa eléctrica para proceder a los arreglos de instalación de la subestación principal. Deberá llegarse a un acuerdo acerca del emplazamiento de los medidores y del equipo y acerca de los programas de tarifas. Se aconseja una revisión final y completa en conjunto con los representantes de la empresa eléctrica.

La energía puede distribuirse desde la subestación principal hacia la planta mediante diferentes métodos. Debe determinarse cuál método es el óptimo y debe elaborarse un diagrama unifilar sobre esto. Este diagrama mostrará los puntos en los que se localicen las cargas y cómo se alimentan; servirá como base para calcular corrientes de cortocircuitos para estudios de coordinación de protecciones, para la corrección del factor de potencia, para la selección del equipo y para los planes de ahorro de energía. Por otro lado, los diagramas unifilares pueden ser de utilidad en el mantenimiento de la planta para identificar regiones problemáticas y para tomar medidas correctivas. Para diseñar un diagrama unifilar es necesario:

- determinar cargas y su localización,
- determinar niveles de voltajes de acometida y distribución en la planta,
- determinar tipos de equipos y rendimientos de éstos, y
- determinar la confiabilidad requerida para el sistema.

Cuando estos factores han sido establecidos, es posible elegir un sistema de distribución. El sistema radial simple (figura 1.1.a) que consiste en una acometida y un transformador, es el más económico, pero solamente es adecuado para plantas pequeñas que operan por etapas; el sistema es simple y confiable, pero es necesario desconectarlo para el mantenimiento de rutina, dejando sin energía a todo el sistema.

El sistema de selección primaria consta de dos acometidas y dos disyuntores para los transformadores primarios; por tanto, en el caso de que haya una

FIGURA 1.1a
SISTEMA
RADIAL SIMPLE

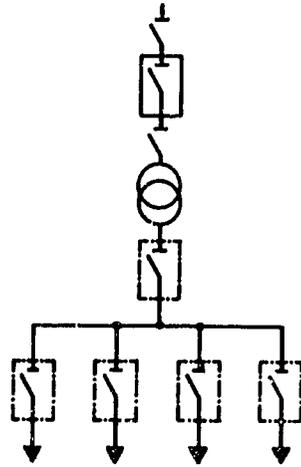


FIGURA 1.1b
SISTEMA DE
SELECCION
PRIMARIA

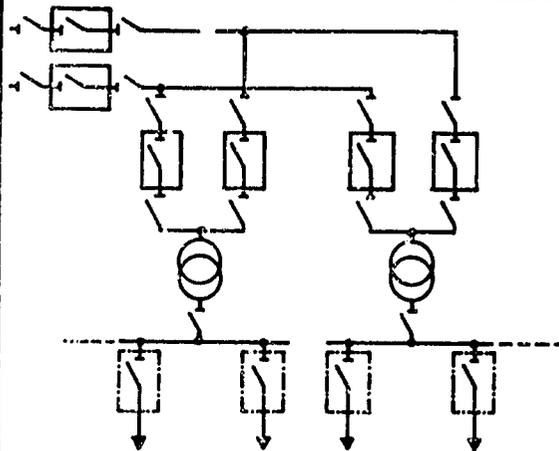
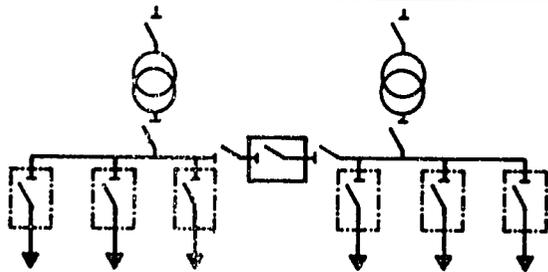


FIGURA 1.1c
SISTEMA DE
SELECCION
SECUNDARIA



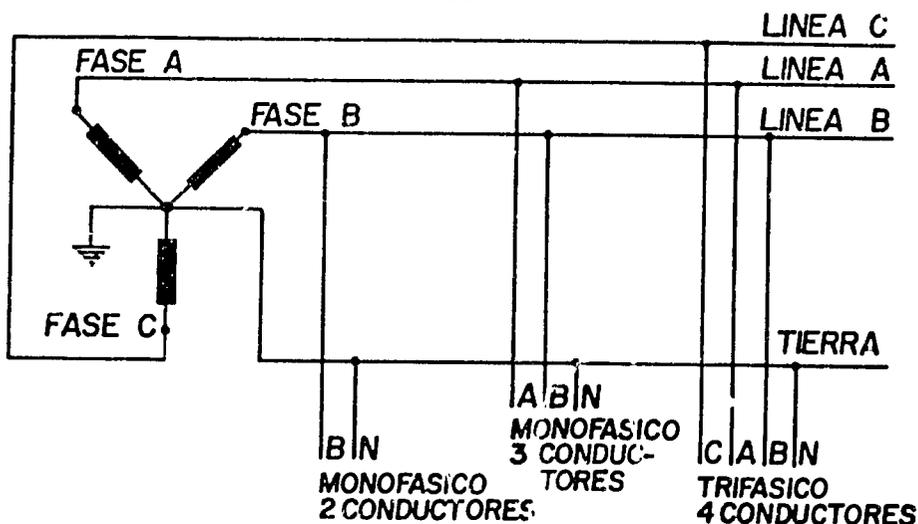
 INTERRUPTOR DE POTENCIA
 INTERRUPTOR DE CARGA

 TRANSFORMADOR
 INTERRUPTOR

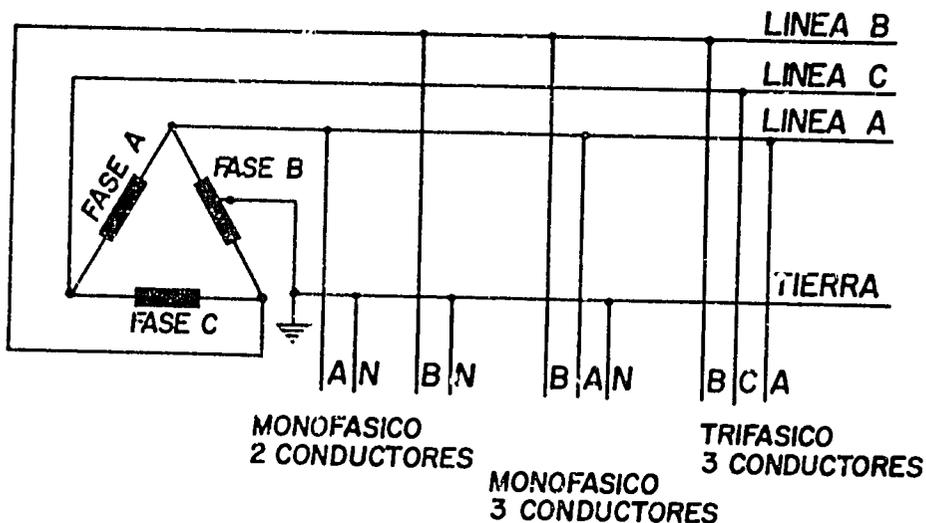
interrupción en la línea de suministro normal, el transformador puede conectarse a la línea auxiliar de energía y el equipo principal puede seguir operando sin interrupción (figura 1.1.b).

El sistema de selección secundaria que consta de dos subestaciones completas conectadas mediante disyuntores es el sistema más confiable y el más costoso (figura 1.1.c); si un transformador o su acometida primaria sufre una falla, el otro transformador puede conducir la carga completa y el servicio puede reestablecerse luego de una momentánea interrupción. Se puede lograr mayor confiabilidad usando combinados los elementos básicos de estos dos últimos sistemas (selección primaria y selección secundaria).

El sistema de distribución eléctrica de la planta se instala con el propósito de suministrar energía a todo el equipo eléctrico, con el voltaje correcto y dentro de los límites normales de operación. De ahí que la elección de los voltajes del suministro dentro de la planta sea de mucha importancia. Los sistemas de generación de energía eléctrica son, por lo general, del tipo trifásico, es decir, que los devanados del generador se disponen de tal manera que se generan tres ondas de voltaje desfasadas 120 grados eléctricos entre sí. Los devanados del generador y de los transformadores se conectan en "estrella" o en "delta". Los arreglos en "estrella" se utilizan en sistemas primarios y secundarios para disponer de una conexión a tierra, como característica de seguridad. Las figuras 1.2 y 1.3 muestran esas configuraciones.



CONEXION TRIFASICA EN ESTRELLA DE 4 CONDUCTORES
FIGURA 1.2



CONEXION TRIFASICA EN DELTA
FIGURA 1.3

En instalaciones industriales grandes que compran energía eléctrica hay tres niveles de voltaje:

- Voltaje de línea de transmisión. Entrada a la subestación principal.
- Voltaje primario de distribución. Desde la subestación principal a las subestaciones secundarias, y
- Voltaje de distribución. Desde las subestaciones secundarias a los diferentes centros de consumo.

Los voltajes en las líneas de transmisión varían desde 23 kV hasta 230 kV. Las tensiones de 4 160 V y 13.8 kV también se usan comúnmente para la distribución industrial primaria. Para la distribución secundaria, los voltajes más comunes son 120/280 V, 277/480 V, 240 V y 480 V (trifásico). El servicio trifásico se emplea para motores cuya potencia sea superior a 0.2 kW ($\frac{1}{2}$ hp) y para otro tipo de equipo que consuma grandes cantidades de energía. Las condiciones de operación son 460 V, 60 Hz, trifásico a voltaje nominal de 480 V; se pueden obtener motores que se ajusten a estas condiciones desde 0.2 kW hasta 225 kW ($\frac{1}{2}$ hp hasta 300 hp). La tensión monofásica de 120 V ó 227 V se emplea para iluminación, y 220 V monofásicos para pequeños equipos eléctricos.

Una vez definidos el sistema de distribución de energía eléctrica y los niveles de voltaje por utilizar, se procede a la selección de los conductores según su finalidad, a la selección de los equipos de manejo de energía, transformadores, controles, etc. Una guía para la selección de los elementos anteriores es el Código Eléctrico Nacional (N E C = National Electric Code). A esta guía hay que añadir las prescripciones requeridas por los códigos locales, a fin de obtener máxima garantía de seguridad en la operación.

En la mayoría de los casos cuando se compra equipo eléctrico, se encuentra que hay muchas marcas o tipos que satisfacen las exigencias operativas. Es aquí cuando el ingeniero tiene que tomar en cuenta varios factores de decisión:

- Costo inicial
- Costo de operación (consumo)
- Características de prueba del equipo
- Facilidad de operación
- Obtención de repuestos
- Tiempo de entrega, etc.

Un factor muy importante en la actualidad, el cual no se tomaba en cuenta antes del acelerado aumento de los precios del petróleo, es la cantidad de pérdidas que ocurren en un equipo individual o en un sistema completo; en los últimos años se aceptaban pérdidas del orden de 2 a 3% de los costos de operación de los equipos. Actualmente los costos iniciales de los componentes deben compararse con los costos de operación del sistema a largo plazo.

Siempre tomando en cuenta el precio de la energía eléctrica en el lugar, en esta época a veces resulta más ventajoso invertir una suma inicial mayor en el sistema, para adquirir componentes que tengan las pérdidas menores en operación (eficiencia mayor).

La tabla siguiente muestra los intervalos de pérdidas para equipos de sistemas de potencia, a carga completa:

- interruptores de circuito para intemperie	0.002- 0.015	%
- dispositivos de interruptores para tensiones medias	0.005- 0.02	%
- transformadores	0.4 - 1.9	%
- interruptores de sobre intensidad	0.003- 0.025	%
- rieles de distribución	0.05 - 0.50	%
- dispositivos de interruptores para tensiones bajas	0.13 - 0.34	%
- centros de controles para motores	0.01 - 0.40	%
- cables	1.0 - 4.0	%

-	motores:		
	• de 0.746 kW a 7.46kW (1 a 10 hp)	14 - 35	%
	• de 7.46 kW a 150 kW (10 a 200 hp)	60 - 12	%
	• de 150 kW a 1120 kW (200 a 1500 hp)	4.0 - 7.0	%
-	transmisiones estáticas de velocidad variable	6.0 - 15	%
-	capacitores	0.5 - 2.0	%
-	iluminación	3.0 - 9.0	%

Los componentes de un sistema de distribución a los que corresponde el más alto porcentaje de pérdidas son los cables. La capacidad de un conductor para conducir corriente está determinada por la máxima temperatura de operación que soporta su aislamiento; el calor que causa el aumento de temperatura es producido por la pérdida de potencia en el conductor, dada por $I^2 \times R$. Se pueden conseguir conductores de aluminio y conductores de cobre; el aluminio tiene una resistencia eléctrica más alta que el cobre de manera que en un cable de aluminio pasa menos corriente que en uno de cobre de la misma sección, ya que su más alta resistencia disipa más calor (mayores pérdidas). Por consiguiente, la temperatura máxima de operación del conductor, en este caso, se alcanza con corrientes más bajas, y entonces para transportar la misma cantidad de corriente el conductor de aluminio debe ser de mayor sección que el conductor de cobre.

Cuando se hace la selección del tipo de conductor que se instalará, debe tomarse en cuenta el tamaño apropiado y su costo inicial, ya que el cobre es más caro que el aluminio; también deben tomarse en cuenta las pérdidas en operación. La figura 1.4 indica el método apropiado para determinar la sección transversal más económica de un conductor. El gráfico se basa en:

- La sección transversal más pequeña (económica) que se necesita para transportar la carga requerida o bien para lograr la caída tolerable de voltaje;
- El área transversal máxima con base en el NEC;
- Las pérdidas en el cable cuando conduce energía;

- d. El costo por kWh;
- e. El número de horas de operación por año;
- f. El costo del cable;
- g. Los cargos por capital, y
- h. La amortización anual.

Cada vez que se compre un conductor nuevo deben efectuarse cálculos análogos para lograr los costos óptimos para el sistema.

Debido a que, tanto el generador en la planta eléctrica como todas las líneas de transmisión y los transformadores deben conducir la carga adicional que corresponde al componente de potencia reactiva, aumentan la caída de voltaje y las pérdidas de potencia en los cables. Este tema se tratará más adelante cuando se discuta el factor de potencia y la compensación de sistemas.

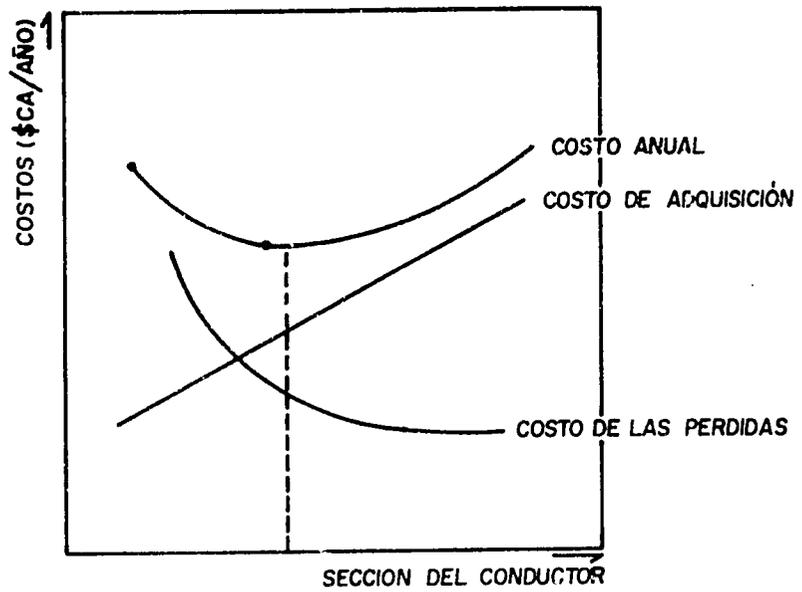


FIGURA 1.4
DETERMINACION DE LA SECCION OPTIMA
DE UN CABLE

2. MOTORES ELECTRICOS DE ALTO RENDIMIENTO

2.1 ¿QUE ES UN MOTOR DE ALTO RENDIMIENTO?

Desde 1974, los fabricantes de motores eléctricos investigan la tendencia al alza de los costos de los energéticos y los costos por el aumento del rendimiento de los motores. La relación costo/ahorro justificó el desarrollo de una línea de motores de alto rendimiento con pérdidas de un 25 por ciento por debajo de las pérdidas de un motor estándar.

La siguiente figura (figura 2.1) muestra la comparación de las pérdidas en watts entre motores estándar y motores de alto rendimiento, basada en una reducción de las pérdidas en un 25 por ciento. En forma similar, la Figura 2.2 ilustra la diferencia de rendimientos entre motores estándares y motores de alto rendimiento en el mismo intervalo de potencia.

2.2 ¿QUE ES EFICIENCIA?

El rendimiento de un motor eléctrico es la capacidad de éste de transformar energía eléctrica en energía mecánica.

La única potencia absorbida por el motor es la pérdida en que incurre éste al convertir la energía eléctrica a energía mecánica.

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{Energía mecánica en el eje}}{\text{Energía eléctrica alimentada}} \times 100\%$$

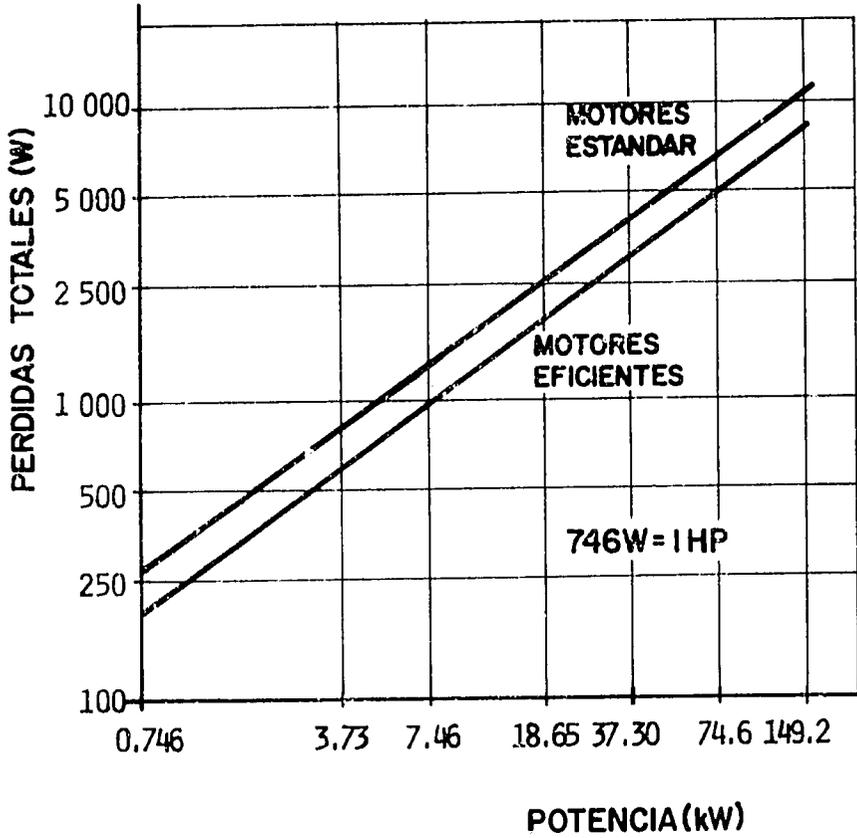


FIGURA 2.1: COMPARACION DE LAS PERDIDAS EN WATTS DE MOTORES ESTANDAR CON MOTORES EFICIENTES

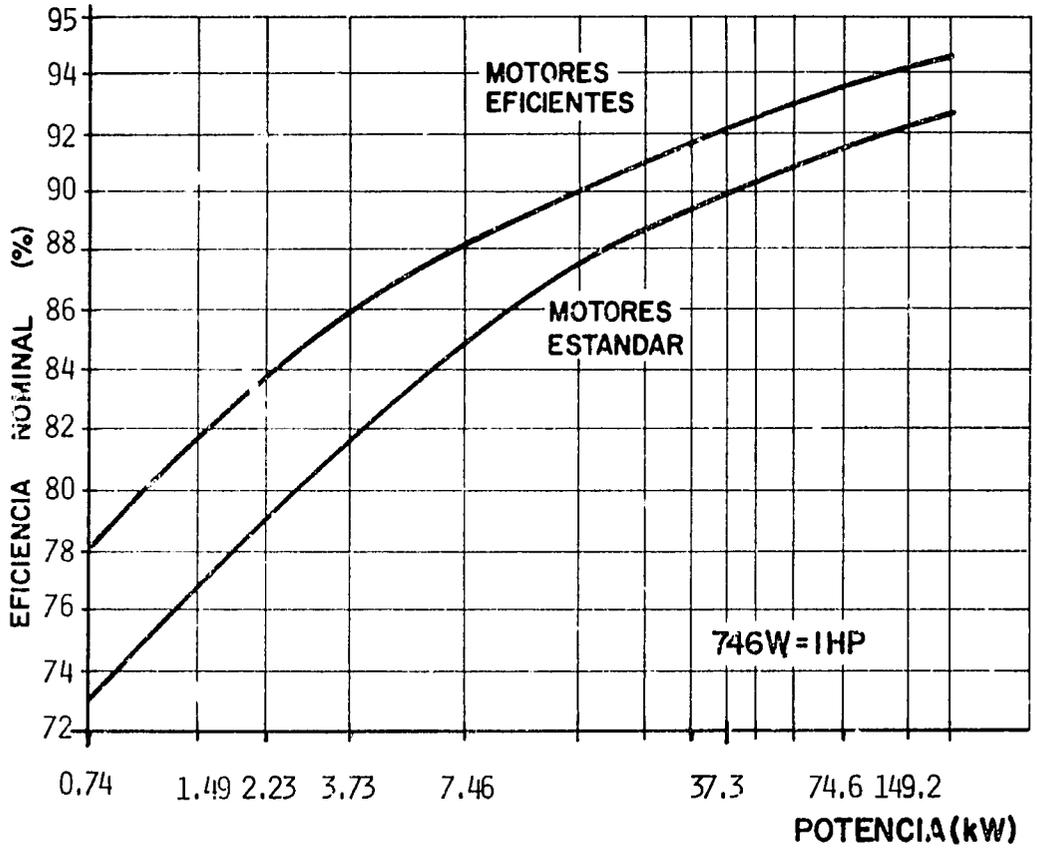


FIGURA 2.2 : COMPARACION DE EFICIENCIAS ENTRE MOTORES EFICIENTES Y MOTORES ESTANDAR

pero:

ENERGIA MECANICA EN EL EJE = ENERGIA ELECTRICA ALIMENTADA - PERDIDAS

o sea:

ENERGIA ELECTRICA ALIMENTADA = ENERGIA MECANICA EN EL EJE + PERDIDAS

2.3 ¿COMO SE DETERMINA EL RENDIMIENTO?

El rendimiento se define como la relación entre la potencia de salida y la potencia de entrada, expresada en porcentaje; es decir:

$$E = \frac{W \text{ salida} \times 100\%}{W \text{ entrada}}$$

ésta puede expresarse también como la relación:

$$E = \frac{W \text{ salida} \times 100\%}{W \text{ salida} + W \text{ pérdida}}$$

2.4 PERDIDAS EN UN MOTOR DE INDUCCION

Las pérdidas en un motor trifásico se componen de las siguientes pérdidas.

2.4.1 Pérdidas de Joule

Son las pérdidas por disipación de calor causadas por el paso de la corriente a través de los devanados del estator ($I_1^2 \times R_1$) y los devanados del rotor ($I_2^2 \times R_2$).

2.4.2 Pérdidas en el hierro

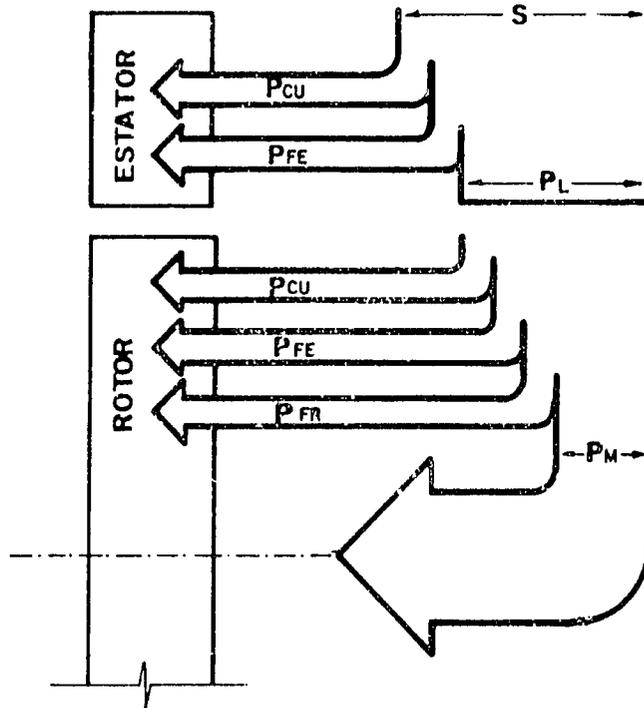
Son pérdidas por corrientes parásitas o de Foucault y pérdidas por magnetización (pérdidas por histéresis). Estas pérdidas son proporcionales al flujo magnético y a la frecuencia del estator. Este flujo y esta frecuencia son invariables con la carga aplicada, es decir, las pérdidas en el hierro del estator son independientes de la carga, y constantes. Las pérdidas en el hierro del rotor son despreciables, ya que la frecuencia en el rotor a carga nominal es solamente un pequeño porcentaje de la frecuencia de la red.

2.4.3 Pérdidas por fricción

Compuestas por las pérdidas por fricción de los cojinetes o rodamientos y las pérdidas por fricción de ventilación.

"La rentabilidad de un motor depende del total de sus pérdidas".

A continuación presentamos el flujograma de la distribución o balance de potencias en un motor de inducción.



S	POTENCIA ELECTRICA APLICADA	EN kVA
P_L	POTENCIA EN EL ENTRE HIERRO	EN kW
P_m	POTENCIA MECANICA EN EL EJE	EN kW
P_{cu}	PERDIDAS DE JOULE $I^2 R$	EN kW
P_{FE}	PERDIDAS EN EL HIERRO	EN kW
P_{FR}	PERDIDAS POR FRICCION	EN kW

FIGURA 2.3: FLUJOGRAMA DE POTENCIAS

2.5 RESUMEN DE DISTRIBUCION DE PERDIDAS

Las pérdidas discutidas son, hasta cierto punto, independientes entre sí. Entre más se intenta optimizar el rendimiento de un motor, tanto más nos damos cuenta de que unas de ellas se entrelazan dependientemente. El diseño final de un motor de alto rendimiento es un compromiso entre el alto rendimiento y otros criterios como par de arranque, corriente de arranque, par máximo y factor de potencia.

Para motores del tipo B, una distribución promedio aceptable de las pérdidas es:

-	Pérdidas de potencia en el estator $I_1^2 \times R_1$:	37 %
-	Pérdidas de potencia en el rotor $I_2^2 \times R_2$:	18 %
-	Pérdidas magnéticas:	20 %
-	Pérdidas por fricción:	9 %
-	Pérdidas diversas bajo carga:	16 %

2.6 METODOS DE DETERMINACION DE LA EFICIENCIA

- Método del freno,
- Método del dinamómetro,
- Método de máquinas duplicadas,
- Método de medición en la entrada y
- Método por cálculo del circuito equivalente

Los tres primeros métodos son métodos por medición directa.

2.6.1 Comparación de rendimientos determinados por métodos diferentes

Como un resultado de la medición del rendimiento de un motor trifásico por los métodos preferidos, en las diferentes publicaciones, se obtiene la tabla de la Figura 2.4.

Figura 2.4

Comparación de eficiencias

<u>kw</u>	<u>JEC-37</u> <u>Diagrama</u> <u>circular</u>	<u>IEC 34-2</u> <u>Suma de</u> <u>pérdidas</u>	<u>IEEE 112</u> <u>Método del</u> <u>dinamómetro</u>
3.73	88.8	88.3	86.2
7.46	89.7	89.2	86.9
15.0	91.9	91.4	90.4
56.0	93.1	92.7	90.0

Al analizar los datos anteriores, se observa que los rendimientos determinados con los métodos según IEC y JEC son mayores a los determinados según el método del IEEE. La mayor razón de esta diferencia obedece a cómo se tomaron en cuenta las pérdidas diversas bajo carga. El método del IEEE considera estas pérdidas directamente en sus mediciones en la salida y en la entrada, mientras que el método IEC toma estas pérdidas como un 0.5 por ciento de la potencia de entrada y el método JEC las considera nulas (cero).

Esta comparación nos muestra qué importante es para el técnico conocer cuál fue el método empleado para la determinación del rendimiento ofrecido por los fabricantes.

Además de las variaciones observadas, se pueden filtrar errores como el factor humano y la inexactitud de los equipos de medición.

2.7 ASPECTOS ECONOMICOS DE MOTORES EFICIENTES

El método para determinar la factibilidad económica de un motor eléctrico o sistema eficiente puede ser hecho por un simple cálculo del período de recuperación. Los requerimientos para este cálculo son:

- Eficiencia del motor o sistema,
- Horas de operación por año,
- Costo de la energía,
- Carga del motor o sistema.

2.7.1 Ciclo de vida

Para los métodos de análisis basados en el ciclo de vida la pregunta es, ¿Qué es el ciclo de vida? Este puede ser definido por varios criterios:

- vida operacional del motor eléctrico,
- vida operacional del equipo accionado por el motor,
- vida operacional del proceso.

La vida operacional o vida prevista del manejo del equipo o proceso es de 5 a 10 años. Si la vida prevista es mayor de 10 años, entonces se necesita una base para determinar la vida de un motor.

Aún no ha sido establecido un método estándar para determinar el ciclo de vida de un motor debido a la diversidad de factores que influyen en este proceso. La tabla de la figura 2.5 indica el ciclo de vida promedio de motores trifásicos, basado en un estudio realizado por el Departamento de Energía de los Estados Unidos, el cual, con pequeños ajustes, puede ser empleado para determinar la vida de motores eléctricos aún trabajando en condiciones adversas.

FIGURA 2.5
Vida Promedio de los motores eléctricos

<u>kW</u>	<u>Vida Promedio (años)</u>	<u>Intervalo de vida (años)</u>
menos de 0.746	12.9	10 - 15
0.746 - 3.73	17.1	13 - 19
3.80 - 15.0	19.4	16 - 20
15.6 - 37.3	21.8	18 - 26
38.0 - 93.25	28.5	24 - 33
más de 93.25	29.3	25 - 38

Promedio de todas las unidades 13.27 años.

El factor de mayor influencia en el ciclo de vida de un motor eléctrico es la vida del material aislante.

Los factores que influyen en la vida del aislamiento y, por lo tanto, en el ciclo de vida de un motor son los siguientes:

- carga relativa,
- horas de operación por año,
- condiciones ambientales:
 - . humedad relativa
 - . suciedad
 - . contaminación
- estabilidad del voltaje.

La influencia de estos factores en la vida y en las fallas de los motores se muestran en la tabla de la figura 2.6.

Figura 2.6
Análisis de fallas

<u>CAUSA DE LA FALLA</u>	<u>%</u>
Sobrecarga (sobrecalentamiento)	25
Normal deterioro del aislante	5
Fase interrumpida	10
Cojinetes	12
Contaminación:	
Humedad	17
Aceite y grasa	20
Suciedad	6
Misceláneos	5

Basado en un estudio de 4 000 fallas

2.7.2 Ahorros directos y pérdidas en recuperación

La reducción del costo anual de operación por comparación de un motor estándar con un motor más eficiente, ambos con la misma potencia de salida, se calcula como sigue:

$$\text{\$CA} = 0.746 \times \text{hp} \times P \times H \times \left(\frac{1}{E_1} - \frac{1}{E_2} \right)$$

en donde:

- \\$CA = ahorro anual en \\$CA/año
- hp = potencia de salida en hp
- P = costo de la energía en \\$CA/kWh
- H = horas de operación por año en h/año
- E_1, E_2 = eficiencias por comparar.

Consideremos el ejemplo de un motor de 30 hp que opera 4 000 h/año a costo de energía de \$CA 0.13/kWh. Calculemos el ahorro anual para un motor de alta eficiencia del 92.0% contra un motor estándar con una eficiencia del 88.0%.

$$\begin{aligned} \$CA &= 0.746 \times 30 \text{ hp} \times 0.13 \text{ \$CA/kWh} \times 4\,000 \text{ h/año} \times (1/0.88 - 1/0.92) \\ \$CA &= 575 \text{ \$CA/año.} \end{aligned}$$

El período de recuperación de un motor de alta eficiencia se calcula dividiendo la diferencia de precios (diferencia con el precio del estándar) entre el ahorro obtenido, cuando la decisión es la compra de alguno de ellos. Cuando se desea substituir un motor estándar ya existente por un motor de alta eficiencia, entonces se toma el costo total de éste.

Suponiendo el precio del motor de alta eficiencia en \$CA 1,500 y el precio del estándar en \$CA 1 100, el período de recuperación será de:

$$\frac{\$CA\ 1\ 500 - \$CA\ 1\ 100}{\$CA\ 575/\text{Año}} = 8 \text{ meses}$$

2.7.3 Evaluación del factor de eficiencia (FE)

En muchas industrias funcionan grandes grupos de motores el mismo número de horas por año con el mismo costo de energía. Para facilitar la comparación de varios motores bajo esas condiciones, se puede desarrollar un factor de eficiencia (FE) basado en el ciclo de vida, el costo de la energía y las horas de operación. Este FE se expresa en \$CA/kW:

$$FE_{kW} = P \times N \times H \quad \text{ó} \quad FE_{hp} = 0.746 P \times N \times H$$

en donde:

- P = Costo de la energía, en \$CA/kWh
- N = Número de años de operación, en años
- H = Horas de operación por año, en h/año

El FE puede ser establecido una vez para un grupo de motores. Sin embargo, el FE puede variar ampliamente con la variación de cualquier factor.

Cuando el FE ha sido establecido, el ahorro del Costo de Energía en el ciclo de vida (ACCV), se puede calcular de la siguiente manera:

$$\text{ACCV} = \text{FE}_{\text{hp}} \times \text{hp} (1/E_1 - 1/E_2)$$

Este valor es el ahorro total de energía proyectado, basado en el ciclo de vida y no es el ahorro anual. Esto provee un método de comparación de motores de diferentes eficiencias. Consideremos el anterior ejemplo:

¿Cuál es el ACCV comparativo de motores de 30 hp con eficiencias de 91, 92.5 y 94.5 % cuando se comparan con un motor estándar con una eficiencia del 88%, suponiendo 10 años de vida, 4 000 h/año de operación y 0.13 \$CA/kWh?

$$\text{FE}_{\text{hp}} = 0.746 \times 0.13 \text{ \$CA/kWh} \times 10 \text{ años} \times 4\,000 \text{ h/año}$$

$$\text{FE}_{\text{hp}} = 3879 \text{ \$CA/kW}$$

$$\text{ACCV} = 3879 \text{ \$CA/kW} \times 30 \text{ hp} \times (1/0.88 - 1/E_2)$$

para varias eficiencias:

<u>E (%)</u>	<u>ACCV (\$CA)</u>
91.0	4 359
92.5	6 433
94.5	9 096

Este método provee un ahorro directo del costo de energía durante el ciclo de vida para diferentes valores de la eficiencia.

2.8 EFECTO ECONOMICO DEL MANTENIMIENTO PREVENTIVO

En el mantenimiento preventivo de motores eléctricos deben de observarse las siguientes partes:

- cimentación
- elementos de fijación
- acoplamientos
- tolvas
- ventilación
- caja de conexiones
- arrancador
- cojinetes
- rotor
- estator

Cualquiera que sea el tipo de motor empleado, para lograr la máxima eficiencia de operación y una larga vida útil del motor, es esencial darle un adecuado mantenimiento. El porcentaje de pérdidas aumentará con respecto al porcentaje nominal, ya que las pérdidas pueden, en la realidad, ser mucho más grandes. Por ejemplo, una lubricación inadecuada puede aumentar la fricción en motores y en muchos tipos de transmisiones. Ya que la resistencia eléctrica de los conductores aumenta con la temperatura, las pérdidas por resistencia eléctrica ($I^2 \times R$) resultan ser las más altas en aquellos motores en los que la ventilación o el paso del aire de refrigeración están obstruidos. Periódicamente es necesario limpiar el motor y quitarle el polvo y las hilachas que haya en el bastidor para que el motor funcione tan fresco como sea posible. Ya que el aislante eléctrico se deteriora con altas temperaturas, se economizará energía y se aumentará también la vida útil del motor.

La selección apropiada del mantenimiento de las tracciones impulsadas por el motor es de tanta importancia como el mantenimiento mismo del motor.

El desalineamiento entre motor y tracción ocurre generalmente después de un desmontaje del motor o la tracción lo cual causa vibraciones del equipo. El desalineamiento con las tensiones elevadas de las correas causan daños severos en los cojinetes y una reducción de la eficiencia. Un programa de limpieza y de alineamiento del motor y de la tracción se paga por sí mismo gracias al aumento de la vida del motor y al ahorro en los costos de energía eléctrica.

A continuación encontramos una propuesta para un plan de mantenimiento y revisiones para motores eléctricos. El técnico en la planta podrá aumentar y adaptar el programa para cada motor o grupo de motores.

PLAN DE MANTENIMIENTO Y REVISIONES

REVISIONES			ACTIVIDAD	PARTE
1	2	3		
■	■	■	Revisar el cimientto por grietas o desniveles, alinear eje y controlar torsión del eje. Comparar con datos de revisiones anteriores.	Cimiento rotor cojinete
■	■	■	Controlar entrehierro y juego axial. Comparar con datos de revisiones anteriores.	Estator rotor
■		■	Controlar distancias entre partes giratorias y partes fijas.	Tolva
■	■	■	Revisar todos los fijamientos y pernos, reapretarlos.	Fijamientos
■		■	Revisar contrapesos de balanceo. Fijar pernos o cambiarlos.	Balanceo
■	■	■	Revisar fijamientos y reapretar pernos de los acoplamientos.	Acoplamientos
■		■	Revisar pernos. Fijar paquete de láminas del estator.	Estator
	■		Controlar pernos. Fijar polos.	Estator
■	■	■	Revisar cojinetes y su lubricación.	Cojinete
■	■	■	Revisar estado de entrada de ventilación y estado del filtro de aire.	Ventilación
■	■	■	Limpiar las bobinas y canales de ventilación	Estator

PLAN DE MANTENIMIENTO Y REVISIONES
(Continuación)

REVISIONES			ACTIVIDAD	PARTE
1	2	3		
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Limpiar las bobinas y anillos deslizantes o colector.	Rotor
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Revisar contactos de alimentación	Caja de Conexiones
	<input checked="" type="checkbox"/>		Controlar aislamientos y medir resistencias con el Megger	Rotor Estator Caja de conexiones
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Revisar y limpiar protecciones y arrancador del motor.	Interruptor arrancador

Figura 2.7

Eficiencias de motores estándares trifásicos de Inducción

<u>hp</u>	<u>Eficiencia nominal - Intervalos -</u>	<u>Eficiencia nominal Promedio</u>
1	68 - 78	73
1.5	68 - 80	75
2	72 - 81	77
3	74 - 83	80
5	78 - 85	82
7.5	80 - 87	84
10	81 - 88	85
15	83 - 89	86
20	84 - 89	87.5
25	85 - 90	88
30	86 - 90.5	88.5
40	87 - 91.5	89.5
50	88 - 92	90
60	88.5 - 92	90.5
75	89.5 - 92.5	91
100	90 - 93	91.5
125	90.5 - 93	92
150	91 - 93.5	92.5
200	91.5 - 94	93
250	91.5 - 94.5	93.5

746 W = 1 hp

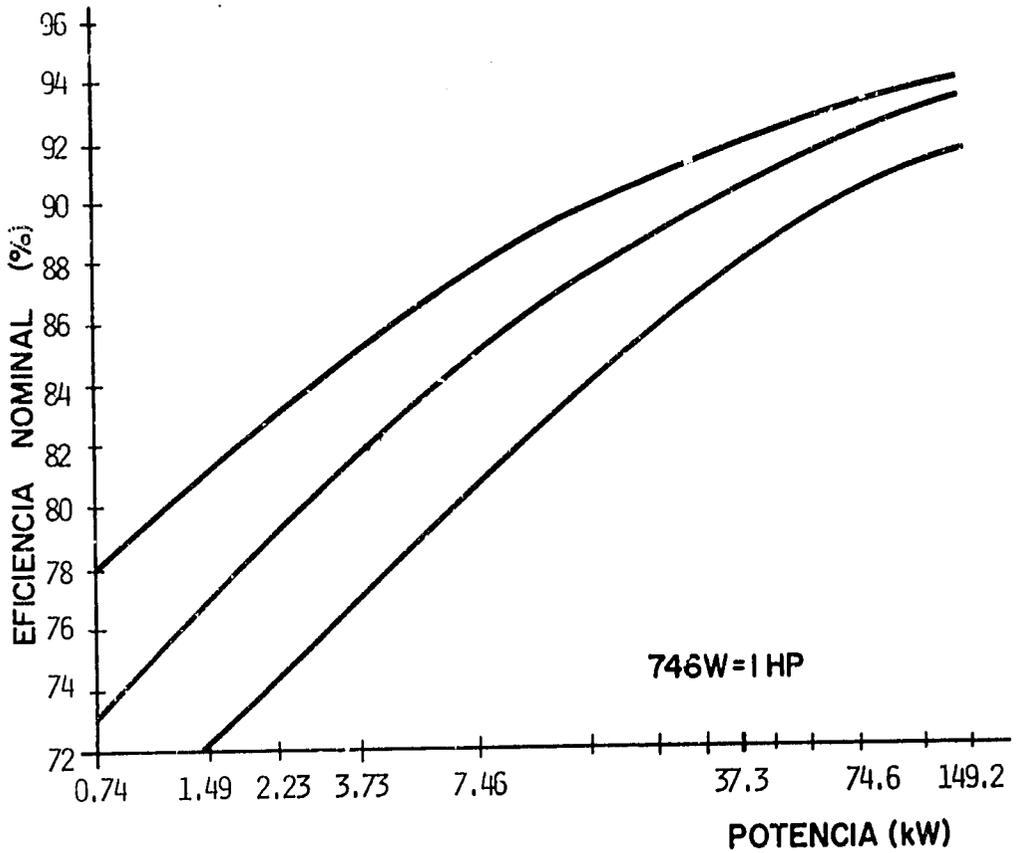


FIGURA 2.8: GAMAS DE EFICIENCIAS NOMINALES PARA MOTORES POLIFASICOS ESTANDAR DE TIRO B.

Figura 2.9

Eficiencias a carga plena para motores eficientes trifásicos de cuatro polos

<u>hp</u>	<u>Eficiencia nominal - Intervalos -</u>	<u>Eficiencia nominal Promedio</u>
1	80 - 84	83.0
1.5	81 - 84	83.0
2	81 - 84	83.0
3	83.5 - 88.5	86.0
5	85 - 88.5	87.0
7.5	86 - 90.5	88.0
10	87.5 - 90.5	89.0
15	89.5 - 91.5	90.0
20	90.0 - 93.0	90.5
25	91.0 - 93.0	91.5
30	91.0 - 93.0	92.0
40	91.5 - 93.0	92.5
50	91.5 - 94.0	93.0
60	91.0 - 94.0	93.0
75	92.0 - 95.0	93.5
100	93.0 - 95.0	94.0
125	93.0 - 95.0	94.0
150	93.0 - 96.0	94.5
200	94.0 - 95.0	94.5

746 W - 1 hp

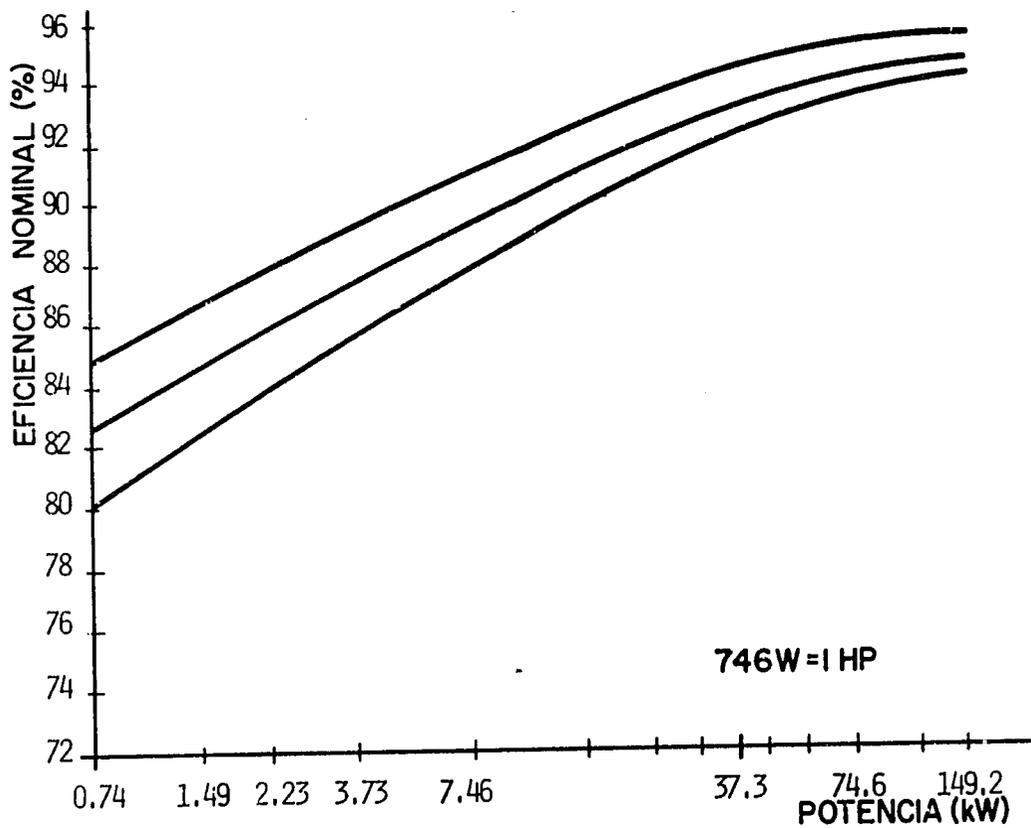


FIGURA 2.10 GAMAS DE LAS EFICIENCIAS,
Y EFICIENCIA PROMEDIO PARA MOTORES
EFICIENTES .

3. FACTOR DE POTENCIA, COMPENSACION Y CONTROL DE DEMANDA

3.1 FACTOR DE POTENCIA

Factor de potencia es el nombre dado a la relación entre la potencia activa (kW) usada en un sistema y la potencia aparente (kVA) que se obtiene de las líneas de alimentación, o dicho de otro modo, el coseno del ángulo formado por el desfase de la corriente con respecto al voltaje aplicado.

Todos los aparatos que contienen inductancia, tales como motores, transformadores y demás equipos con bobinas necesitan corriente reactiva para establecer campos magnéticos necesarios para su operación.

El desfase producido por la corriente reactiva se anula con el uso de capacitores de potencia, lo que hace que el funcionamiento del sistema sea más eficaz y, por lo tanto, requiera menos corriente en la línea. La Figura 3.1.A es de un motor de inducción sin ninguna compensación, y la 3.1.B, el mismo con el factor de potencia corregido.

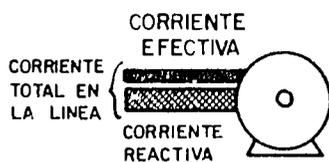


FIGURA 3.1A

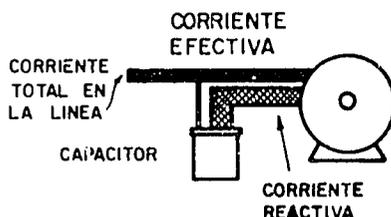
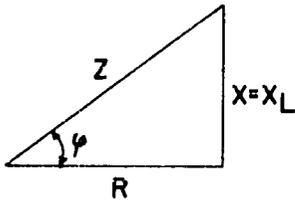


FIGURA 3.1B

3.1.1 Definiciones

Resistencia aparente, efectiva y reactiva

La resistencia aparente (o impedancia) de un circuito eléctrico resulta según la ley de Ohm de la tensión aplicada V y de la corriente I . En corriente alterna la impedancia Z consta de una parte real (efectiva) R y de una parte reactiva (reactancia) X .



$$Z = V/I$$

$$Z = (V/A) \quad \text{ohm } (\Omega)$$

FIGURA 3.1

La reactancia puede ser de dos tipos, inductiva X_L y capacitiva X_C . La reactancia inductiva está determinada por la inductancia del circuito, y se expresa como:

$$X_L = \omega L = 2\pi f L$$

donde:

ω = frecuencia angular

f = frecuencia en Hz (hertz)

L = inductancia en H (henry)

La reactancia inductiva tiene la característica de retrasar la corriente con respecto al voltaje, debido a que la inductancia es la propiedad eléctrica que se opone a cualquier cambio de corriente.

La reactancia capacitiva está determinada por la capacitancia del circuito, y se expresa como:

$$X_C = 1/\omega C = 1/2\pi f C$$

donde:

C = capacitancia en F (farad)

La reactancia capacitiva tiene la característica de adelantar la corriente con respecto al voltaje, debido a que la capacitancia es la propiedad eléctrica que permite almacenar energía por medio de un campo electrostático y de liberar esta energía posteriormente.

Entonces ya que el triángulo de las resistencias es un triángulo rectángulo, se puede calcular:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad \text{con } Z, R \text{ y } X \text{ en } \Omega$$

La suma de las reactancias en el circuito nos dará la reactancia real que predomine, o sea $X = X_L - X_C$, por lo tanto:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

o dicho de otro modo, hay cuatro formas de expresar el valor de la impedancia:

Binomial	$Z = x + jy$
Polar	$Z = r \angle \varphi$
Exponencial	$Z = re^{j\varphi}$
Trigonométrica	$Z = r (\cos \varphi + j \sin \varphi)$

Cualquiera de estas formas es lo mismo, y también se usan para corriente y potencia.

3.1.2 Secuencia de fase entre corriente y voltaje

El tipo de carga eléctrica determina en un circuito la impedancia y la posición de la corriente respecto a la tensión.

Tres casos pueden ser posibles:

- Solamente resistencias efectivas R , como por ejemplo, bombillas incandescentes. En este caso $X = 0$ y $Z = R$, es decir, la corriente y el voltaje tienen el mismo recorrido, o están en fase.
- Predomina la reactancia inductiva X_L . La corriente corre retrsada con el voltaje a un ángulo φ , debido por ejemplo a transformadores, motores y bobinas reactivas en el circuito.
- Predomina la reactancia capacitiva X_C . La corriente corre adelantada con el voltaje a un ángulo φ , debido por ejemplo, a condensadores.

En la figura 3.2 se muestran los tres casos.

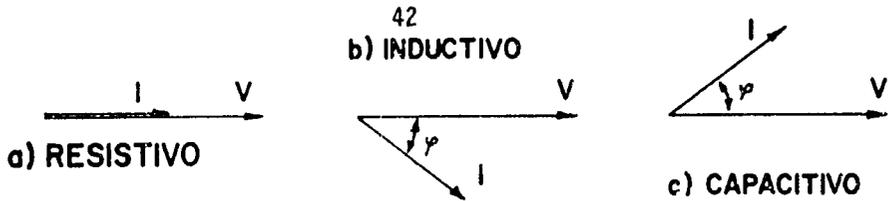


FIGURA 3.2

3.1.3 División de una corriente alterna desfasada en sus componentes

La corriente desfasada total que circula en un circuito se puede dividir en corriente real I_R y corriente reactiva I_X . Esta división es equivalente a la conexión en paralelo de una resistencia efectiva R con una reactancia inductiva X_L , como se muestra en la figura 3.3. La corriente efectiva está en fase con la tensión y la corriente reactiva tiene un desfase de 90° negativos con respecto a la tensión.

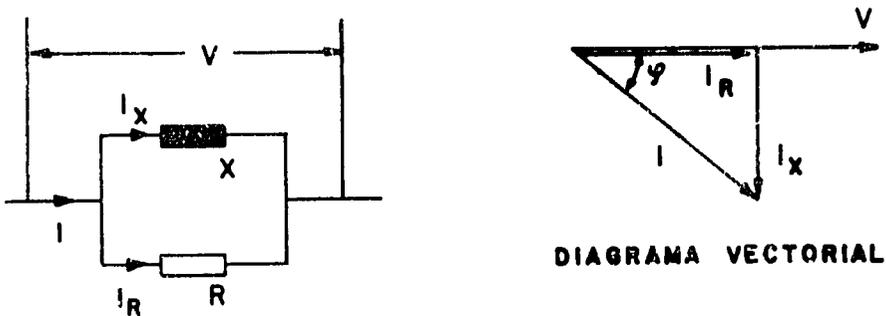


DIAGRAMA VECTORIAL

DIAGRAMA EQUIVALENTE

NOTA: =
 =

FIGURA 3.3

Calculando:

$$I = V/Z = \sqrt{I_R^2 + I_X^2}$$

donde:

$$I_R = V/R = I \cos \varphi \quad \text{é} \quad I_X = V/X = I \sin \varphi$$

I , I_R e I_X en amperios (A)

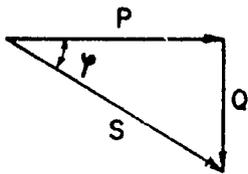
3.1.4 Potencia aparente, efectiva y reactiva

La potencia eléctrica es el producto de la tensión por la corriente correspondiente. Podemos diferenciar los tres tipos:

Potencia aparente	(kVA)	$S = V.I$
Potencia efectiva	(kW)	$P = V.I \cdot \cos \varphi = V.I_R$
Potencia reactiva	(kVAr)	$Q = V.I \cdot \sin \varphi = V.I_X$

La potencia efectiva P se obtiene de multiplicar la potencia aparente S por el " $\cos \varphi$ ", al cual se le denomina como "factor de potencia".

El ángulo φ formado en el triángulo de potencias por P y S equivale al desfase entre la corriente y la tensión, y es el mismo ángulo de la impedancia; por lo tanto el $\cos \varphi$ depende directamente del desfase. (ver figura 3.4).



FACTOR DE POTENCIA =

$$\cos \varphi = P / S$$

FIGURA 3.4 TRIANGULO DE POTENCIAS

Por lo anterior, en la técnica de la energía eléctrica se utiliza el factor de potencia para expresar un desfase que sería negativo cuando la carga sea inductiva, o positivo cuando la carga es capacitiva.

Para el factor de potencia los valores están comprendidos desde 0 hasta 1, según se indica en la figura 3.5.

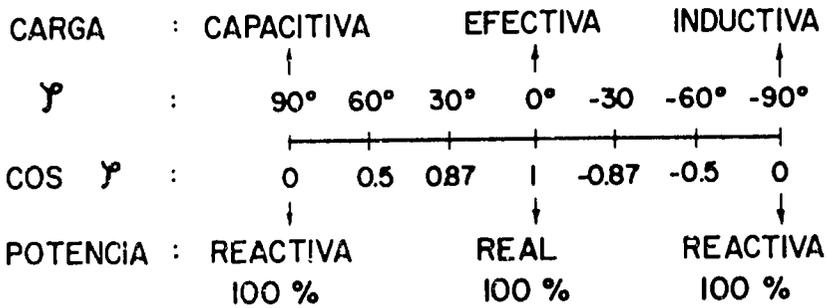


FIGURA 3.5: COMPARACION DEL FACTOR DE POTENCIA

3.2 EFECTOS DE UN BAJO FACTOR DE POTENCIA

Un bajo factor de potencia indica una mala eficiencia eléctrica, lo cual siempre es costoso, ya que el consumo de potencia activa es menor que el producto $V \cdot I$ (potencia aparente).

Veamos algunos efectos de un bajo factor de potencia:

I) Un bajo factor de potencia aumenta a la compañía de energía eléctrica el costo de suministrar la potencia activa, porque tiene que ser transmitida más corriente, y este costo más alto se le cobra directamente al consumidor industrial por medio de cláusulas del factor de potencia incluidas en las tarifas.

II) Un bajo factor de potencia también causa sobrecarga en los generadores, transformadores y líneas de distribución dentro de la misma planta industrial; caídas de voltaje y pérdidas de potencia se tornan mayores de los que deberían ser. Todo esto representa pérdidas y desgaste en equipo industrial.

a) Generadores: La capacidad nominal de generadores se expresa normalmente en kVA. Entonces, si un generador tiene que proporcionar la corriente reactiva requerida por aparatos de inducción, su capacidad productiva se ve grandemente reducida. Una reducción en el factor de potencia de 100% a 80% causa una reducción en los kW de salida de hasta un 27%.

b) Transformadores: La capacidad nominal de transformadores también se expresa en kVA, en forma similar a la empleada con generadores. De esta manera, a un factor de potencia de 60%, los kW de potencia disponible son de un 60% de la capacidad de placa del transformador. Además, el % de regulación aumenta en más del doble entre un factor de potencia de 90% y uno de 60%. Por ejemplo: un transformador que tiene una regulación del 2% a un factor de potencia de 90% puede aumentarla al 5% a un factor de potencia del 60%.

c) Líneas de transmisión y alimentadores: En una línea de transmisión, o alimentador, a un factor de potencia de 60%, únicamente un 60% de la corriente total produce potencia productiva. Las pérdidas son evidentes, ya que a un factor de potencia de 90%, un 90% de la corriente es aprovechable, y a un factor de potencia de 100% toda es aprovechable.

3.2.1 Ventajas de la corrección del factor de potencia

De manera invertida, lo que no produce un efecto adverso produce una ventaja; por lo tanto, el corregir el factor de potencia a niveles más altos, nos da como consecuencia:

a) Un menor costo de la energía eléctrica.

Al mejorar nuestro factor de potencia, ya no tenemos que pagar penalizaciones por mantener un bajo factor de potencia.

b) Aumento en la capacidad del sistema.

Al mejorar el factor de potencia, se reduce la cantidad de corriente reactiva que inicialmente pasaba a través de transformadores, alimentadores, tableros y cables.

c) Mejora en la calidad del voltaje.

Un bajo factor de potencia puede reducir el voltaje de la planta, cuando se toma corriente reactiva de las líneas de alimentación. Cuando el fac-

tor de potencia se reduce, la corriente total de la línea aumenta, debido a la mayor corriente reactiva que circula, causando mayor caída de voltaje a través de la resistencia de la línea, la cual, a su vez, aumenta con la temperatura. Esto se debe a que la caída de voltaje en una línea es igual a la corriente que pasa por la misma multiplicada por la resistencia en la línea. A mayor corriente, mayor caída de voltaje.

d) Reducción en las pérdidas de potencia.

Un bajo factor de potencia también causa pérdidas de potencia en las líneas de distribución. La corriente de alimentación, a un bajo factor de potencia, es alta debido a la presencia de la corriente reactiva. Cualquier reducción en la misma da como resultado menores pérdidas de kW en la línea.

3.3 COMPENSACION

3.3.1 Significado de la compensación en redes de alimentación

Los transformadores, motores, etc. son consumidores inductivos. Para la formación de su campo magnético estos toman potencia inductiva o reactiva de la red de alimentación. Esto significa para las plantas generadoras de energía eléctrica una carga especial, que aumenta cuanto más grande es y cuanto mayor es el desfase. Esta es la causa por la cual se pide a los consumidores o usuarios mantener un factor de potencia mínimo $\cos \varphi = 0.90$. Los usuarios con una alta demanda de potencia reactiva son equipados con contadores de potencia reactiva (vatiómetro o vatímetro de potencia desvatada).

La demanda de potencia reactiva se puede reducir sencillamente colocando condensadores en paralelo a los consumidores de potencia inductiva Q_L . Dependiendo de la potencia reactiva capacitiva Q_C de los condensadores se anula total o parcialmente la potencia reactiva inductiva tomada de la red. A este proceso se le denomina compensación.

Después de una compensación la red suministra solamente (casi) potencia real. La corriente en los conductores se reduce, por lo que se reducen las pérdidas en éstos. Así se ahorran los costos por consumo de potencia reactiva facturada por las centrales eléctricas.

Con la compensación se reducen la potencia reactiva y la intensidad de la corriente, quedando la potencia real constante, es decir, se mejora el factor de potencia.

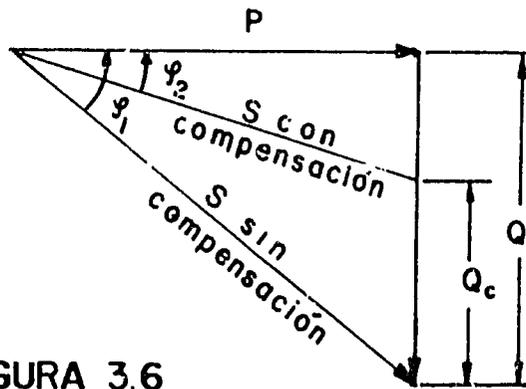


FIGURA 3.6

3.3.2 Potencia reactiva del condensador, corriente del condensador

Según la ley de Ohm la corriente consumida por un condensador es:

$$I_c = V/X_c$$

con:

$$X_c = \frac{1}{\omega C} \longrightarrow I_c = V \cdot \omega \cdot C$$

Anteriormente definimos que, $Q = V \cdot I_x$

En lugar de I_x ponemos nosotros $Q = V \cdot I_c = V \cdot V \cdot \omega \cdot C$, es decir, la potencia reactiva de un condensador es:

$$Q = V^2 \cdot \omega \cdot C \quad \text{en donde:} \quad \frac{Q}{VA_r} \left| \frac{V}{V} \right| \frac{\omega}{1/S} \left| \frac{C}{F} \right|$$

Esta ecuación es válida tanto para corriente alterna monofásica como para corriente alterna trifásica, es decir, para condensadores monofásicos y condensadores trifásicos (o su conexión). Para condensadores conectados en delta o triángulo es, por ejemplo, válida para

* V la tensión entre conductores exteriores (tensión concatenada), es decir, la tensión nominal del condensador.

* C la capacitancia total del condensador, es decir, la suma de las tres capacitancias.

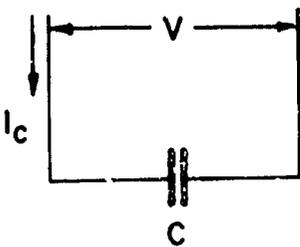
De $Q = V.I$ se calcula la corriente del condensador I_C como:

$$I_C = \frac{Q}{V} \quad \text{para corriente monofásica}$$

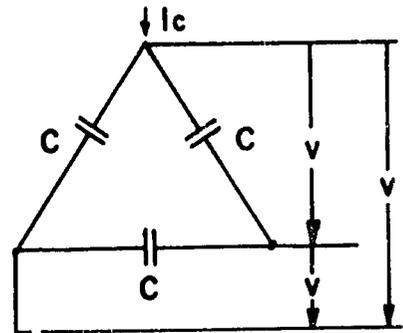
$$I_C = \frac{Q}{\sqrt{3}V} \quad \text{para corriente trifásica}$$

I_C en A.

I_C	Q	V
A	kVAr	V



CONDENSADOR MONOFASICO



**CONDENSADOR TRIFASICO
(CONEXION EN DELTA)**

FIGURA 3.7

3.3.3 Tipos de compensación

Las inductancias se compensan con la conexión en paralelo de capacitancias: conocida como compensación en paralelo. Esta forma de compensación es la más usual, especialmente en sistemas trifásicos.

Los tres tipos de compensación más usados son:

1. Compensación individual: A cada consumidor inductivo se le asigna el condensador necesario. Este tipo es empleado ante todo para compensar consumidores grandes de trabajo continuo.
2. Compensación en grupos: Los grupos se conforman de varios consumidores de igual potencia e igual tiempo de trabajo y se compensan por medio de un condensador común. Este tipo de compensación es empleado, por ejemplo, para compensar un grupo de lámparas fluorescentes.
3. Compensación central: La potencia reactiva inductiva de varios consumidores de diferentes potencias y diferentes tiempos de trabajo es compensada por medio de un banco de condensadores. Una regulación automática compensa según las exigencias del momento.

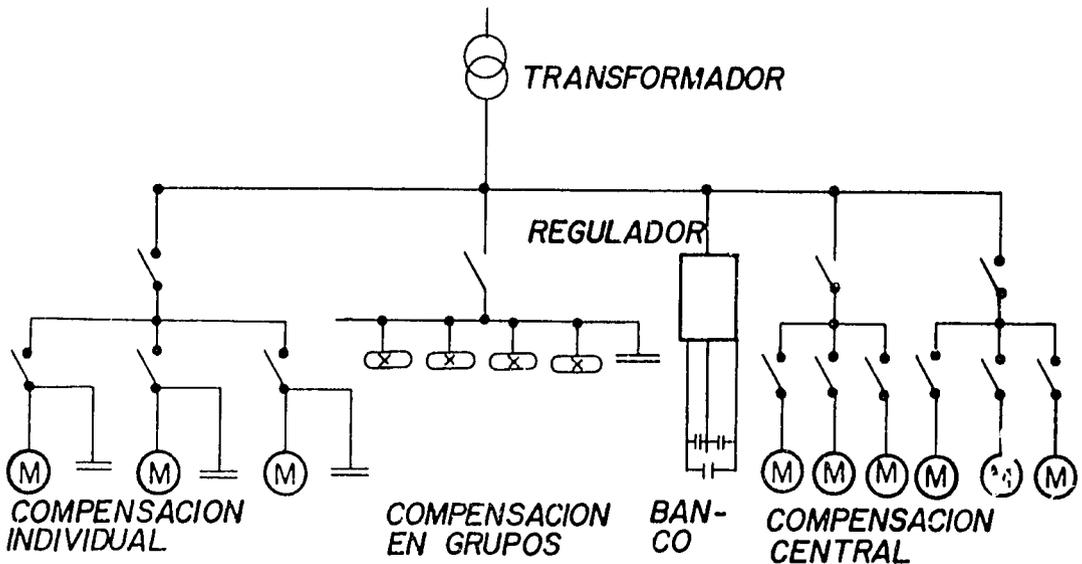


FIGURA 3.8

3.3.4 Compensación individual

La compensación individual es el tipo de compensación más efectivo. El condensador se puede instalar junto al consumidor, de manera que la potencia reactiva fluye solamente en los conductores cortos entre consumidor y condensador.

El diagrama muestra la compensación individual de un transformador.

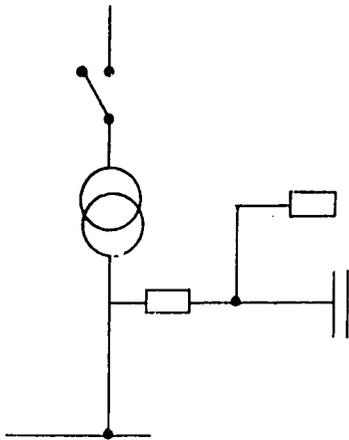


FIGURA 3.9

Con la compensación individual es posible en muchos casos influir negativamente en el comportamiento del aparato por compensar. La potencia reactiva capacitiva del condensador no tiene que ser excedida, pues caeríamos en una "sobrecompensación"; por ejemplo, podemos causar una elevación de la tensión con resultados dañinos. Por esto es necesario que el condensador cubra solamente la potencia reactiva inductiva demandada por el consumidor cuando esté funcionando sin carga alguna, es decir, al vacío.

3.3.5 Compensación individual de los transformadores

Para la compensación individual de la potencia inductiva de los transformadores de distribución, se recomiendan como guía los valores dados en la tabla siguiente. A la potencia nominal de cada transformador se le ha asignado la correspondiente potencia del condensador necesario, el cual es instalado en el secundario del transformador.

Figura 3.10

Potencia nominal del transformador en KVA	Potencia reactiva del condensador en KVAr
100	4
160	6
250	15
400	25
630	40
1 000	60
1 600	100

3.3.6 Compensación individual de motores

Para compensar un motor trifásico es necesario probar primeramente si el motor es arrancado directamente o si es arrancado por medio de un dispositivo arrancador estrella-delta.

Para un arranque directo, por ejemplo, por medio de un arrancador electromagnético, la compensación individual es sencilla. El condensador se conecta directamente a los terminales A, B y C del motor, sin necesidad de más dispositivos. La potencia reactiva capacitiva necesaria para cada motor está dada en la tabla siguiente.

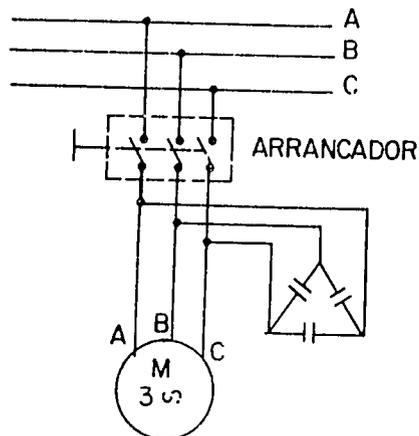


FIGURA 3.11

Figura 3.12

Potencia nominal del motor KW	Potencia reactiva del condensador en KVA
4	2
5.5	2
7.5	3
11	3
15	4
18.5	7.5
22	7.5
30	10
más de 30	más o menos el 35% de la potencia nominal del motor

3.3.7 Protección para motores trifásicos compensados

Los arrancadores electromagnéticos son también apropiados para proteger los motores trifásicos.

Cuando ocurre un cortocircuito en el circuito eléctrico del motor, el protector rápido de sobreintensidad abre el interruptor cuando la corriente alcanza un valor de 10 veces el valor nominal.

El bimetálico protege al motor contra sobrecargas, siempre que éste esté correctamente ajustado. Para esto hay que tener en cuenta que:

- Sin compensación y cuando funciona con carga nominal, el motor toma la corriente total que suministra la red. Esta corriente total pasa a través del bimetálico del interruptor. Si el bimetálico está calibrado para esa corriente nominal, éste abre el interruptor después del tiempo estipulado por el fabricante.
- Con compensación individual el motor toma la misma corriente total de la red. Esta corriente total se compone de la suma

geométrica de I_R más I_X . La corriente reactiva es cubierta en su totalidad casi solamente por el condensador. La red necesita casi sólo suministrar corriente efectiva y solamente esta corriente atraviesa el bimetálico del arrancador. El disparador se ajustará a una corriente menor después de una compensación individual para garantizar su función de protección.

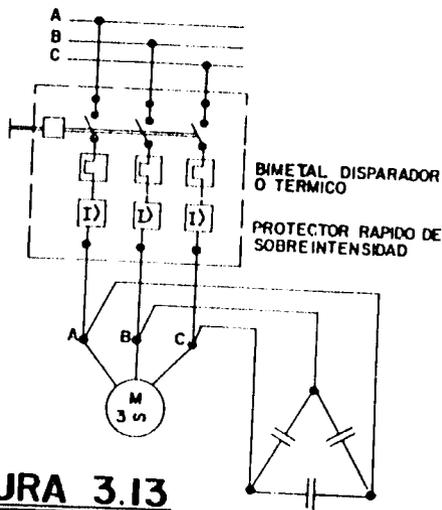


FIGURA 3.13

COMPOSICION
DE LA CORRIENTE
DESPUES DE LA
COMPENSACION

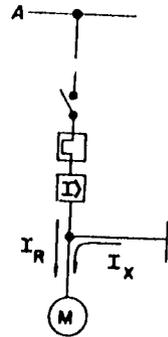


FIGURA 3.14

3.3.8 Precaución con autoexcitación

La compensación individual exige un cuidado especial, por ejemplo, al compensar tracciones que siguen girando largo tiempo después de haber desconectado el motor, como en el caso de ventiladores o sierras circulares. Si el condensador ha sido sobredimensionado, es posible que se origine una autoexcitación mientras el motor siga girando hasta pararse al final. Con esto el motor pasa a funcionar como generador. En los bornes del motor, se genera una tensión, que muchas veces puede ser mayor a la tensión de la red.

Para la compensación de estas tracciones, el condensador y su potencia reactiva Q no debe exceder el 90% de la potencia aparente al vacío del motor para evitar así la autoexcitación.

$$Q = 0,9 \cdot \frac{I_0 \cdot V_n \cdot \sqrt{3}}{1\ 000}$$

Q ... Potencia reactiva del condensador en kVAr
 I_0 .. Corriente de vacío del motor en A
 V_n .. Tensión entre dos líneas de una red trifásica en Volt.

Ejemplo: Potencia del motor $P = 45\text{ kW} = 60\text{ hp}$
 Tensión del motor $V_n = 230\text{ V}$
 Corriente de vacío $I_0 = 52\text{ A}$

Q para compensación individual = ?

$$Q = 0,9 \cdot \frac{52\text{A} \cdot 230\text{V} \cdot \sqrt{3}}{1\ 000} \text{ kVAr} = 18,6 \text{ kVAr}$$

3.3.9 Conexión estrella-delta de motores trifásicos compensados

Un arranque directo de motores trifásicos no siempre es posible por las altas corrientes de arranque (6... 8 I_n); para estos casos se utilizan motores con arranque estrella-delta.

Para motores compensados individualmente y arrancados manualmente con arrancador estrella-delta, hay que tener en cuenta:

- Los condensadores permitidos tienen que tener las seis salidas libres e independientes. La conexión debe hacerse como lo indica el diagrama siguiente, pues al conectar o conmutar se pueden originar fuertes corrientes compensatorias o sea tensiones elevadas considerables. Durante el arranque del motor es efectiva solamente 1/3 de la potencia reactiva del condensador, si la conexión es en estrella.

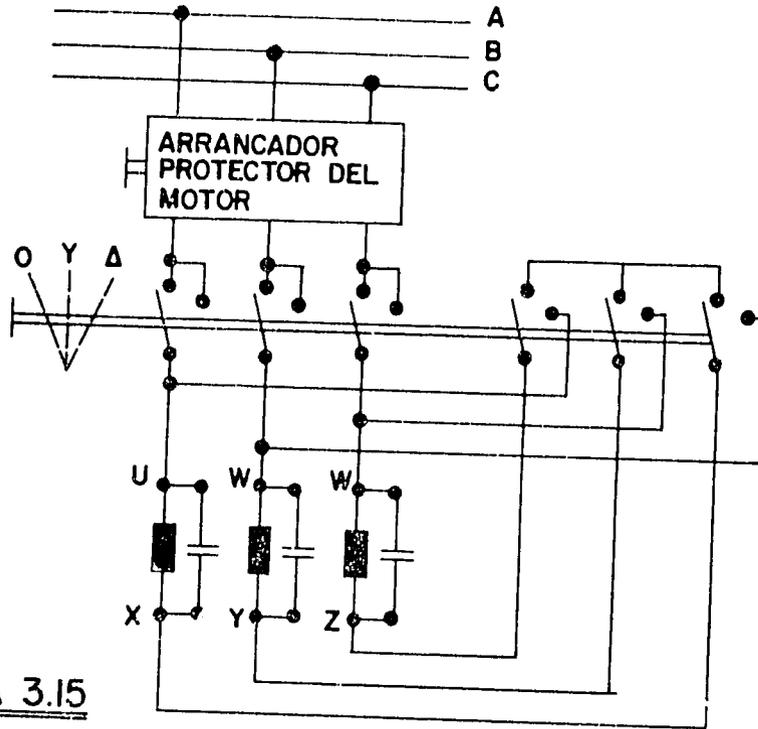


FIGURA 3.15

NOTA: Se recomiendan conectores estrella-delta manuales si los condensadores han sido instalados después y para motores de hasta 20 kW. En otros casos se recomienda montar arranadores compensados para motores trifásicos.

3.3.10 Compensación individual de lámparas fluorescentes

Las lámparas fluorescentes poseen un factor de potencia deficiente, debido al transformador o balastro empleado en cada una de ellas. Por lo anterior es siempre recomendable compensar la potencia reactiva.

Para una compensación individual se conecta a cada lámpara su condensador propio. La potencia reactiva del condensador necesaria se puede tomar de la tabla siguiente.

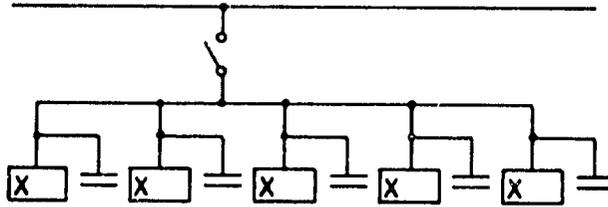
**FIGURA 3.16**

Figura 3.17

Lámpara Fluorescente		Potencia reactiva del condensador recomendada en VAR
Tensión alterna nominal (voltios)	Potencia nominal (vatios)	
110	20	30
220	10	30
	2 x 15*	55
	16	40
	20	80
	25	55
	40	70
	2 x 20*	70
	65	110

* dos lámparas fluorescentes conectadas en serie.

3.3.11 Compensación en grupo de lámparas fluorescentes

En sistemas con muchas lámparas fluorescentes compensadas en forma individual, sucede a menudo que los condensadores fallan. Esto se advierte cuando se recibe la factura en la que se cobra un consumo elevado de potencia reactiva.

La detección de condensadores dañados es muy lenta y costosa, por lo que se recomienda compensar grupos de lámparas fluorescentes con un solo condensador. Esto es compensación en grupo.

Para evitar una sobrecompensación es necesario conectar las lámparas y el condensador al mismo tiempo. La potencia reactiva necesaria para el condensador se obtiene de la suma de los valores según la tabla anterior.

Ejemplo: 10 lámparas fluorescentes de 20 W y 20 lámparas fluorescentes de 65 W, con 220 V necesitan ser compensados en grupo.

$$\begin{array}{r}
 10 \times 80 \text{ VAr} = 800 \text{ VAr} \\
 + 20 \times 110 \text{ VAr} = 2200 \text{ VAr} \\
 \hline
 \text{TOTAL} = 3000 \text{ VAr}
 \end{array}$$

Debe emplearse un condensador de 3 kVAr de potencia.

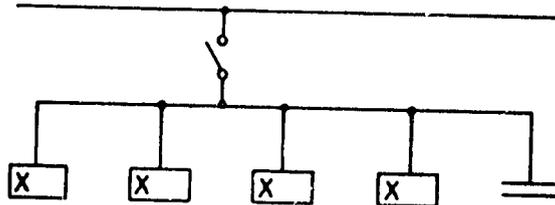


FIGURA 3.16

3.3.12 Compensación central en general

En sistemas con muchos consumidores de diferentes potencias y diferentes tiempos de trabajo, una compensación individual es muy costosa y una compensación en grupo es posible solamente en forma parcial. En este caso es más indicado una compensación central. Para una compensación central se instala un banco de condensadores, por ejemplo, en el lado de baja tensión de la subestación de distribución. La potencia reactiva necesaria es regulada automáticamente según la carga eléctrica del momento. De esta manera el factor de potencia es mantenido prácticamente constante.

El banco de baterías (condensadores) más el regulador se conoce como "sistema de regulación de potencia reactiva o desvatada"

3.3.13 Construcción de un sistema de regulación de potencia desvatada

Las principales partes del sistema son:

- condensadores (capacitores),
- el regulador de potencia reactiva el cual a través de un transformador de corriente detecta la falta o el sobrante de potencia reactiva y manda la conexión o desconexión de capacitores,
- protecciones para los condensadores o niveles de capacitores,
- fusibles para los condensadores o niveles de capacitores,
- el dispositivo para descargar los condensadores después de ser separados de la red.

3.3.14 Localización del transformador de corriente

En sistemas de regulación de potencia desvatada, el regulador comanda la conexión y desconexión de los condensadores. Para evitar un penduleo de conexiones y desconexiones frecuentes, el regulador tiene que ser insensible en un intervalo determinado.

A través de un transformador de corriente el regulador determina la acción por tomar. El transformador está conectado a una línea del sistema trifásico.

El transformador tiene que estar conectado entre transformador de potencia y regulador automático.

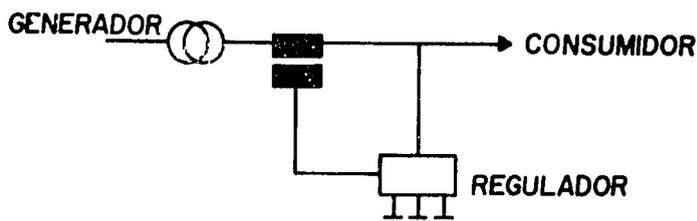


FIGURA 3.19

3.3.15 Capacitores de potencia

El uso de capacitores representa una positiva economía, tanto en su instalación como en su mantenimiento. Carecen de partes móviles que puedan deteriorarse o representar un riesgo para los empleados de la planta. También carecen de complicados motores de arranque o sistemas de ajuste.

La corrección del factor de potencia por medio de capacitores es en sí un método altamente flexible, ya que éstos se pueden instalar en cualquier lugar y en cualquier cantidad. Se obtienen en tamaño que se ajusta a cualquier motor y se pueden acondicionar en los puntos de la línea donde más se necesitan. No requieren de cimentación especial, ya que no tienen partes móviles que los hagan vibrar. Las pérdidas en los mismos son depreciables. Se pueden obtener tanto para instalaciones interiores como para uso a la intemperie y para cualquier nivel de voltaje. La vida del capacitor es larga, pero depende desde luego de las condiciones de operación tales como medio ambiente y estabilidad del voltaje de operación.

En un sistema de compensación pueden existir el capacitador individual, la batería de capacitores o un sistema automático de compensación.

3.3.16 Motores síncronos

Algunas veces se usan motores síncronos o sincrónicos en vez de motores de inducción por su habilidad en mantener un alto factor de potencia. Estos motores pueden llenar muchas de las funciones de los motores de inducción, y si se operan a baja carga, no necesitan equipo de compensación. Cuando operan con muy poca carga, o completamente en vacío, los motores síncronos compensan el bajo factor de potencia causado por otra clase de equipo conectado al mismo sistema.

Usualmente, para una instalación industrial, el costo del uso de un motor síncrono es muy alto, comparado con el costo de un motor de inducción con sus capacitores.

3.3.17 Controladores del factor de potencia (cfp)

El cfp es un dispositivo electrónico de estado sólido que reduce el desperdicio excesivo de energía en motores de inducción de CA, en los que el ángulo de desfase se determina por la carga en el motor. Mientras menor sea la carga, mayor será el ángulo y menor el factor de potencia.

El cfp detecta el ángulo de desfase y la conmutación electrónica en el dispositivo mantiene constante dicho ángulo, cualquiera que sea la carga del motor, reduciendo el voltaje al motor sin afectar apreciablemente la corriente del par motor.

Los cfp se utilizan con mayor eficacia (producen mayores ahorros) en motores con carga liviana, cargas del motor altamente intermitentes, o en aplicaciones de altas cargas inerciales (efecto de volante), en los que se necesita una gran cantidad de fuerza para arrancar y poca fuerza para mantenerla.

3.4 CONTROL DE DEMANDA

El control de demanda es un tema muy interesante, debido a que si controlamos los picos de demanda o conseguimos estabilizarla en un alto porcentaje, estaremos obteniendo como resultado un decremento en el costo de energía eléctrica.

3.4.1 Conceptos básicos

Si se analiza el consumo de energía eléctrica en una planta industrial, encontraremos que no es constante, sino que sufre generalmente fuertes variaciones. Si registramos durante el día el consumo de kW en función del tiempo, obtendremos un diagrama de potencia semejante al de la figura 3.20.

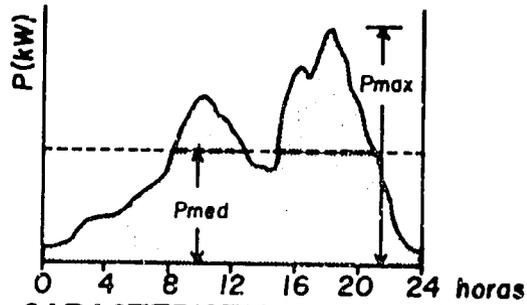


FIGURA 3.20. CARACTERÍSTICA DEL CONSUMO ELÉCTRICO DURANTE EL TIEMPO T_0

La máxima punta de potencia P_{max} (potencia pico) es muy superior a la carga media P_{med} . de la planta. La cantidad total de energía o trabajo eléctrico en kWh consumidos en el tiempo T_0 es A (kWh), igual a la medida de la superficie limitada por la curva de potencia.

La potencia media consumida será por consiguiente:

$$P_{med} = A/T_0$$

es decir, el número total de kWh consumidos dividido por el tiempo en horas.

Una medida para la clase de carga la constituye el llamado factor de carga F_c , el cual se deduce de la relación:

$$F_c = \frac{P_{med}}{P_{max}} = \frac{A}{P_{max} T_0}$$

y el cual nos indica cuán eficientemente se está aprovechando la energía eléctrica. Lógicamente una planta que labore las 24 horas tendrá un mejor factor de carga que otra que sólo lo haga un turno de trabajo, en un intervalo de tiempo de 24 horas.

3.4.2 Perfiles de demanda

En el punto anterior se dio una gráfica de consumo de energía para un tiempo T_0 igual a 24 horas. Esto forma lo que comúnmente le llamamos perfil de demanda, y en el cual se plasman todos los picos de potencia, desde una iluminación nocturna hasta su carga máxima en un tiempo T .

Con un registrador gráfico podemos recabar toda la información de puntos altos y bajos en una tira de papel, y luego formar nuestro perfil de demanda.

Véase en la figura 3.21, cómo normalizamos la demanda a puntos inferiores; con ello estamos contribuyendo a un menor costo de energía, debido a que los kW es un multiplicador en las tarifas eléctricas. La demanda ahorrada puede ser muy significativa.

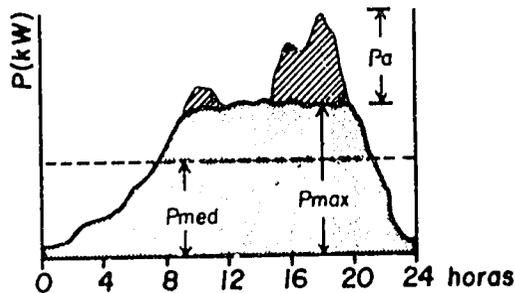


FIGURA 3.21. CARACTERÍSTICA DEL CONSUMO ELÉCTRICO DURANTE EL TIEMPO T_0 , CON UN CONTROL DE LA DEMANDA.

Como podemos observar, la potencia ahorrada P_a puede implicar un gran recargo en nuestra factura, todo depende de la magnitud de P_a . También podemos notar que baja la potencia media, pero subirá nuestro factor de carga, demostrándonos que estamos aprovechando mejor la energía eléctrica.

3.4.3 Métodos de control de demanda

Los métodos usuales para el control de demanda son: manuales de monitoreo, y de control automático. A continuación estableceremos los simples métodos manuales que nos ayudan a controlar la demanda máxima.

- a) Eliminación de cargas. Sistemas de bandas transportadoras, bombas o abanicos, a veces contribuyen grandemente a crear picos de carga. Estos elementos muchas veces trabajan ociosamente en tiempos críticos de mucha carga; por lo tanto es recomendable apagarlos, siempre y cuando pueda ser posible. La iluminación podría ser también reducida, ya que aunque no contribuye en alto grado, sí afecta.
- b) Reprogramar las cargas. Las cargas de baterías y otras operaciones similares no rutinarias pueden ser programadas en horas que no afecte las horas pico; por ejemplo, temprano en la mañana o tarde en la noche. Autoclaves y hornos a veces pueden trabajar fuera de turnos de trabajo.
- c) Interrumpir temporalmente las cargas. Los sistemas de ventilación y aire acondicionado pueden interrumpirse usualmente por varios minutos, sin causar pérdidas en el confort. La calefacción, aunque no tan usada, puede ser otro factor.
- d) Programación de arranque. Casi todos los motores en un proceso arrancan a un mismo tiempo y crean un gran pico de demanda, sobre todo en motores grandes de lento arranque. También se puede programar el ciclaje de motores o retardar el encendido de los mismos.

El método de control de demanda automático es muy eficaz, pero muy caro. Antes de hacer una rápida decisión, hay que plantearse los siguientes interrogantes:

- a) ¿Cuáles serán los ahorros potenciales que se lograrán con reducir la demanda?
- b) ¿Cuántos de esos ahorros pueden ser logrados simplemente con la cooperación del personal?
- c) ¿No sería más conveniente un sistema de alarma para un límite de carga de potencia?

d) ¿Se justificaría un sistema de control automático de demanda?

Existen varios tipos de controladores automáticos de demanda, los cuales son:

1) El controlador de demanda básica monitorea el consumo eléctrico durante el intervalo de tiempo establecido por la empresa eléctrica, detecta la demanda máxima y distribuye las cargas cuando la demanda máxima ha excedido el límite preestablecido, haciéndolo en forma instantánea. Al comienzo del próximo intervalo de tiempo todas las cargas son reestablecidas y el ciclo comienza otra vez. Este método requiere de mucha sincronización con el intervalo del medidor, y usualmente resulta en ciclajes rápidos de cargas. Este método reduce los picos de demanda, pero no ayuda grandemente en el sistema de demanda.

A continuación en la figura 3.22, una gráfica aproximada de la operación de este controlador.

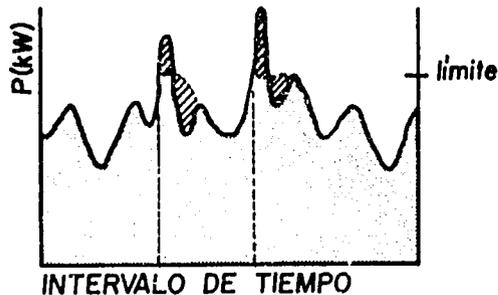


FIGURA 3.22. OPERACION DEL CONTROLADOR BASICO.(INSTANTANEO).

2) El controlador de régimen ideal de demanda opera a un régimen fijo preestablecido, y compara el consumo de energía actual durante un intervalo de tiempo dado con un régimen representativo de la demanda. Este método trabaja mejor si las cargas por distribuir son similares en tamaño. En la figura 3.23 se da la operación de este controlador.

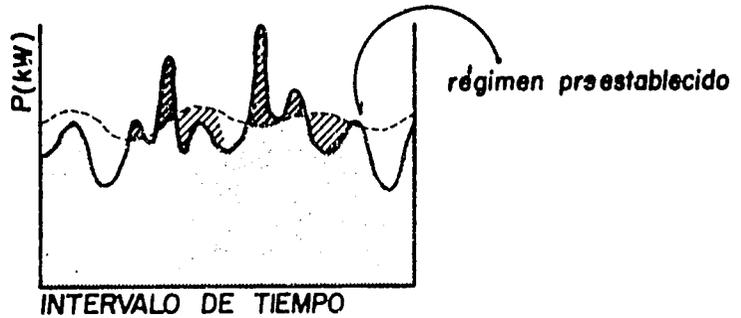
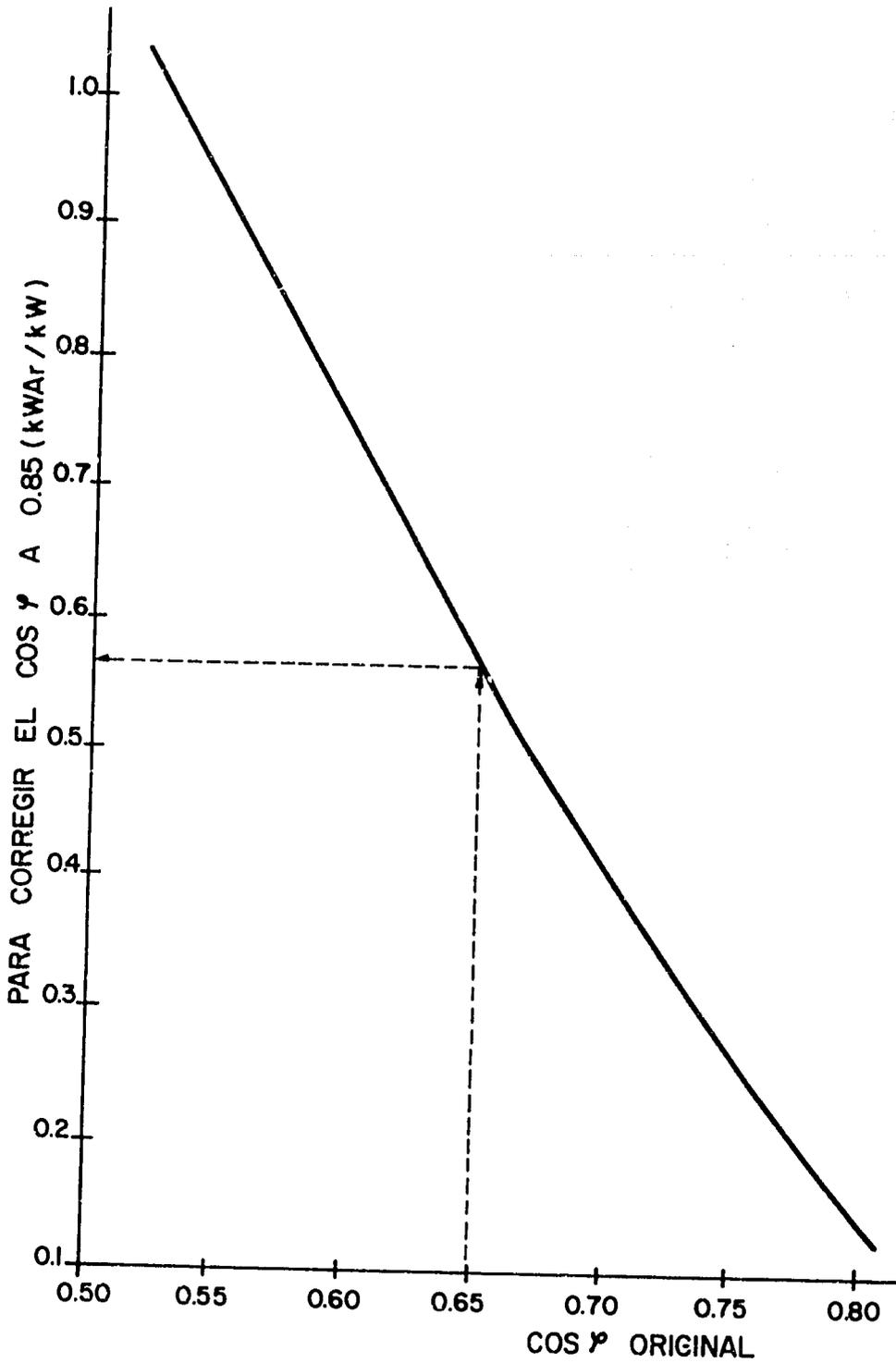


FIGURA 3.23. OPERACION DEL CONTROLADOR DE RÉGIMEN IDEAL DE DEMANDA

3) El controlador de intervalo flotante opera bajo régimen pronosticable en base a la información registrada en intervalos de tiempo anteriores, distribuyendo los pequeños picos que excedan el régimen preestablecido, pero cuando el consumo excede grandemente dicho régimen, volverá a formar un nuevo régimen para el siguiente intervalo de tiempo.

Un buen programa de la administración de la energía implica una gran inversión de tiempo y estudio antes de que pueda realizarse con éxito. Sin embargo, los beneficios y los gastos ahorrados pueden ser a menudo considerables.



CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

FIGURA 3.24

4. ILUMINACION

4.1 PRINCIPIOS DE ILUMINACION

Existen varios principios en iluminación que hay que conocer con antelación, para comprender los factores implicados en el buen diseño y optimización de la iluminación. Tales principios son los de radiación, visión, mediciones, color y propiedades ópticas de la materia.

4.1.1 Radiación

La radiación se define como una emisión o transmisión de energía en forma de ondas electromagnéticas o partículas.

Hasta el presente, los científicos emplean dos teorías para explicar la naturaleza y el comportamiento de la luz. Estas dos teorías son la electromagnética y la cuántica.

En la teoría electromagnética, la radiación puede considerarse como un tren de ondas electromagnéticas que se propaga en el vacío en línea recta, a una velocidad cercana a los 300,000 km/s. Para cualquier tipo de onda, la velocidad de propagación c es igual al producto de la longitud de onda λ y de la frecuencia f .

$$c = \lambda f$$

En la teoría cuántica, los cuantos de radiación, la energía se emite y absorbe en cuantos discretos (fotones). La magnitud de cada cuanto es hf , en que h es la constante de Planck (6.6256×10^{-34} J/s), y f la frecuencia de radiación electromagnética.

Para el fin que perseguimos, donde la radiación está en función de la longitud de onda, será suficiente limitarnos a la teoría electromagnética

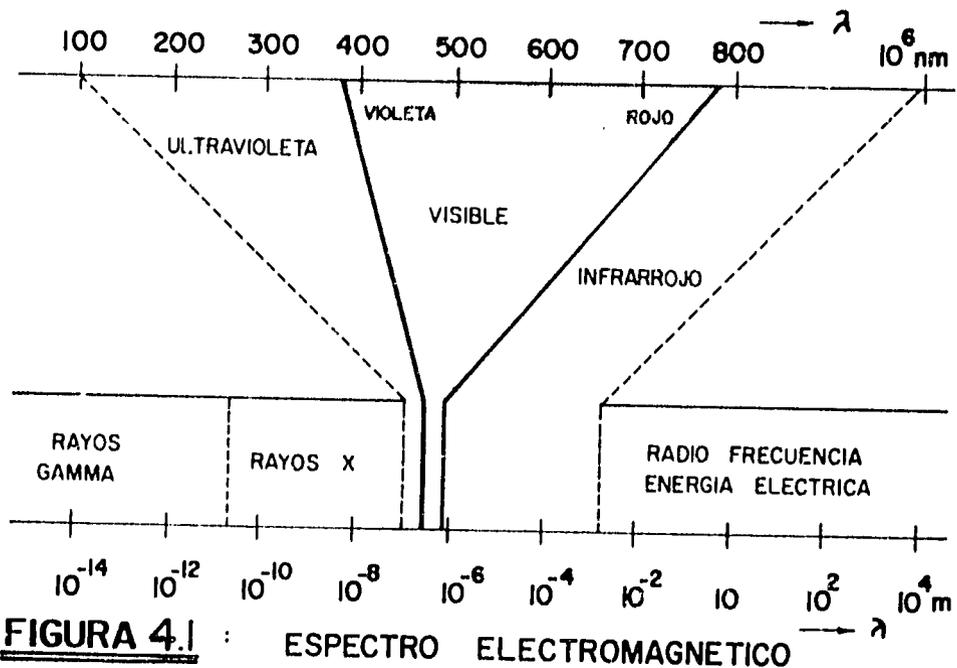
u ondulatoria de la luz.

4.1.1.1 Radiación visible

La luz puede definirse como la radiación capaz de producir directamente sensación visual. Las ondas luminosas ocupan una pequeña parte del espectro de ondas electromagnéticas. Los límites de la radiación visible son aún más pequeños, no están muy bien definidos, y varían según el individuo, donde el límite inferior está entre los 380 nm y 400 nm y el superior entre los 760 y 780 nm (ver figura 4.1).

El espectro visible puede dividirse en una serie de intervalos de longitud de ondas, según la impresión de color que producen en el ojo humano:

380 - 436 nm Violeta	566 - 589 nm Amarillo
436 - 495 nm Azul	589 - 627 nm Naranja
495 - 566 nm Verde	627 - 780 nm Rojo



4.1.1.2 Radiación ultravioleta

Los límites de la radiación ultravioleta están establecidos entre los 100 y 400 nm (aunque no bien definidos), y se dividen en tres bandas:

UV-A, de 315 a 400 nm

UV-B, de 280 a 315 nm

UV-C, de 100 a 280 nm

La radiación de UV-A atraviesa casi todos los tipos de vidrios y prácticamente no produce eritema alguno (enrojecimiento de la piel). La radiación en esta banda produce en ciertos materiales un fenómeno de luminiscencia, y origina reacciones fotoquímicas en otros. Se utiliza en numerosos procesos industriales.

La radiación de UV-B afecta la piel humana, causando eritema y pigmentación o bronceado de la misma. Forma en el cuerpo la vitamina D. Esta forma de radiación se utiliza principalmente en terapéutica.

La radiación UV-C tiene un fuerte efecto germicida. Puede producir el fenómeno de luminiscencia en ciertos materiales. Origina eritema y conjuntivitis. La radiación de longitud de onda menor de los 200 nm transforma el oxígeno en ozono.

4.1.1.3 Radiación infrarroja

Igual que en el caso de la radiación UV, los límites de la banda espectral de la radiación infrarroja no están bien definidos, pero se establecen normalmente entre los 780 nm y 1 nm.

Esta radiación es invisible al ojo humano, pero se puede percibir en forma de calor. Atraviesa el vacío y el aire puro sin pérdida

apreciable de energía. Solamente si la radiación choca con un objeto, es absorbida, y al ser absorbida, se convierte en calor.

4.1.2 Visión

El ojo contiene un lente que enfoca la imagen en una superficie sensible a la luz: la retina. Esta superficie está formada por una delicada capa de tejido nervioso en el que aparecen dos tipos de terminales, llamados conos y bastoncillos. La concentración de ambos no es uniforme; en el centro de la retina existe una pequeña depresión de aproximadamente 0.5 mm de diámetro (la fovea) que contiene sólo conos. Fuera de la fovea los conos y los bastoncillos están mezclados, reduciéndose paulatinamente la proporción de conos hacia la periferia.

El mecanismo del ojo es idéntico al de una cámara fotográfica: ambos trabajan de la misma manera (ver la figura 4.2).

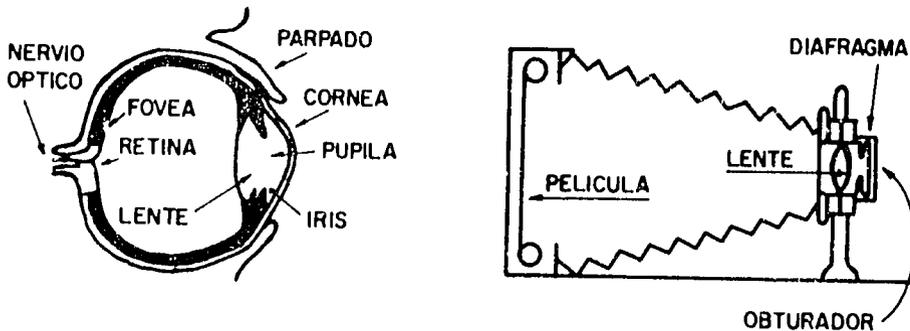


FIGURA 4.2: COMPARACION DEL OJO Y LA CAMARA FOTOGRAFICA

4.1.2.1 Visión central

Los conos de la fovea producen una imagen muy definida; aquí se alcanza la máxima resolución de que es capaz el ojo.

4.1.2.2 Visión periférica

La periferia de la retina, compuesta principalmente de bastones, no produce una visión nítida, sino que los objetos aparecen como siluetas borrosas. Esta zona, sin embargo, es muy sensible al movimiento y parpadeo.

4.1.2.3 Visión escotópica

Cuando el ojo está adaptado a niveles de luminancia inferiores a 0.05 cd/m^2 , la visión se denomina escotópica. En este caso, los bastones son los elementos activos principales y la detección periférica es, por tanto, aquí superior a la foveal. En la visión escotópica no hay sensación de color.

4.1.2.4 Visión fotópica

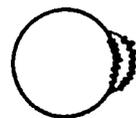
Si el ojo está adaptado a niveles de luminancia superiores a 3 cd/m^2 , la visión se llama fotópica. En este caso los conos son los elementos activos principales, y es posible una visión de colores normal.

4.1.2.5 Visión mesópica

Se denomina así a la visión correspondiente a niveles de luminancia intermedios a los establecidos antes. La capacidad disminuye para distinguir los colores con el nivel de iluminación, y debido al corrimiento de la curva de sensibilidad espectral relativa (figura 4.3), el ojo se hace más sensible a los colores correspondientes al extremo azul del espectro electromagnético visible.

4.1.2.6 Defectos de la visión

- a) **Astigmatismo.** Imperfección del ojo que causa una marcada diferencia de nitidez entre líneas que son perpendiculares.



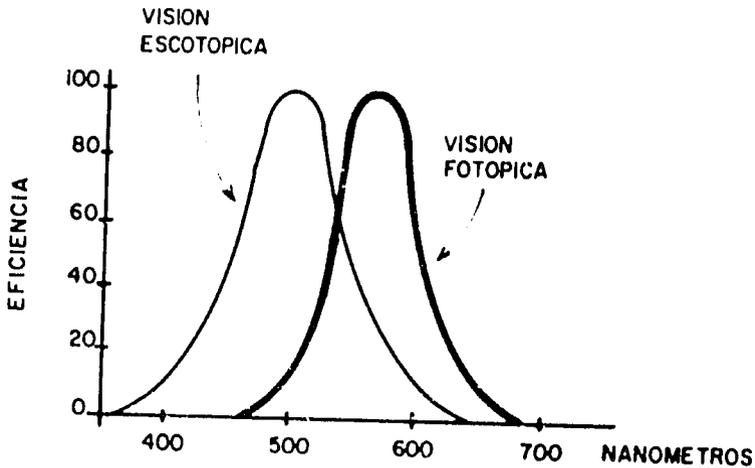
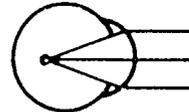


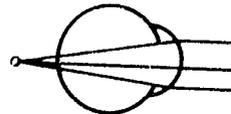
FIGURA 4.3 CURVAS DE EFICIENCIA LUMINICA ESPECTRAL PARA VISIONES FOTOPICA Y ESCOTOPICA PARA UN OBSERVADOR FOTOMETRICO PATRON.

Esta anomalía es causada por irregularidades en la curvatura de la córnea.

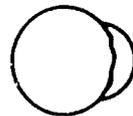
- b) **Miopía.** La distancia focal en un ojo miope es muy corta. La persona ve los objetos cercanos claramente, pero los distantes los ve borrosos.



- c) **Hipermetropía.** La distancia focal es muy larga. La persona a lo lejos ve perfectamente, pero de cerca ve borroso.



- d) **Presbiopía.** Es la pérdida del poder de acomodamiento del lente. Este defecto sobreviene con la vejez; el lente pierde progresivamente su elasticidad. El resultado es dificultad para la visión cercana.



4.1.2.7 Características de visión del ojo

- a) Adaptación. Es el proceso por el cual el ojo es capaz de funcionar en un amplio margen de niveles de iluminancia: implica un cambio de la abertura de la pupila, junto con cambios fotoquímicos en la retina.
- b) Acomodación. Es la facultad del ojo de ajustar espontáneamente su distancia focal según se fije en objetos situados a distancias variables.
- c) Contraste. El factor determinante en la discriminación de objetos es la diferencia de luminancia o color entre el objeto observado y el medio circundante. Objetivamente, el contraste se define por la fórmula:

$$L_c = \frac{L_2 - L_1}{L_1}$$

donde L_1 y L_2 representan la luminancia del fondo y del objeto, respectivamente, L_c es la luminancia de contraste.

- d) Sensibilidad de contraste. La visión se facilita tanto si se aumenta el contraste como la luminancia, por encima del valor umbral definido por la sensibilidad de contraste del ojo. Cuantitativamente, la sensibilidad de contraste (sc) es igual al valor recíproco del umbral de contraste (C_t), o a la luminancia del fondo dividida por la luminancia del umbral (L_t) esto es:

$$sc = \frac{1}{C_t} = \frac{L_1}{L_t} = \frac{L_1}{L_2 - L_1}$$

Por tanto, cuanto más bajos sean estos valores de umbral, mayor será la sensibilidad.

4.1.3 Medidas de iluminación

Todas las unidades usadas en la medición de la luz están basadas en las respuestas del ojo humano corriente; éstas son las siguientes.

- a) Intensidad luminosa (I). Es la densidad de luz dentro de un pequeño ángulo sólido irradiado en una dirección específica. Se simboliza por I , y su unidad es la candela (cd), la cual es la cantidad física internacional en toda medida de luz (ver figura 4.4).
- b) Flujo luminoso (Φ). Es la cantidad total de luz que irradia por segundo una fuente de luz. Se simboliza por Φ , y su unidad es el lumen (lm) o (Cd.sr).
- c) Iluminancia (E). Es la cantidad de flujo incidente por unidad de superficie. Se simboliza por E , y su unidad es el lux (lx).

$$\bar{E} = \Phi/s \quad \text{ó} \quad \dot{E} = I/r^2$$
- d) Luminancia (L). Es la intensidad luminosa por m^2 de superficie aparente de una fuente de luz o de un área iluminada. Se simboliza por L , y su unidad es el cd/m^2 . $L = I/A$ ó $L = E.rv/\pi$

4.1.4 Color

Tanto el color de las fuentes lumínicas como el de las superficies iluminadas desempeña un papel muy importante, pues hay que tener la luz adecuada para cada tarea visual; se debe tener el color óptimo para un mayor rendimiento lumínico, al igual que un color conveniente en función del confort.

- a) Tono. Es la base de todos los colores, y está en función específica de su longitud de onda en el espectro visible.
- b) Brillo. Es una cualidad del color que depende únicamente de la

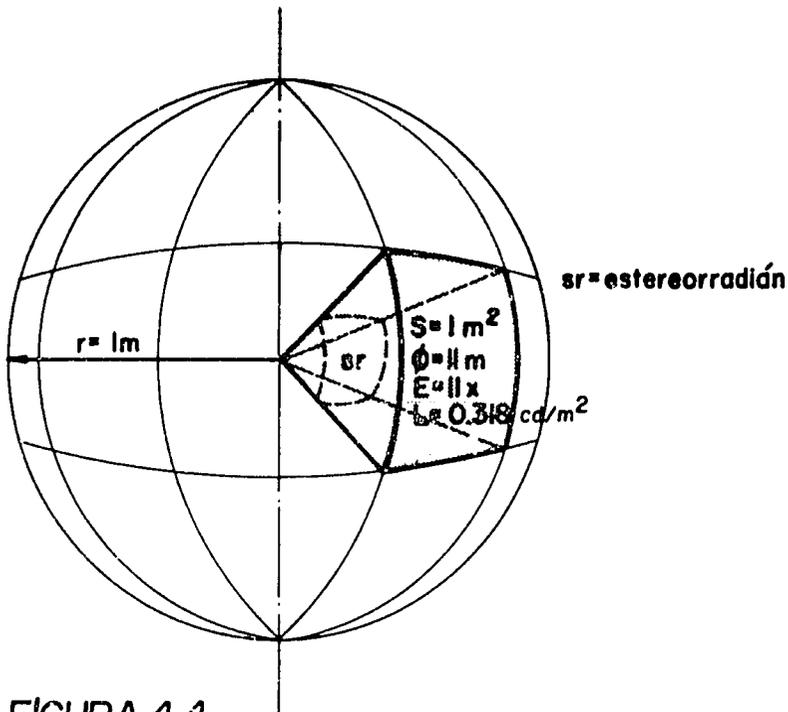
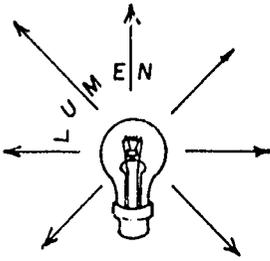


FIGURA 4.4
RELACIONES DE CONCEPTOS Y UNIDADES

cantidad de luz reflejada que llega al ojo en un tiempo dado.

- c) Saturación. Es el porcentaje de pureza del color: mientras más puro sea el color, más saturado estará.

4.1.4.1 Temperatura del color

Un cuerpo negro que absorbe radiación cambia su color según aumenta su temperatura. Por lo tanto, el término "temperatura de color" se usa para describir el color de una fuente luminosa, comparándola con un cuerpo negro o radiador perfecto. La temperatura del cuerpo negro, en grados kelvin, en la que se obtienen los mismos colores que con la fuente por medir, es la temperatura de color de ésta.

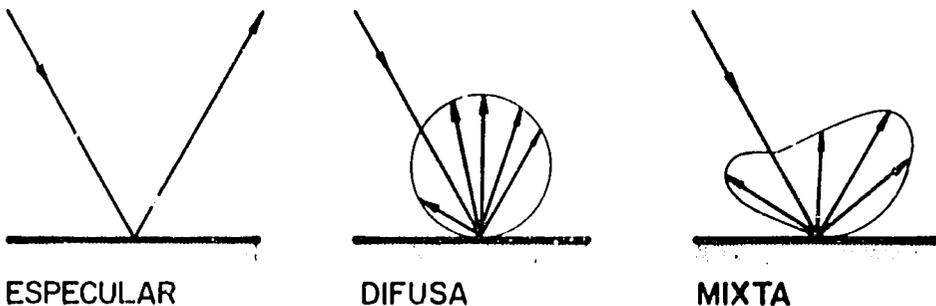
4.1.5 Propiedades ópticas

Cuando un haz luminoso incide en una superficie, se refleja siempre una cantidad de luz, otra es absorbida por el material, y, en algunos casos, otra tercera parte lo atraviesa.

4.1.5.1 Reflexión

Se llama reflexión al retorno de la radiación incidente en una superficie, sin que se produzcan cambios de frecuencia en ninguno de los componentes que la integran. La relación entre el flujo reflejado y el incidente se llama reflectancia (o factor de reflexión).

La reflexión puede ser especular, difusa y mixta (ver figura 4.5).



TIPOS DE REFLEXIONES
FIGURA 4.5

Estuco blanco (nuevo, seco)	0,70 - 0,80
Estuco blanco (viejo)	0,30 - 0,60
Acustela blanca	0,65 - 0,75
Óleo blanco	0,75 - 0,85
Pintura de aluminio	0,60 - 0,75
Hormigón (nuevo)	0,40 - 0,50
Hormigón (viejo)	0,05 - 0,15
Ladrillo (nuevo)	0,10 - 0,30
Ladrillo (viejo)	0,05 - 0,15
Tablero de fibra de madera (crema, nueva)	0,50 - 0,60
Tablero de fibra de madera (crema, vieja)	0,30 - 0,40
Madera clara de abedul y arce	0,55 - 0,65
Madera de roble, laqueada en claro	0,40 - 0,50
Madera de roble, laqueada en oscuro	0,15 - 0,40
Madera de caoba o nogal	0,15 - 0,40
Cortinas amarillas	0,30 - 0,45
Cortinas rojas	0,10 - 0,20
Cortinas azules	0,10 - 0,20
Cortinas de color gris plata	0,15 - 0,25
Cortinas de color marrón oscuro	0,10 - 0,20
Terciopelo negro	0,005 - 0,01
Reflectal	0,95 - 0,98
Plata pulida	0,88 - 0,93
Esmalte blanco	0,65 - 0,75
Níquel pulido	0,53 - 0,63
Níquel mate	0,48 - 0,52
Aluminio pulido	0,65 - 0,75
Aluminio mate	0,55 - 0,60
Aluminio "Alzac"	0,80 - 0,85
Cobre	0,48 - 0,50
Cromo pulido	0,60 - 0,70
Cromo mate	0,52 - 0,55
Hojalata	0,68 - 0,70

SUPERFICIES CON REFLEXIÓN DIFUSA

Color	claro	medio	oscuro
Amarillo	0,70	0,50	0,30
Beige	0,65	0,45	0,25
Marrón	0,50	0,25	0,08
Rojo	0,35	0,20	0,10
Verde	0,60	0,30	0,12
Azul	0,50	0,20	0,05
Gris	0,60	0,35	0,20
Blanco	0,80	0,70	—
Negro	—	0,04	—

FACTOR DE TRANSMISIÓN DE ALGUNOS MATERIALES

Cristal claro	0,90 - 0,93
Cristal mate	0,55 - 0,65
Cristal de prisma	0,65 - 0,75
Cristal opalino	0,59 - 0,84
Vidrio lechoso	0,10 - 0,38
Cristal con capa opalina	0,35 - 0,65
Seda blanca	0,50 - 0,70
Seda de color	0,15 - 0,55
Pantalla de seda con forro blanco	0,05 - 0,35
Papel opacaminado	0,40 - 0,45

Figura 4.6 Algunos Factores de Reflexión y Transmisión

4.1.5.2 Transmisión

Se denomina transmisión al paso de los rayos de luz a través de un medio sin que se produzca ninguna alteración de la frecuencia de sus componentes. Este fenómeno es característico en ciertos tipos de vidrio, cristal, plástico, agua y otros líquidos.

Cuando pasa la luz a través del material, se pierde una pequeña proporción de ella por absorción. La relación entre el flujo transmitido y el incidente se llama transmitancia (o factor de transmisión del material).

4.1.5.3 Refracción

Cuando un rayo de luz sale de un medio y entra en otro puede cambiar su dirección. Este cambio se debe a una variación de la velocidad de la luz. La velocidad disminuye si el nuevo medio es más denso, y aumenta cuando lo es menos. Este cambio de velocidad siempre va acompañado de una desviación del rayo luminoso, la cual se conoce como refracción, y su relación, como refractancia o índice de refracción (ver figura 4.7).

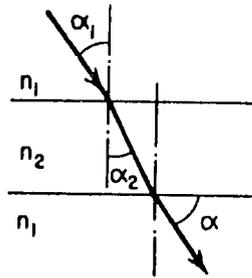


FIGURA 4.7

La ley de refracción se expresa como:

$$n_1 \operatorname{sen} \alpha_1 = n_2 \operatorname{sen} \alpha_2$$

donde N_1 = índice de refracción del primer medio

$$\begin{aligned}
 N_2 &= \text{índice de refracción del segundo medio} \\
 \alpha_1 &= \text{ángulo de incidencia} \\
 \alpha_2 &= \text{ángulo de refracción}
 \end{aligned}$$

Para el aire $N = 1$, entonces:

$$N_2 = \frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2}$$

4.2 EFICIENCIA Y COSTO EN ILUMINACION

El aumento reciente de los precios de la energía ha propiciado el desarrollo de productos de iluminación más eficientes. Mediante la mejora de los revestimientos de fósforo y de las mezclas gaseosas para descargas de alta intensidad (HID), se han conseguido producciones más elevadas de luz con menor consumo de energía. Actualmente, se dispone de lámparas de alta eficiencia que pueden usarse en prácticamente cualquier unidad fluorescente, sea cual fuere el tamaño; también se están usando en forma innovadora en las construcciones modernas, y como alternativa de las lámparas fluorescentes, incandescentes y lámparas de sodio a alta presión (HPS). Las lámparas incandescentes, por su parte, también han sido mejoradas en cierta medida, aunque aún continúan siendo, por mucho, las unidades de alumbrado menos eficaces.

La eficiencia de iluminación se define como la cantidad de iluminación obtenida (piecandela o lumen), para una cantidad dada de electricidad suplida. La unidad más comúnmente usada es lumen/watt. Por ejemplo, una lámpara incandescente de 100 watt produce cerca de 1700 lumen, lo que da un rendimiento de 17 lumen/watt. Si se compara este valor con la cifra de 80 lumen/watt correspondiente a una lámpara fluorescente F40 común es fácil ver por qué la iluminación fluorescente se usa tan extensamente. Cuando se trate de la instalación de nuevos sistemas de iluminación, o de adquirir lámparas de alta eficiencia, es necesario comparar la eficiencia de cada opción, en lumen/watt.

La sección que sigue contiene una discusión detallada de los tipos más nuevos de lámparas de alta eficiencia. Actualmente se están haciendo mejoras adicionales en ellas; una fuente excelente de información sobre esta materia es un ingeniero de ventas de alguna empresa productora de este tipo de equipo. El conocimiento sobre los sistemas de iluminación rendirá, a largo plazo, ahorros importantes de energía.

En la figura 4.9A, 4.9B y 4.9C, que se dan a continuación, se aprecia el grado de eficiencia, en porcentaje, de las diferentes lámparas.

4.3 TIPOS DE LAMPARAS

A continuación daremos los diferentes tipos de lámparas estándares en base a eficiencia y costo.

4.3.1 Lámpara incandescente

Este es el tipo de lámpara más sencillo: produce luz gracias a un filamento que se pone incandescente al paso de una corriente eléctrica. En la figura 4.8 se dan las partes principales:

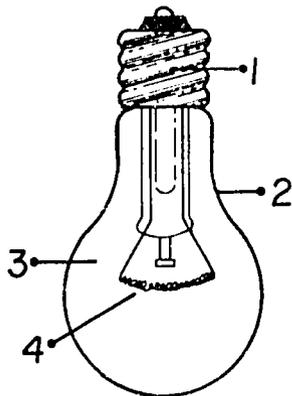
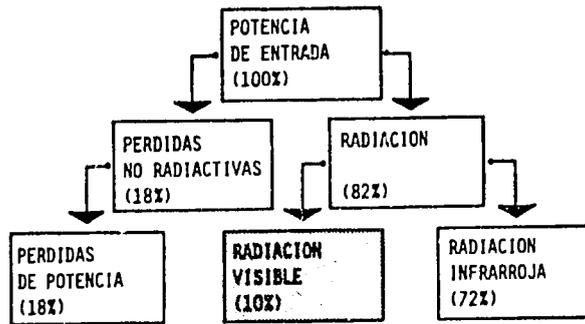


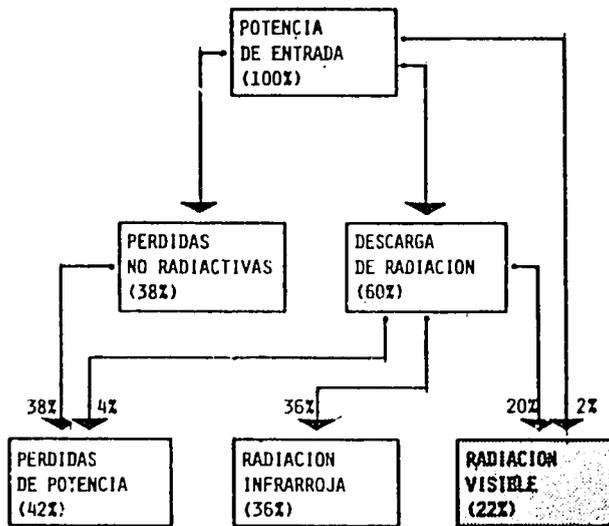
FIGURA 4.8

- 1 Casquillo
- 2 Ampolla
- 3 Gas de relleno
- 4 Filamento

El casquillo es la parte metálica que conecta la lámpara. El filamento que, por lo general es de tungsteno, se encuentra dentro de la ampolla, la cual está rellena solamente de un gas inerte (comúnmente nitrógeno y argón). El relleno de gas inerte es para reducir

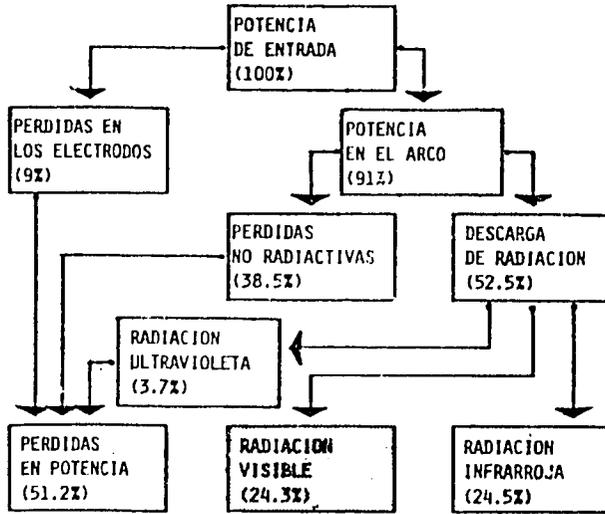


LAMPARA INCANDESCENTE

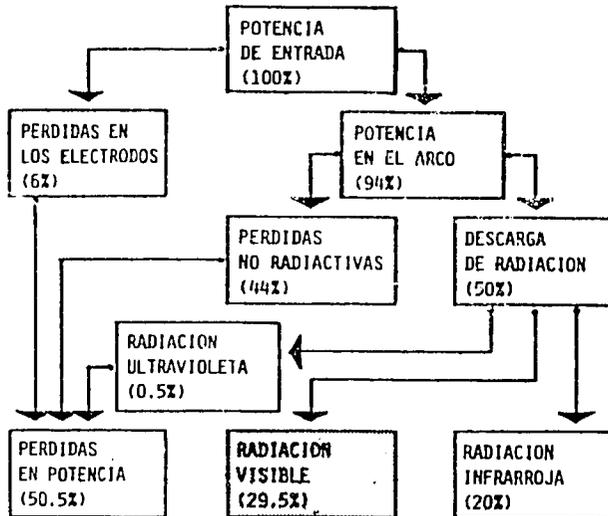


LAMPARA FLUORESCENTE

FIGURA 4.9A
DISTRIBUCION DE ENERGIA

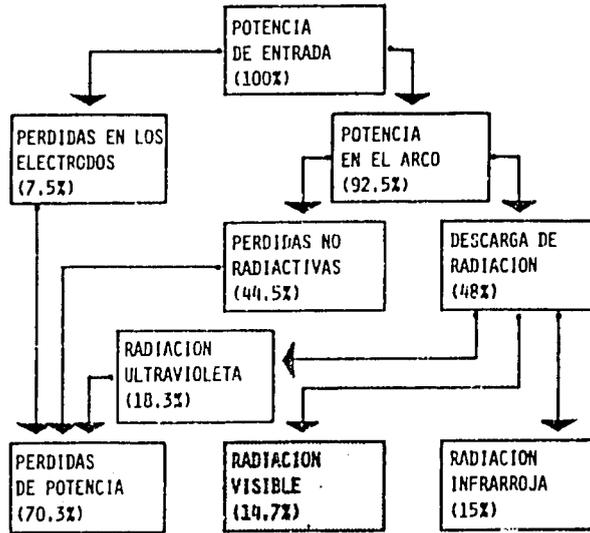


LAMPARA DE HALURO METALICO

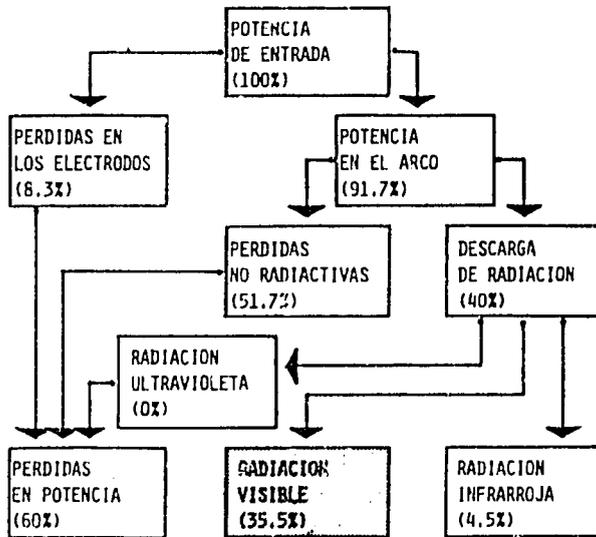


LAMPARA DE ALTA PRESION DE SODIO

FIGURA 4.9B
DISTRIBUCION DE ENERGIA



LAMPARA DE VAPOR DE MERCURIO



LAMPARA DE BAJA PRESION DE SODIO

FIGURA 4.9C
DISTRIBUCION DE ENERGIA

la evaporación del filamento.

Entre las lámparas incandescentes existen otros tipos; las más comúnmente usadas son las de halógeno y las reflectoras.

4.3.2 Lámparas fluorescentes

Todas las lámparas fluorescentes, genéricamente, son fuentes de descarga eléctrica. La radiación ultravioleta que se genera dentro del tubo provoca excitación en el revestimiento interior de fósforo, el cual emite luz visible. El tipo de fósforo usado en el revestimiento determina el color y la intensidad de la luz emitida. Las mejoras que se han logrado en los fósforos, han permitido la fabricación de lámparas de alta eficiencia cuya emisión de luz es prácticamente igual a la de sus predecesoras, pero cuyas demandas de energía eléctrica son marcadamente menores.

Por ejemplo, una lámpara corriente, de 1.22 m y de 40 watts, cuando nueva, tiene una producción nominal de 3150 lúmenes. Una versión mejorada de la misma lámpara sólo consume 34 watts, y produce 3050 lúmenes, cuando nueva. Esto representa una reducción del 15% en el total de energía que requiere, con sólo un 3% de merma en la producción de luz. En muchos casos, los operarios no advertirán tan pequeña disminución. De hecho, si se sustituyen las lámparas corrientes usadas por lámparas nuevas de alta eficiencia, es posible que el nivel general de iluminación aumente, ya que el rendimiento de las lámparas disminuye con la edad.

De la misma manera, una lámpara corriente de 75 watts, de 2.44 m de largo, puede reemplazarse por otra de 60 watts, de alta eficiencia; y una de 110 watts, de alto rendimiento, por una de 95 watts. Todas las sustituciones propuestas pueden hacerse conservando los balastos existentes. Si se compran las lámparas de repuesto al por mayor, el período de recuperación de los gastos puede resultar más corto que la

mitad de la vida útil esperada de las lámparas. En general, atendiendo a la economía, conviene reemplazar grupos completos de lámparas, en vez de lámparas aisladas.

En la figura 4.10A está representada la construcción de una lámpara fluorescente, y en la 4.10B los espectros de radiación.

4.3.3 Lámpara de sodio. De alta presión (HPS) y de baja presión (LPS)

Las lámparas de sodio pertenecen a la familia de las fuentes luminosas de descarga de alta intensidad. Estas lámparas de descarga de alta intensidad producen la luz mediante el paso de una corriente eléctrica a través de un gas o vapor a presión y no de un filamento de tungsteno como ocurre en las lámparas incandescentes. Las lámparas de sodio de baja presión producen luz monocromática (amarilla), cuyas características de discriminación cromática son pobres. Por eso, las lámparas de sodio de baja presión se consideran apropiadas sólo para iluminación de vigilancia u otros usos en que la discriminación cromática no sea esencial.

Por otra parte, cuando se usan en forma adecuada, las lámparas de sodio de alta presión producen iluminación blanca dorada, con un costo muy bajo en términos de energía. Debido a la forma en que funcionan estas lámparas, no se recomienda instalarlas en cielos falsos bajos. Pero, en cambio, son una opción atractiva comparadas con las lámparas convencionales de vapor de mercurio, para iluminar gimnasios, bodegas, vestíbulos y otros ambientes espaciosos y abiertos. De hecho, se pueden comprar lámparas de sodio de alta presión con las que es posible reconstruir sistemas existentes de lámparas de vapor de mercurio, usando los balastos y accesorios ya instalados. La diferencia de eficiencia luminosa entre lámparas de sodio a alta presión y las de vapor de mercurio (100 lumen/watt comparado con 58 lumen/watt), representa importante economía de energía para los usuarios. En la figura 4.11 se representan las lámparas de descarga en gas.

FIG. 10A PARTES DE UNA LAMPARA FLUORESCENTE

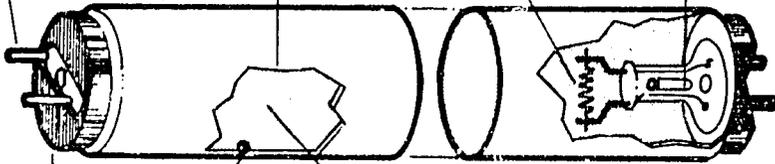
BULBO
usualmente un tubo recto de vidrio o corrugado. Existen también en formas circulares y de "U".

FOSFORO
el fósforo está impregnado dentro del bulbo. Transforma la radiación ultravioleta en radiación visible. El color de la luz producida depende de la composición del fósforo.

TUBO DE VACIO
el gas es extraído y reemplazado con un gas inerte.

PINES

CATODO
los catodos son revestidos con un material que emite electrones, generalmente fabricados de tungsteno.



MERCURIO
una diminuta cantidad de mercurio líquido es introducido en el tubo para producir el vapor de mercurio.

GAS
usualmente se utiliza en su fabricación Argón ó una mezcla de gases inertes a baja presión. A veces es usado Criptón.

BASE
varios tipos diferentes bases son usadas en la conexión de la lámpara al circuito eléctrico por sus soportes conductores.

FIGURA 4.10 A

ESPECTRO DE RADIACION EN DIFERENTES TIPOS DE LAMPARAS FLUORESCENTES

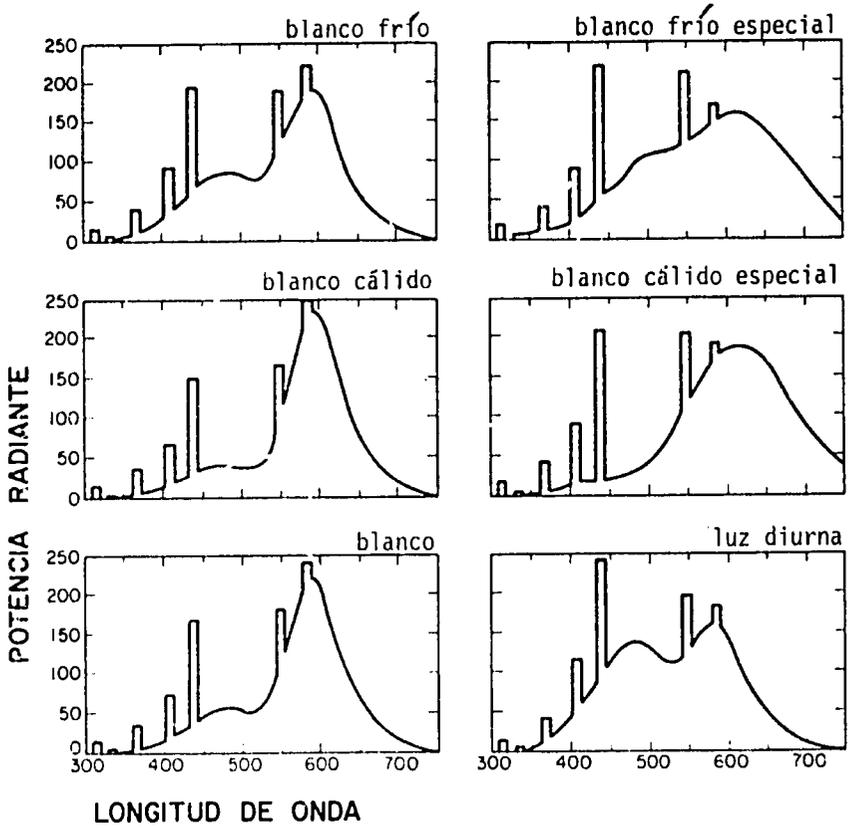
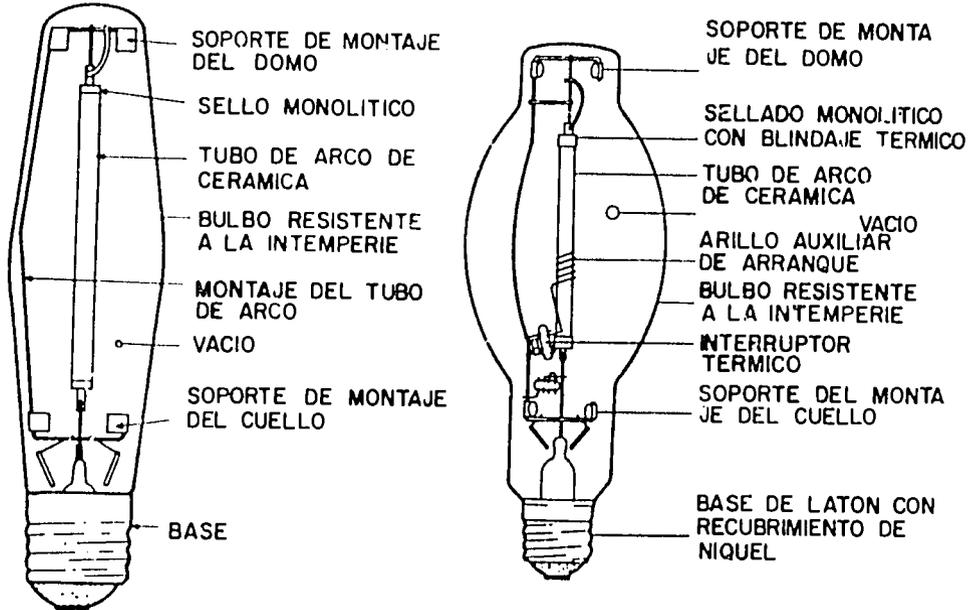
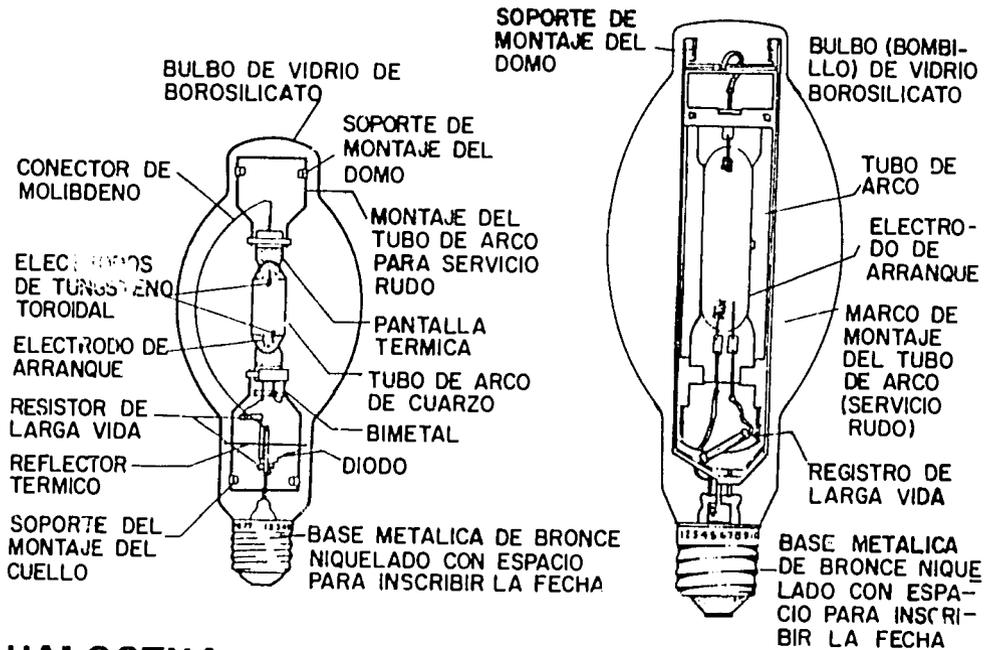


FIGURA 4.10 B

FIG. IIA PARTES DE LAS LAMPARAS DE DESCARGA EN GAS



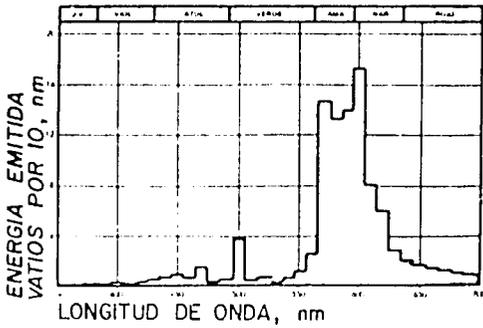
SODIO DE BAJA PRESION SODIO DE ALTA PRESION



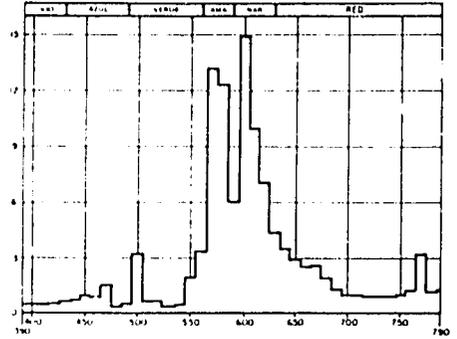
HALOGENA FIGURA 4.11 A

MERCURIO

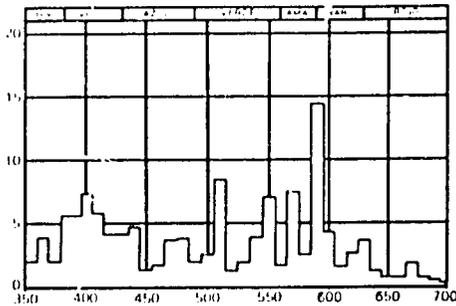
ESPECTROS DE RADIACION, EN DIFERENTES LAMPARAS DE DESCARGA EN GAS



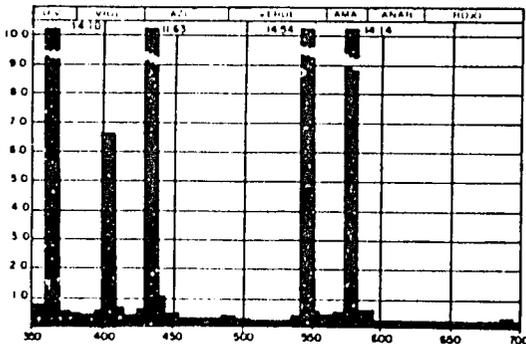
SODIO DE BAJA PRESION



SODIO DE ALTA PRESION



HALOGENA



MERCURIO

FIGURA 4.IIB

4.3.4 Lámparas de halógenos

Estas lámparas constituyen un tercer tipo de lámparas de alta intensidad de descarga. Difieren de las lámparas de sodio a alta presión y de las de mercurio en el tipo de gas o vapor que usan. Las lámparas de halógeno permiten una excelente discriminación cromática, tienen alta eficiencia y larga vida. Desafortunadamente, a causa de que requieren balastos o reactancias especiales, no son muy apropiadas para reconstruir una instalación. En instalaciones nuevas se logra alta eficiencia (115 lumen/watt), con un costo razonable por vida útil.

4.3.5 Ejemplos de conservación de energía

Ejemplo No. 1

En una planta cuya instalación lumínica tenía una carga total de 40 kilovatios, se resolvió reemplazar las lámparas fluorescentes instaladas con lámparas fluorescentes de alta eficiencia. Como consecuencia, se logró un 12% de reducción en la potencia consumida. Si se supone que se realizaban tres turnos diarios, se trabajaba durante 6000 horas al año y que el costo del kilovatio-hora era de 5 ¢, las economías de la planta pueden calcularse así:

$$0.12 \times 40 \text{ kW} \times 6000 \text{ h/año} \times \$ 0.05/\text{kWh} = \$ 1,440/\text{año}$$

Las lámparas sustituidas eran todas de 40 watts nominales, y el costo de las lámparas nuevas resultó ser de US \$ 1.88 cada una, de manera que los costos totales pueden calcularse así:

$$\frac{40000 \text{ watts}}{40 \text{ watts/lámpara}} = 1000 \text{ lámparas}$$

$$1000 \text{ lámparas} \times \$ 1.88/\text{lámpara} = \$ 1,880$$

Por lo tanto, el período de recuperación resulta ser:

$$\frac{\$ \text{ CA } 1,880}{\$ \text{ CA } 1,440/\text{año}} = 1.3 \text{ años}$$

Ejemplo No. 2

El sistema de iluminación de la zona de producción de una fábrica consiste, aproximadamente, en 600 bombillas incandescentes de 500 watts nominales, y suministra un nivel de iluminación media de 150 lux. Este nivel es bastante más bajo que el de 300 a 500 que se recomienda, y los gerentes han recibido consejo de cambiar a un sistema de lámparas de sodio con alta presión. El sistema propuesto elevaría el nivel de iluminación de 150 a 400 lux, y también aumentaría la eficiencia, lo que daría ahorros de energía y de gastos. Los cálculos siguientes corresponden a un cómputo de las economías con base en 8 horas de trabajo diario, durante 5 días por semana y un costo de 5 centavos por kilovatio-hora.

Costo de operación del sistema actual:

$$\text{Costo de operación} = \frac{500\text{W/lamp} \times 600 \text{ lamp} \times 2000 \text{ h/año} \times \$0.05/\text{kWh}}{1000 \text{ W/kW}} = \$ 30000/\text{año}$$

- a) Vida de las bombillas: 1000 horas
- b) Uso anual: 2000 horas
- c) Costo de reemplazo: \$ 9.75/lámpara

Con base en a, b, y c, se tiene:

$$\text{Costo de mantenimiento} = 600 \text{ lamp} \times \frac{2000 \text{ h/año}}{1000 \text{ h}} \times \$ 9.75/\text{lamp} = \$ 11,700/\text{año}$$

Costo total de operación = \$ 41,700/año

Costo de operación del sistema propuesto:

Con base en 150 lámparas de 400 watts cada una

$$\text{Costo de operación} = \frac{400 \text{ W/lamp} \times 150 \text{ lamp} \times 2000 \text{ h/año} \times \$0.05/\text{kWh}}{1000 \text{ W/kW}} = \$ 6,000/\text{año}$$

d) Vida de las lámparas: 24,000 h

e) Operación anual: 2,000 h

f) Costo de reemplazo: \$ 68.00/lamp

Con base en d, e y f, se tiene:

$$\text{Costos de mantenimiento} = 150 \text{ lamp} \times \frac{2000 \text{ h/año}}{24000 \text{ h}} \times \$ 68.00/\text{lamp} = \$ 850/\text{año}$$

Costos totales de operación = \$ 6,850/año

El ahorro entre el sistema propuesto y el existente es:

$$\$ 41,700/\text{año} - \$ 6,850/\text{año} = \$ 34,850$$

Costo estimado:

Costo inicial del sistema de sodio a alta presión (sin incluir mano de obra) = \$ 25,000

$$\text{Período de recuperación} = \frac{\$ 25,000}{\$ 34,850} = 0.72 \text{ años}$$

4.3.6 Elementos y equipos de control en iluminación

Con el advenimiento de los dispositivos electrónicos de estado sólido

para funcionamiento y manejo de energía, han surgido numerosas innovaciones. Como ejemplo se puede mencionar los balastos electrónicos, los cuales pueden ahorrar hasta un 30% de energía. En equipos se pueden encontrar desde unidades para amortiguar la luz, controladas por fotoceldas accionadas por la luz natural, hasta unidades programadas para control de tiempo, que incluso se accionan con la radiación de la persona.

4.4 CANTIDAD Y CALIDAD DE LUZ REQUERIDA

La cantidad y calidad del alumbrado son dos factores interrelacionados que están en función de los siguientes requisitos: rendimiento o eficiencia visual, confort y placer visual, y economía.

La calidad de la luz tiene mucho que ver con el color, pues de él depende la eficiencia visual; por ejemplo, en una fábrica textil donde se trabaja con varios tonos de colores, no se puede instalar un sistema de iluminación de lámparas de sodio, pues el color que emite la lámpara es la longitud de onda del amarillo y esto puede confundir colores.

En la figura 4.12 se da una tabla de los valores de iluminación que se recomiendan para instalaciones en servicio.

A veces, y debido a limitaciones de tipo económico, se impone un compromiso entre los niveles de iluminancia deseables y los que se pueden llevar a efecto. Como consecuencia, puede ser necesario aceptar un valor medio de iluminancia menor que el que sería adecuado desde el punto de vista del rendimiento o del confort.

4.5 DISEÑO DEL ALUMBRADO. EJEMPLO

En esta parte importante de iluminación trataremos el diseño del alumbrado industrial a modo de ejemplo.

FIGURA 4.12

VALORES RECOMENDADOS DE ILUMINANCIAS

Tipo	Iluminancia recomendada (lux)	Ejemplos de zonas o actividades
Alumbrado general en locales y zonas de uso poco frecuente o tareas visuales ocasionales y simples	20	Iluminancia mínima en servicios, en zonas exteriores de circulación.
	30	Almacenes al exterior y playas de almacenamiento.
	50	Pasillos interiores, plataformas, aparcamientos cerrados.
	75	Almacenes interiores.
	100	Teatros, salas de concierto; dormitorios de hoteles, aseos y lavabos.
	150	Zonas de circulación en industrias; depósitos y almacenes.
Alumbrado general en locales de trabajo	200	Iluminancia mínima, en servicio, de la tarea visual.
	300	Trabajos medios manuales y a máquina; trabajos normales en la industria química y alimentación, lectura ocasional y archivo.
	500	Trabajos medios manuales y a máquina; montaje de automóviles; naves de imprentas; oficinas en general, almacenes y tiendas.
	750	Salas de lectura, de pruebas, salas de dibujo y oficinas con máquinas de contabilidad.
	1000	Trabajos finos manuales y a máquina; montaje de máquinas para oficinas; trabajos con colores; salas donde se realicen dibujos muy artísticos.
	1500	Trabajos muy finos manuales y a máquina; montaje de instrumentos y pequeños mecanismos de precisión, calibración e inspección de piezas pequeñas y complicadas.
Alumbrado adicional localizado para tareas visuales exigentes.	≥ 2000	Trabajos minuciosos y muy precisos, p. ej. partes muy pequeñas de instrumentos, relojería y grabado; zona de operaciones en quirófano.

Ejemplo:

Una nave industrial de 24 metros de largo, 12 de ancho y 7 metros de alto requiere de un alumbrado eficaz. El nivel de iluminación requerido para la nave es de 300 lux, pero debido al manejo de materiales no debe haber interferencia con el color.

Luminaria:

Lámpara de halógeno de descarga en gas de 400 W, la cual da un promedio de 32 500 lúmenes.

Reflector de campana con el casco de aluminio anodizado y difusor alrededor (ver anexo).

Local:

Area de 288 m²

El índice del local (k) es una función de sus dimensiones y se calcula con la fórmula:

$$k = \frac{l \times a}{h_m(1+a)}$$

donde, l es el largo,

a es el ancho,

h_m es la altura de montaje,

entonces con los datos que se tienen, se puede calcular k:

$$k = \frac{24 \times 12}{7(24+12)} = 1.14$$

Las paredes son de color azul claro con una reflectancia de 0.5.

El techo es de color blanco medio con una reflectancia de 0.7

(ver figura 4.6)

Coeficiente de utilización (CU):

Para determinar este factor buscamos la hoja del reflector que se va a utilizar (en el anexo) y para los valores dados, la tabla nos indica que el valor interpolado de CU es de 0.63.

Factor de mantenimiento (FM)

Este factor se refiere al mantenimiento que se le dará a la luminaria con respecto a su duración. En él se pondera el funcionamiento del balasto, el voltaje aplicado, el cambio de reflectancia, la depreciación lumínica de la lámpara, la suciedad del ambiente, etc.

Considerando un voltaje estable, un ambiente limpio y un buen mantenimiento, se determina que el FM será de 0.70.

Ahora bien, para saber cuál será la cantidad de lámparas que hay que instalar, sólo se necesita resolver la siguiente ecuación:

$$\text{No. de lámparas} = \frac{E \cdot A}{\text{CU} \cdot \text{FM} \cdot \phi_{\text{lámpara}}}$$

donde:

- E = iluminancia o nivel de iluminación
- A = área del local
- CU = coeficiente de utilización
- FM = factor de mantenimiento
- $\phi_{\text{lámpara}}$ = flujo luminoso de la lámpara

Por tanto:

$$\text{No. de lámparas} = \frac{(300 \text{ lx}) (288 \text{ m}^2)}{(0.63) (0.70) (32500 \text{ lm})} = 6.03$$

= 6 lámparas por instalar

Ahora debemos hacer la disposición de las lámparas para el área dada bajo las siguientes condiciones:

- que las lámparas laterales no deben distar del límite del ambiente no más de $2/3$ de la distancia entre lámparas en un mismo sentido, y
- que la distancia entre dos lámparas vecinas no sea mayor que 1.3 de la altura de montaje.

Entonces, tomando esto en cuenta, se hacen los cálculos en base a largo, pero primero se disponen las lámparas según el número en un orden lógico.

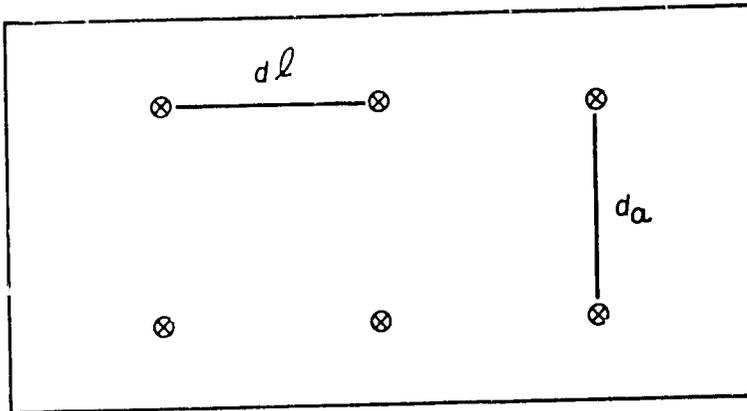


FIGURA 4.13

Entonces, se procede con el cálculo matemático:

$$2/3 d_l + d_l + d_l + 2/3 d_l = 10/3 d_l = 24 \text{ m}$$

$$\text{donde } d_l = 7.2 \text{ m}$$

Para el cálculo en base al ancho se considera la distancia de lámpara a pared de $1/3$ de la distancia entre ambas, entonces:

$$1/3 d_a + d_a + 1/3 d_a = 12 \text{ m}$$

de donde $d_a = 7.2 \text{ m}$

Conociendo las distancias de separación, ya se tiene resuelto el problema de iluminación para la nave industrial.

4.6 MANTENIMIENTO

Con un mantenimiento adecuado se puede lograr un incremento en la eficiencia lumínica, tan alto como un 30%, para ello se puede hacer:

- Limpeza de luminaria (bulbos y pantalla).
- Pintar techos y paredes con colores claros.
- Reemplazo de bulbos y balastos que hayan excedido sobre manera su vida útil.

En la siguiente figura se dan las pérdidas típicas por mantenimiento en una luminaria fluorescente:

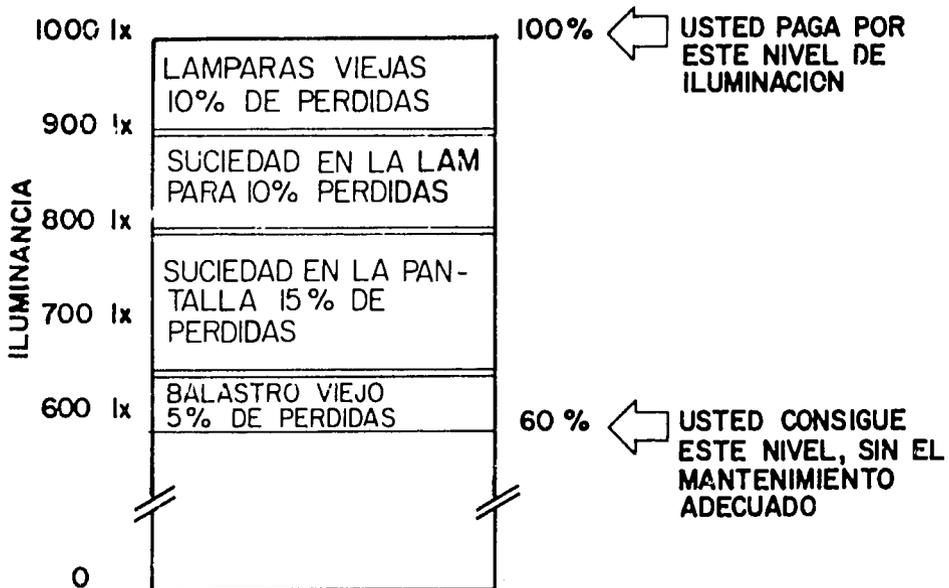


FIGURA 4.14

4.7 RECOMENDACIONES

A continuación, se dan varias recomendaciones para el ahorro de energía eléctrica

- 1) Diseñar la iluminación adecuada para la actividad por realizar.
- 2) Diseñar la iluminación con luminarias.
- 3) Usar lámparas de alta eficacia.
- 4) Usar colores claros en techos, paredes, pisos y acabados.
- 5) Apagar luces cuando no se necesiten.
- 6) Utilizar la luz del día (luz natural) siempre que sea posible.
- 7) Mantener los elementos de iluminación en estado óptimo de limpieza.
- 8) Quitar luminarias innecesarias.
- 9) Reducir niveles de iluminación
- 10) Instalar equipo de control para iluminación.
- 11) Utilizar balastos de alta eficiencia.
- 12) Quitar las pantallas difusoras siempre y cuando sea posible.

4.8 ANEXOS

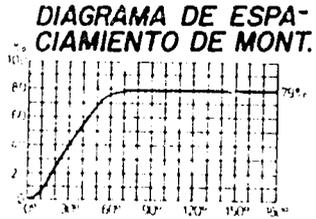
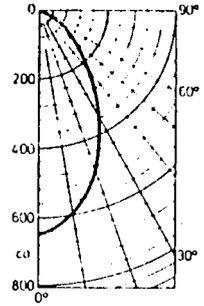
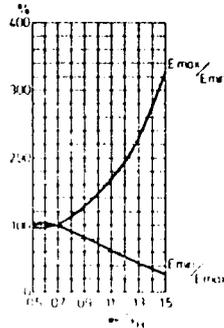
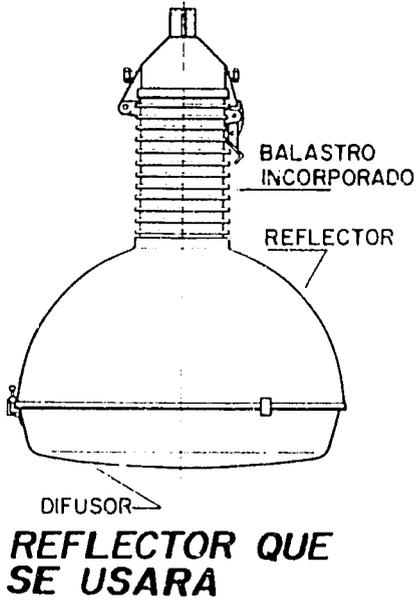


DIAGRAMA DE DISTRIBUCION DE LUZ

DIAGRAMA DE FLUJO LUMINOSO

DATOS ELECTRICOS

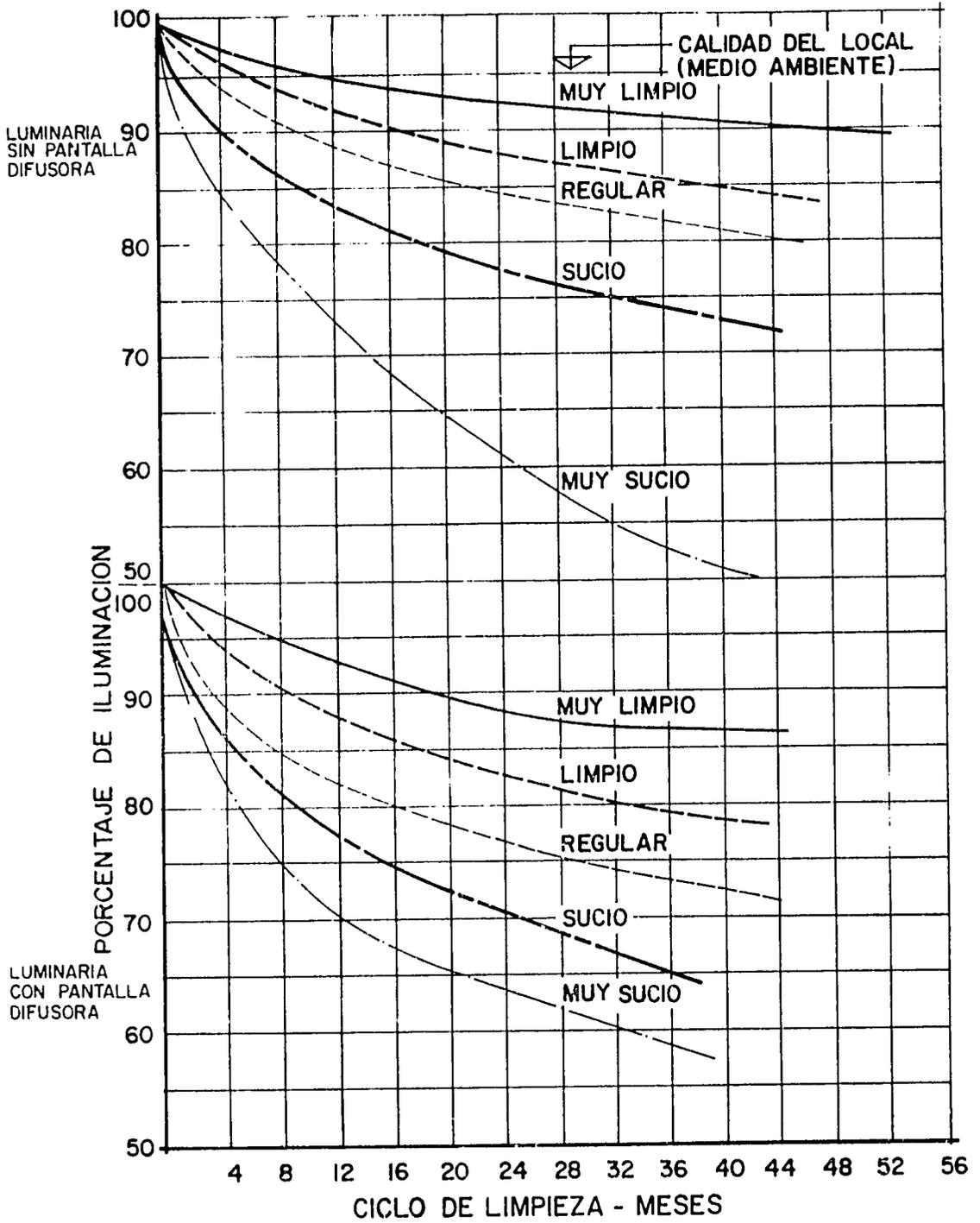
Para lámparas	Tensión V	Corriente A	Factor de potencia	Pérdidas W	Compensación
250 W	220	2.10	0.55	19	-
		1.35	0.94	19	17 MF
400 W	220	3.15	0.60	23	-
		2.10	0.85	23	20 MF

ANEXO 4.1

TABLA DE COEFICIENTE DE UTILIZACION DEL REFLECTOR QUE SE USARA

	z %	K	0C→ 0W→ 0W P.→	.7			.5			.3		0
				.5	.3	.1	.5	.3	.1	.3	.1	0
				.1			.1			.1		0
250W	0	0.60		.49	.46	.43	.49	.45	.43	.45	.42	.41
		0.80		.56	.52	.50	.55	.52	.50	.52	.49	.48
		1.00		.61	.57	.55	.60	.57	.54	.56	.54	.53
		1.25		.64	.61	.59	.63	.61	.58	.60	.58	.57
	76	1.50		.67	.64	.62	.66	.63	.61	.63	.61	.60
		2.00		.71	.68	.66	.69	.67	.64	.66	.65	.63
		2.50		.73	.71	.69	.71	.70	.68	.69	.67	.66
		3.00		.74	.72	.71	.73	.71	.70	.70	.69	.67
		4.00		.74	.75	.73	.75	.73	.72	.72	.71	.69
		5.00		.77	.76	.75	.76	.75	.74	.73	.73	.71
1.00V	0	0.60		.50	.45	.42	.49	.45	.42	.45	.42	.41
		0.80		.57	.53	.50	.56	.52	.50	.52	.49	.48
		1.00		.62	.58	.55	.61	.57	.55	.57	.54	.53
		1.25		.66	.62	.60	.65	.62	.59	.61	.59	.57
	79	1.50		.69	.66	.63	.68	.65	.62	.64	.62	.61
		2.00		.73	.70	.68	.71	.69	.67	.68	.66	.65
		2.50		.75	.72	.71	.73	.71	.70	.70	.69	.67
		3.00		.76	.74	.73	.75	.73	.72	.72	.71	.69
		4.00		.79	.77	.75	.77	.76	.74	.74	.73	.71
		5.00		.80	.78	.77	.78	.77	.76	.76	.75	.73

ANEXO 4.2



EFFECTOS DEL MANTENIMIENTO EN EL CICLO DE LIMPIEZA ANEXO 4.3

Unidades estándar, símbolos y ecuaciones que definen las magnitudes fotométricas				
Cantidad	Símbolo	Ecuación que define la cantidad	Unidad	Abreviaturas
Energía luminosa (cantidad de Luz)	Q	$Q = \int \phi dt$	Lumen-hora Lumen-segundo	lm.h lm.s
Flujo luminoso	ϕ	$\phi = dQ/dt$	Lumen	lm
Excitancia luminosa	M	$M = d\phi/dA$	Lumen por m ²	lm/m ²
Luminancia	E	$E = d\phi/dA$	Lux	lx
Intensidad luminosa (potencia en candelas)	I	$I = d\phi/d\Omega$ (Ω = ángulo sólido a través del cual radia el flujo desde una fuente puntual)	Candela	cd
Luminancia	L	$L = dI/dA \cos\theta$ (θ = ángulo entre la línea de visión y la normal a la superficie en consideración)	Candela por m ²	cd/m ²
Eficacia luminosa	K	$K = \phi_v / \phi_e$	Lumen por vatio	lm/W
Eficiencia luminosa	V	$V = K/K_{max}$ (K_{max} = valor máximo de la función $K(\lambda)$).	(Porcentaje)	
Luminancia escalar	E_{sc}	$E_{sc} = \int E/4\pi d\Omega$	Lux	lx
Exposición luminosa	H	$H = dQ/dA$	Lux-segundo	lx.s

Unidades estándar, símbolos y ecuaciones que definen las magnitudes radiométricas

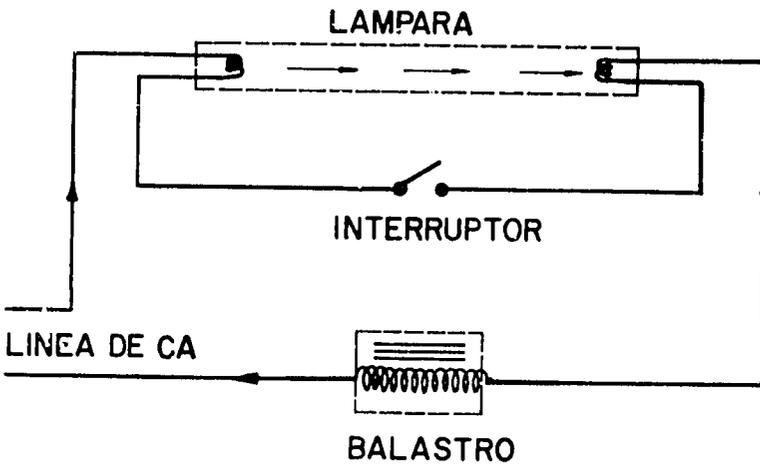
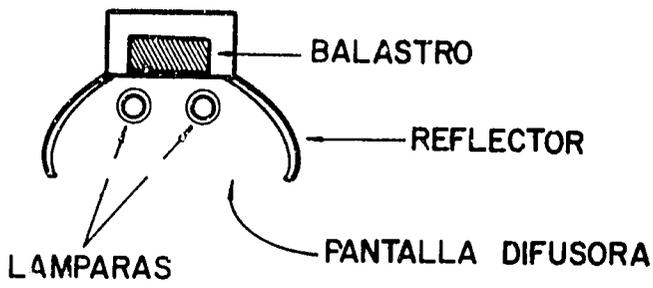
Cantidad	Símbolo	Ecuación que define la cantidad	Unidad	Abreviaturas
Energía radiante	Q		Julio	J
Flujo radiante	Φ	$\Phi = dQ/dt$	Kilovatio-hora Vatio Julio por segundo	kWh W J/s
Exitancia radiante	M	$M = d\Phi/dA$	Vatio por m ²	W/m ²
Irradiancia	E	$E = d\Phi/dA$	Vatio por m ²	W/m ²
Intensidad radiante	I	$I = d\Phi/d\Omega$ (Ω = ángulo sólido a través del cual radia el flujo desde una fuente puntual)	Vatio por esterradián	W/sr
Radiancia	L	$L = d^2\Phi/dA \cos\theta$ (θ = ángulo entre la línea de visión y la normal a la superficie en consideración)	Vatio por esterradián y metro cuadrado	W/sr.m ²
Absorptancia	α	$\alpha = d\Phi_a/d\Phi_o$	(Relación numérica)	
Reflectancia	ρ	$\rho = d\Phi_r/d\Phi_o$	(Relación numérica)	
Transmitancia	τ	$\tau = d\Phi_t/d\Phi_o$	(Relación numérica)	
Exposición radiante	H	$H = dQ/dA$	Julio por metro cuadrado Vatio-segundo por metro cuadrado	J/m ² Ws/m ²

(*) Φ_a = flujo absorbido; Φ_r = flujo reflejado; Φ_t = transmitido; Φ_o = flujo incidente.

CARACTERISTICAS DE LAMPARAS

	De descarga en gas					
	Incandescente	Fluorescente	Mercurio	Halógeno	Sodio Alta presión	Sodio Alta presión
Lúmenes por watt	6 - 23	25 - 84	30 - 63	68 - 125	77 - 140	137 - 183
Lúmenes	40 - 33 600	96 - 15 000	1 200 - 63 000	12 000 - 155 000	5 400 - 140 000	4 800 - 33 000
% de mantenimiento	75 - 97	75 - 91	70 - 86	73 - 83	90 - 92	75 - 90
Intervalo de potencia (W)	6 - 1 500	4 - 215	40 - 1 000	175 - 1 500	70 - 1 000	35 - 180
Duración (horas)	750 - 8 000	9 000-20 000	16 000 - 24 000	1 500 - 15 000	20 000-24 000	18 000
Temperatura de color	2 400 - 3 100	2 700- 6 500	3 300 - 5 900	3 200 - 4 700	2 100	1 750
Aplicación de color	buena	buena	pobre	buena	pobre	mala
Costo inicial	bajo	moderado	moderado	alto	alto	moderado
Costo operacional	alto	moderado	moderado	bajo	bajo	bajo

ANEXO 4.6



ANEXO 4.7

5. VENTILACION Y ACONDICIONAMIENTO DE AIRE

Los sistemas de ventilación y acondicionamiento de aire (VAA) consumen grandes cantidades de energía eléctrica con el fin de proporcionar un ambiente cómodo en el lugar de trabajo y un ambiente adecuado para ciertos procesos industriales. Ya que estos sistemas no están directamente involucrados con la producción, se descuida frecuentemente su mantenimiento y así su operación es con un bajo rendimiento. Estos descuidos ocasionan que el rendimiento de operación sea de un 20% a un 30% más bajo que el rendimiento nominal.

En una instalación manufacturera que tiene gran demanda de aire acondicionado, es necesario considerarlo como factor decisivo en el pico de demanda eléctrica que es más marcado en los meses de verano. Este pico influirá en el costo promedio de la energía eléctrica durante los once meses siguientes. Para este período crítico se recomienda buscar el máximo rendimiento del enfriamiento de los equipos.

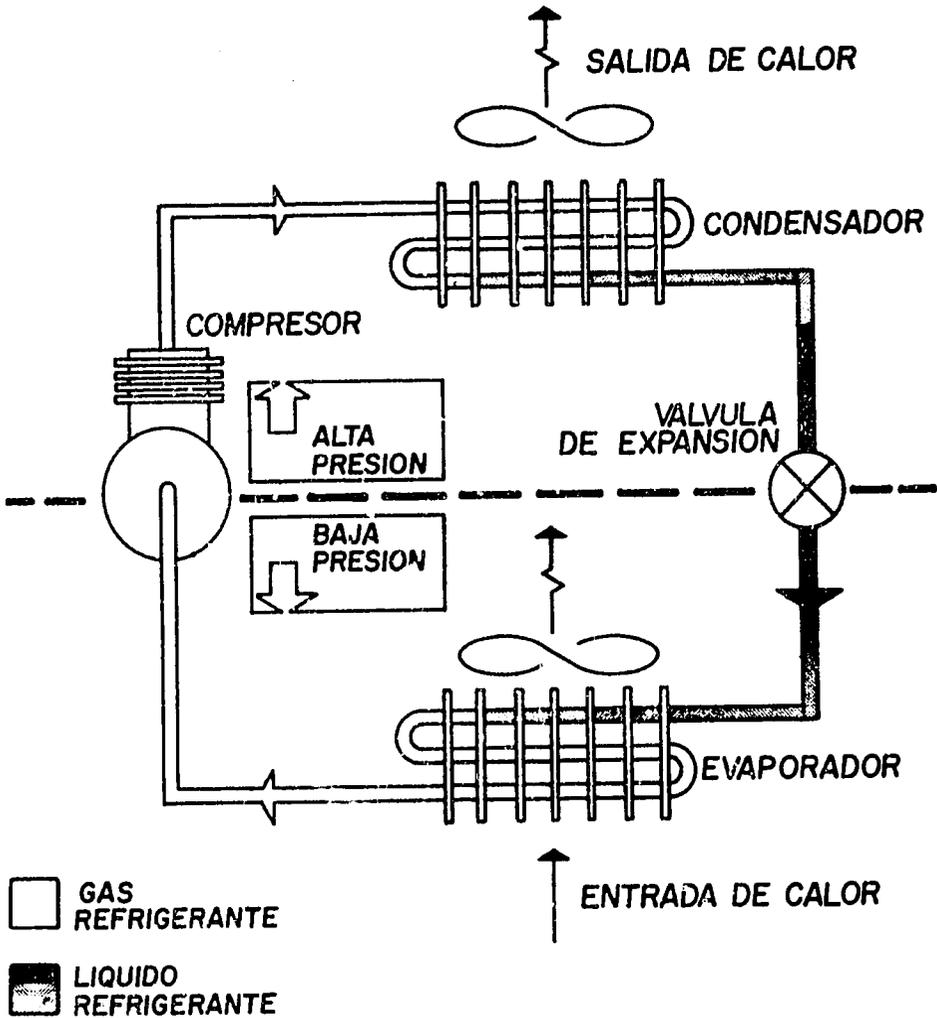
5.1 TEORIA FUNDAMENTAL DE LA REFRIGERACION

Un conocimiento básico del ciclo de refrigeración ayudará a comprender muchos de los métodos para optimizar el rendimiento del sistema. Según se muestra en la figura 5.1, un circuito típico de refrigeración consta de cuatro componentes principales:

- compresor,
- condensador,
- válvula de expansión, y
- evaporador

Estos componentes existen en una u otra forma en cualquier máquina de refrigeración.

El COMPRESOR es el principal dispositivo consumidor de energía en el circuito y provee la fuerza motriz necesaria para impulsar el refrigerante



CICLO DE REFRIGERACION
FIGURA 5.1

(por lo general un compuesto de fluorocarbono) a través del sistema, mediante el aumento de la presión del refrigerante gaseoso desde la "parte inferior" o evaporador, a la "parte superior" o condensador. La alta presión del refrigerante dentro del CONDENSADOR permite que el gas refrigerante se condense a temperaturas en los intervalos de 43.3°C y 60°C (110 y 140°F). El refrigerante, al condensarse, cede su calor latente de vaporización a otro medio, usualmente agua o aire (denominado "enfriado por agua" o "enfriado por aire"). Esta energía térmica o "calor de rechazo" es igual a la cantidad de calor sustraído por el evaporador más el calor equivalente al trabajo realizado por el compresor.

Los ventiladores del condensador (enfriado por aire), la torre de enfriamiento, los ventiladores del enfriador de evaporación y las bombas de circulación de agua (enfriada por agua) consumen electricidad.

La VALVULA DE EXPANSION es el dispositivo de medición para regular la velocidad de flujo del refrigerante líquido al evaporador y mantiene la diferencia de presión entre las partes "superior" e "inferior" en virtud de una caída de presión a través de la válvula. Este dispositivo no consume energía y tampoco se transmite calor en este punto.

El refrigerante líquido entra al EVAPORADOR por la parte de "baja presión", en donde se evapora y produce el efecto de enfriamiento que se desea. El calor es transmitido al refrigerante por un medio, por lo general, agua o aire. El evaporador puede tener la forma de un "serpentin de enfriamiento" con tubo de aletas o un intercambiador de calor de tubo y concha, como en el caso de una máquina enfriadora de agua. En este punto se consume energía en las bombas de circulación de agua y/o los ventiladores de circulación de aire. Este consumo puede ser hasta la tercera parte del consumo total del sistema.

El rendimiento termodinámico de un ciclo de refrigeración depende de muchos factores, pero es determinado primordialmente por la diferencia de presión del refrigerante entre el evaporador y el condensador. Esta diferencia de presión es la "carga" contra la que tiene que trabajar el

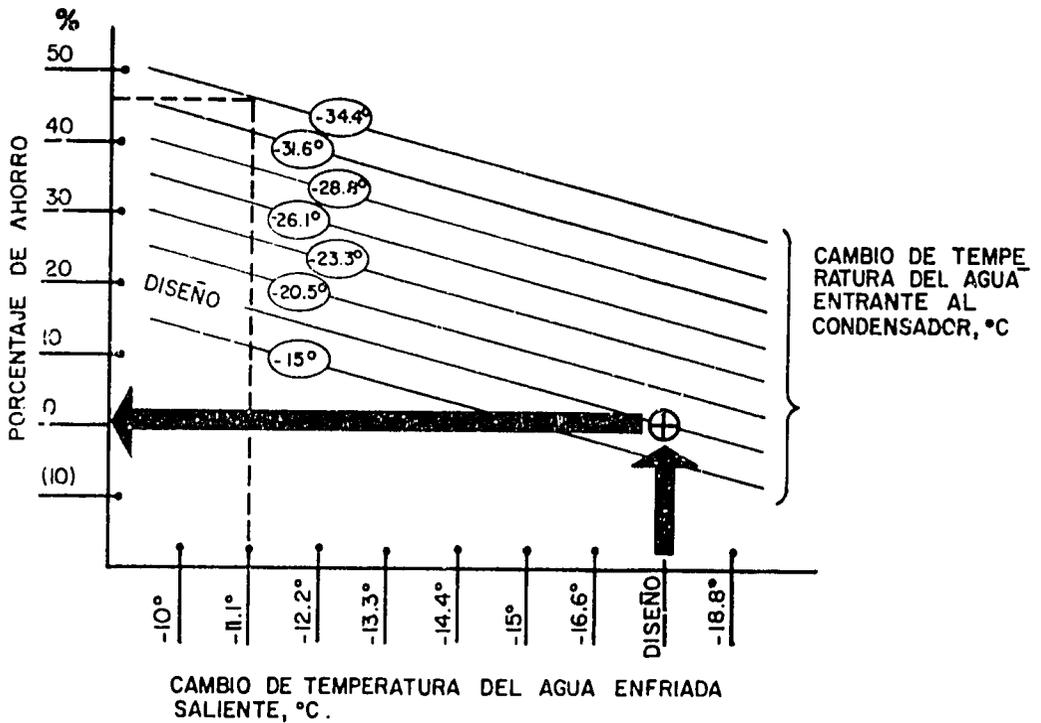
compresor para mover el refrigerante a través del sistema. Un aumento del "desnivel" de presión aumenta el trabajo realizado por el compresor y disminuye el rendimiento del ciclo. Muchas técnicas de conservación de energía en sistemas de refrigeración están orientadas a reducir la diferencia de presión mediante el incremento de la temperatura del evaporador y/o la baja de la temperatura del condensador. En la actualidad, los acondicionadores residenciales de aire con "alto rendimiento" no son otra cosa que unidades estándar con serpentines de condensador de super-tamaño que permiten reducir la presión condensadora.

5.2 OPERACION Y MANTENIMIENTO CON MIRAS A CONSERVACION DE ENERGIA

Un programa de mantenimiento preventivo bien diseñado es esencial para una operación continua de sistemas de ventilación y acondicionamiento de aire con el máximo de su rendimiento. Cuando se ensucian las superficies de transmisión de calor, la suciedad y las incrustaciones acumuladas actúan como aislantes y, al retardar la transmisión de calor y aumentar los gradientes de temperatura, reducen el rendimiento del ciclo de refrigeración. Se recomienda, como mínimo, los siguientes métodos de mantenimiento rutinario. Esta lista no debe considerarse como completa:

MENSUAL O BIMENSUAL

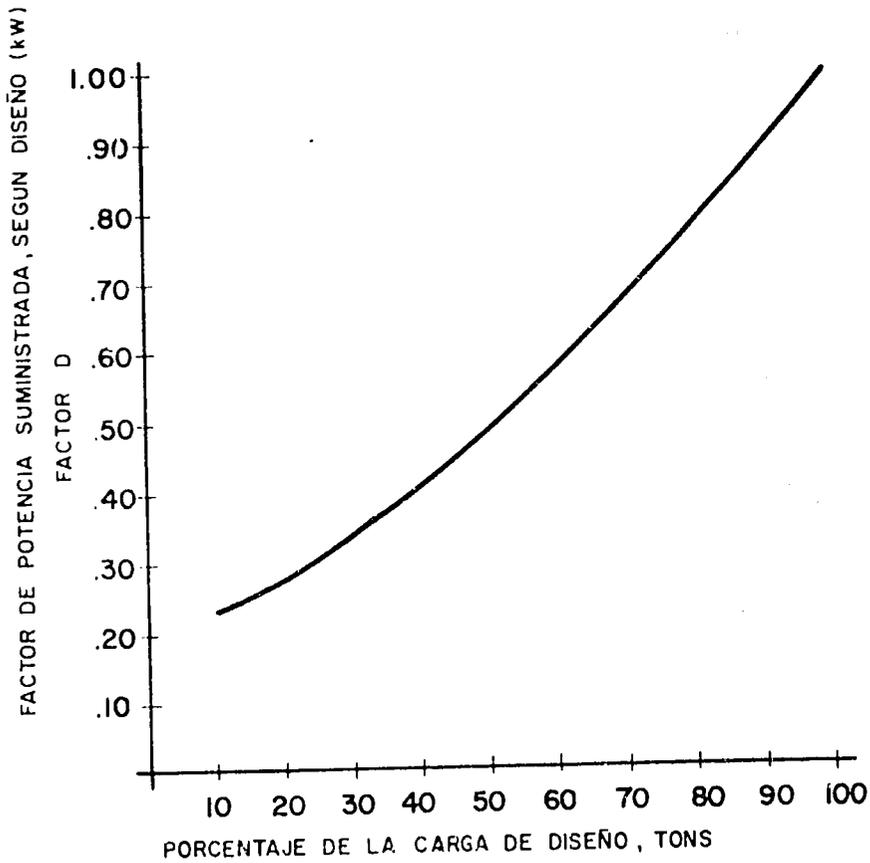
- Limpiar o reemplazar los filtros de aire (más frecuentemente si así lo exigen las condiciones del ambiente).
- Verificar el estado y la tensión de la faja del ventilador.
- Lubricar los cojinetes del motor y ventilador.
- Verificar los sistemas de tratamientos químicos de la torre de enfriamiento y la calidad del agua.



AHORRO DE ENERGIA POR AJUSTE DE TEMPERATURAS DE AGUA ENFRIADA Y AGUA DEL CONDENSADOR

FIGURA 5.2

FACTOR DE DISEÑO A CARGA PARCIAL*



* RENDIMIENTO ESTIMADO A CARGA PARCIAL. SOLO UN PUNTO, NORMALMENTE A PLENA CARGA, PUEDE ASEGURARSE.

$$\text{PORCENTAJE DE CARGA DE DISEÑO (TONS)} = \frac{\text{CARGA PARCIAL}}{\text{CARGA DISEÑO}} \times 100$$

$$\text{POTENCIA A CARGA PARCIAL} = \text{POT. A CARGA PLENA} \times \text{FACTOR D}$$

$$\text{FACTOR D} = \text{FACTOR DE POTENCIA SUMINISTRADA, SEGUN DISEÑO (KW)}$$

FIGURA 5.3

ANUAL O SEMESTRAL

- Limpiar los serpentines de enfriamiento y del condensador con vapor o con un limpiador químico.
- Limpiar la acumulación de incrustaciones en el lado del agua del enfriador y los tubos del condensador.
- Verificar la carga refrigerante.
- Calibrar y ajustar los dispositivos de control de temperatura.

El tratamiento químico apropiado de los sistemas de agua circulante es sumamente importante para prevenir las incrustaciones en los tubos. Las mediciones de potencia efectuadas antes de una limpieza y después de ésta pueden llegar a demostrar un ahorro de hasta un 22% de la energía consumida. Más adelante presentaremos un estudio de este caso.

5.3 SISTEMAS ENFRIADORES DE AGUA (CHILLER)

El rendimiento de un enfriador de agua centrífugo o reciprocante puede mejorarse mediante el incremento de la temperatura del agua enfriada de suministro y/o la reducción de la temperatura del agua del condensador, como resultado del rendimiento mejorado del ciclo, debido a la reducción de la carga hidráulica en el compresor. Por cada grado de ajuste en la temperatura, se puede lograr un ahorro del 1 al 1.5% de la energía consumida. Sin embargo, no debe permitirse que la temperatura del agua del condensador descienda por debajo de la temperatura recomendada por el fabricante del enfriador. Antes de bajar la temperatura a menos de 24° C (75° F) del agua que entra al enfriador, se recomienda consultar con el fabricante del sistema.

En la gráfica 5.2, se indica el porcentaje de ahorro de energía que se logra al aumentar la temperatura del agua de enfriamiento y reducir la temperatura del agua del condensador. Por ejemplo, si la temperatura

del agua enfriada saliente se elevara de 5.5°C (42°F) a 12.2°C (54°F) y la temperatura del agua entrante del condensador se disminuyera de 29.4°C (85°F) a 12.7°C (55°F), el ahorro de energía eléctrica sería del 45%.

La mayoría de los sistemas de control de capacidad de los enfriadores funciona tratando de mantener una temperatura constante del agua enfriada saliente. Al bajar la carga enfriadora, el error, en el sistema de control de capacidad, causa la baja de la temperatura del agua enfriada. En realidad, el enfriador produce el agua más fría cuando funciona con una carga menor a la carga de diseño, que es justamente lo opuesto del resultado que se desea. En la mayoría de los casos, las temperaturas del agua de alimentación enfriada muy por arriba de los niveles de diseño, proporcionarán un enfriamiento, adecuado durante los meses de la estación caliente.

Con miras a superar este problema varios fabricantes han desarrollado recientemente controladores que vigilan la carga en el enfriador y mantienen la temperatura del agua enfriada saliente al nivel máximo que satisfaga los requerimientos del sistema. Estos dispositivos pueden realizar esta función por separado, pudiéndose incorporar a sistemas computarizados de administración de energía.

Cuando en las instalaciones se tiene más de un enfriador, se recomienda experimentar variando sus cargas hasta llegar a la combinación de mayor eficiencia. Esto sucede en gamas entre el 50 y 90% de la carga.

5.4 SISTEMAS ECONOMIZADORES DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO

Para aplicaciones en lugares en que se necesita enfriamiento durante todo el año (ya sea por procesos o comodidad), debe considerarse un sistema de enfriador con desvío (By Pass) en el cual el agua de la torre de enfriamiento es circulada por el circuito de agua enfriada, evadiendo completamente el enfriador, durante períodos de baja temperatura ambiente.

Las torres de enfriamiento modernas pueden enfriar el agua a temperaturas entre 7.2°C y 15.5°C (45 a 60°F) cuando las temperaturas ambiente de bulbo húmedo son relativamente bajas, eliminando así por completo el consumo de potencia del enfriador. La principal desventaja de estos sistemas es la sensibilidad a incrustaciones y la corrosión del sistema de tubería hermético de agua enfriada, debido a que el agua de la torre es químicamente más activa. Este problema ha sido solucionado en parte utilizando filtros de arena y grava idénticos a los filtros para piscinas.

5.5 CICLOS DE ENFRIAMIENTO LIBRE

Estos enfriadores han sido modificados y diseñados para proveer un porcentaje de su capacidad nominal de enfriamiento a temperaturas ambiente suficientemente bajas sin necesidad de hacer funcionar el compresor. Esta opción de "enfriamiento libre" incorpora en su modificación un desvío en torno del compresor, lo que permite que el gas refrigerante se traslade del evaporador al condensador como consecuencia de la baja presión en este último, ocasionada por la temperatura más baja que la normal del agua entrante de la torre de enfriamiento. El refrigerante líquido fluye a través (o en torno) de la válvula de expansión merced a la gravedad, terminando así el ciclo. En la figura 5.4 se muestra una curva representativa de la capacidad de enfriamiento contra la temperatura del agua que entra al condensador.

Aunque se obtiene una significativa capacidad de enfriamiento a bajas temperaturas ambientales de bulbo seco, el ciclo de enfriamiento libre dará agua enfriada a temperaturas más altas que el economizador de la torre de enfriamiento a cualquier temperatura ambiente dada. La ventaja del ciclo es que no se necesita ninguna conexión transversal entre los sistemas del agua enfriada y del agua del condensador, lo cual elimina los posibles problemas de corrosión e intercambio químico entre los dos sistemas. Aunque cualquier enfriador podría modificarse para funcionar en forma de enfriamiento libre, los accesorios que se necesitan son suministrados normalmente como una opción instalada en la fábrica.

CAPACIDAD DE ENFRIAMIENTO LIBRE

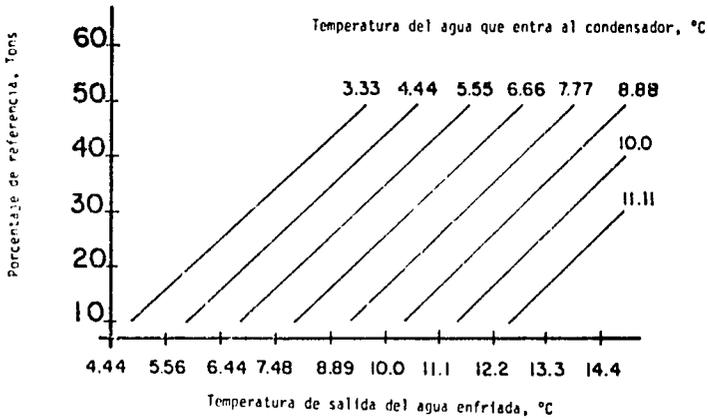
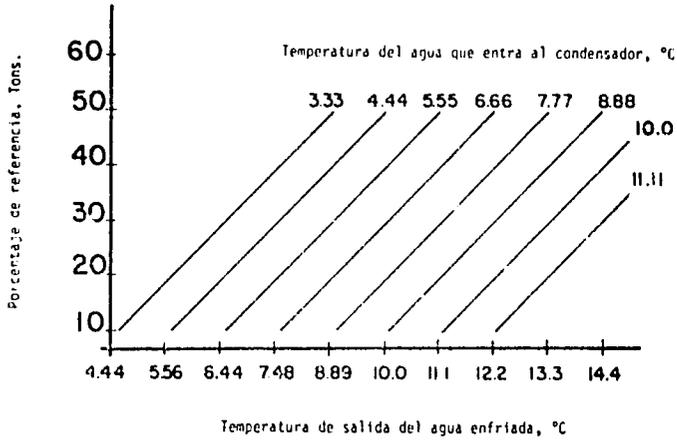


FIGURA 5.4 :

ENFRIADOR CENTRIFUGO DE ENFRIAMIENTO LIBRE

5.6 OPERACION DE COMPRESORES DE VELOCIDAD VARIABLE

Debido a la naturaleza sumamente fluctuante de la mayoría de las cargas refrigerantes, tanto en aplicaciones para procesos como para comodidad, los sistemas de enfriamiento están provistos de algún dispositivo que responda a las necesidades momentáneas de carga. Los sistemas pequeños en paquete logran esto mediante el ciclaje del compresor por conexión y desconexión. El equipo recíproco de gran capacidad utiliza descargadores de cilindro que desactivan uno o más cilindros para dar una reducción de la capacidad en incrementos de $1/4$, $1/3$ ó $1/2$ de la capacidad máxima. Los compresores centrífugos usan normalmente aletas de admisión en la succión del compresor, y pueden lograr una reducción de capacidad continua variable hasta un 10% de la capacidad máxima.

El uso de los compresores de velocidad variable ha demostrado que estos proporcionan mejor eficiencia con cargas parciales que los métodos convencionales descritos anteriormente. La aplicación de los compresores de velocidad variable estaba, hasta hace poco, limitada por los altos costos iniciales; sin embargo, con los crecientes costos de la energía se justifica cada día más su empleo. El "turbo modulador" de la Compañía York está cobrando gran aceptación por su operación económica. Este dispositivo utiliza la conversión de CA (corriente alterna) a CC (corriente continua) de la potencia eléctrica entrante seguida de una inversión de CC a CA con frecuencia variable. Este sistema ofrece una considerable mejora de la eficiencia con carga parcial, como lo indica la figura 5.5 y se puede adaptar a instalaciones ya existentes.

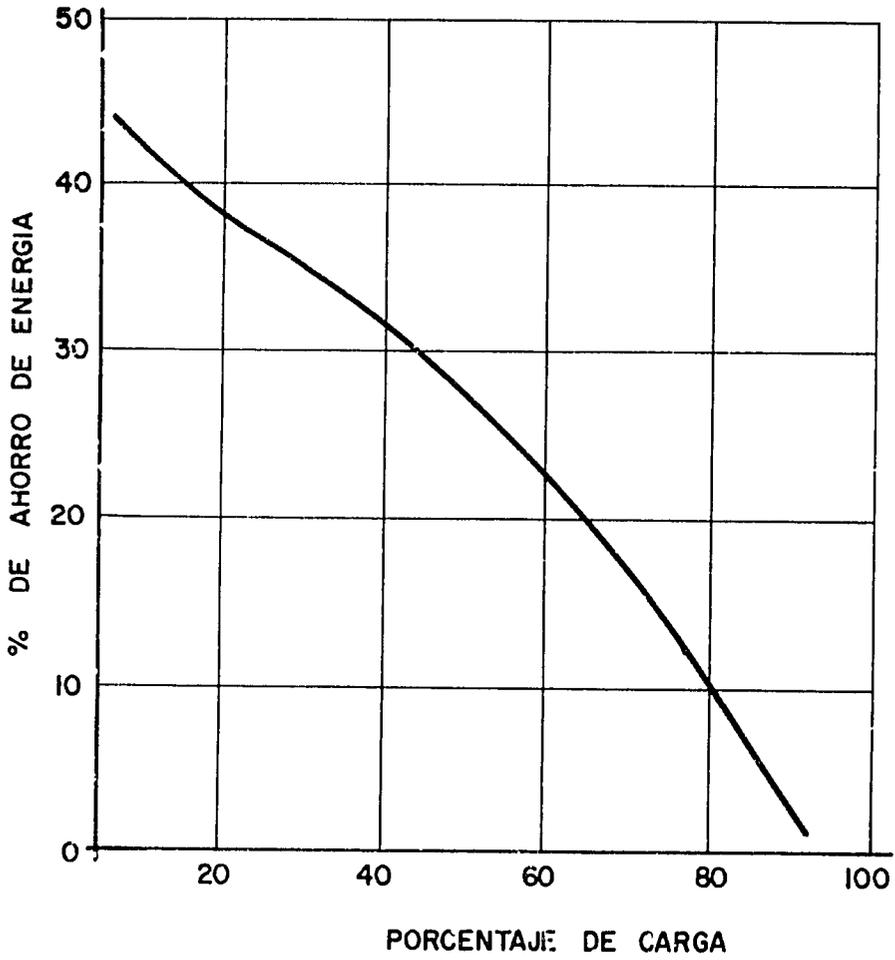


FIGURA 5.5: AHORRO DE ENERGIA CON CONTROL DE VELOCIDAD EN ENFRIADORES CENTRIFUGOS

5.7 SISTEMAS DE DISTRIBUCION Y MANEJO DE AIRE

Tal como se mencionó anteriormente, una gran cantidad de energía es consumida por los ventiladores de suministro de aire en un sistema típico de aire acondicionado. Existe un gran potencial de ahorro que reduce, en esta parte del sistema, las pérdidas de presión a través de los ductos y los componentes de manejo de aire y/o la reducción del flujo de aire a niveles mínimos. La importancia de esta aseveración se hace más evidente cuando se examinan las leyes de los ventiladores que relacionan los parámetros variables de una serie de ventiladores geoméricamente semejantes.

LEYES DE VENTILADORES

$$1) \quad Q_2 = Q_1 \times \frac{D_2^3}{D_1} \times \frac{N_2}{N_1}$$

$$2) \quad P_2 = P_1 \times \frac{D_2^2}{D_1} \times \frac{N_2^2}{N_1}$$

$$3) \quad H_2 = H_1 \times \frac{D_2^5}{D_1} \times \frac{N_2^3}{N_1}$$

donde:

- Q = velocidad del flujo
- D = diámetro del ventilador
- P = presión (total o estática)
- H = potencia en caballos de fuerza
- N = velocidad de rotación

Las leyes de ventiladores indican que el volumen de aire que hace circular un ventilador centrífugo es directamente proporcional al número de revoluciones por minuto (RPM) del ventilador. Sin embargo, la potencia

del ventilador es proporcional al cubo de las revoluciones por minuto, de modo que una reducción del 10% en las RPM producirá una reducción del 10% del caudal, con una correspondiente reducción del insumo de potencia del 73% de la necesidad original de potencia. Una reducción de RPM (y caudal) del 20% requerirá apenas más del 50% de la potencia nominal. Para lograr estos ahorros, debe reducirse la velocidad del ventilador. Esto puede realizarse mediante el ajuste de la polea del motor (si es de tipo de inclinación variable) o mediante el cambio de poleas. Cuando se trate de equipo de acondicionamiento de aire de bajo tonelaje, debe actuarse con precaución, ya que una gran reducción del caudal de aire a través del evaporador podría disminuir la presión del refrigerante en éste, reduciendo así la eficiencia del ciclo de refrigeración y posiblemente anulando cualquier ahorro de energía calculado.

La más atractiva oportunidad para ahorros de potencia del ventilador ocurre con sistemas de alimentación de aire de flujo variable o con sistemas que pueden ser convertidos a caudal variable. El soplador de alimentación y también los demás componentes de un sistema de acondicionamiento de aire deben dimensionarse para satisfacer la carga refrigerante que existe en el día más cálido del año. En cualquier otro momento, estos componentes son extragrandes y, por lo tanto, funcionan a un régimen más bajo que la eficiencia óptima. Con sistemas de gran capacidad de enfriamiento y especialmente sistemas enfriados por agua, existe una excelente oportunidad de convertir el equipo existente a equipo de flujo variable, a fin de aprovechar muchas horas de operación cuando la carga refrigerante es menor que las cantidades de aire pico y de suministro y, por lo tanto, puede reducirse.

Hay a disposición una amplia gama de técnicas para variar el rendimiento de los ventiladores, cada una con ventajas y desventajas distintivas. Debe prestarse atención al consumo comparativo de potencia de los diversos métodos, ya que se da una amplia variación. La velocidad variable de los ventiladores depara claramente una ventaja en cuanto a consumo de energía en comparación con métodos más convencionales como aletas de entrada regulables o tiros de salida del ventilador regulables. El consumo de poten-

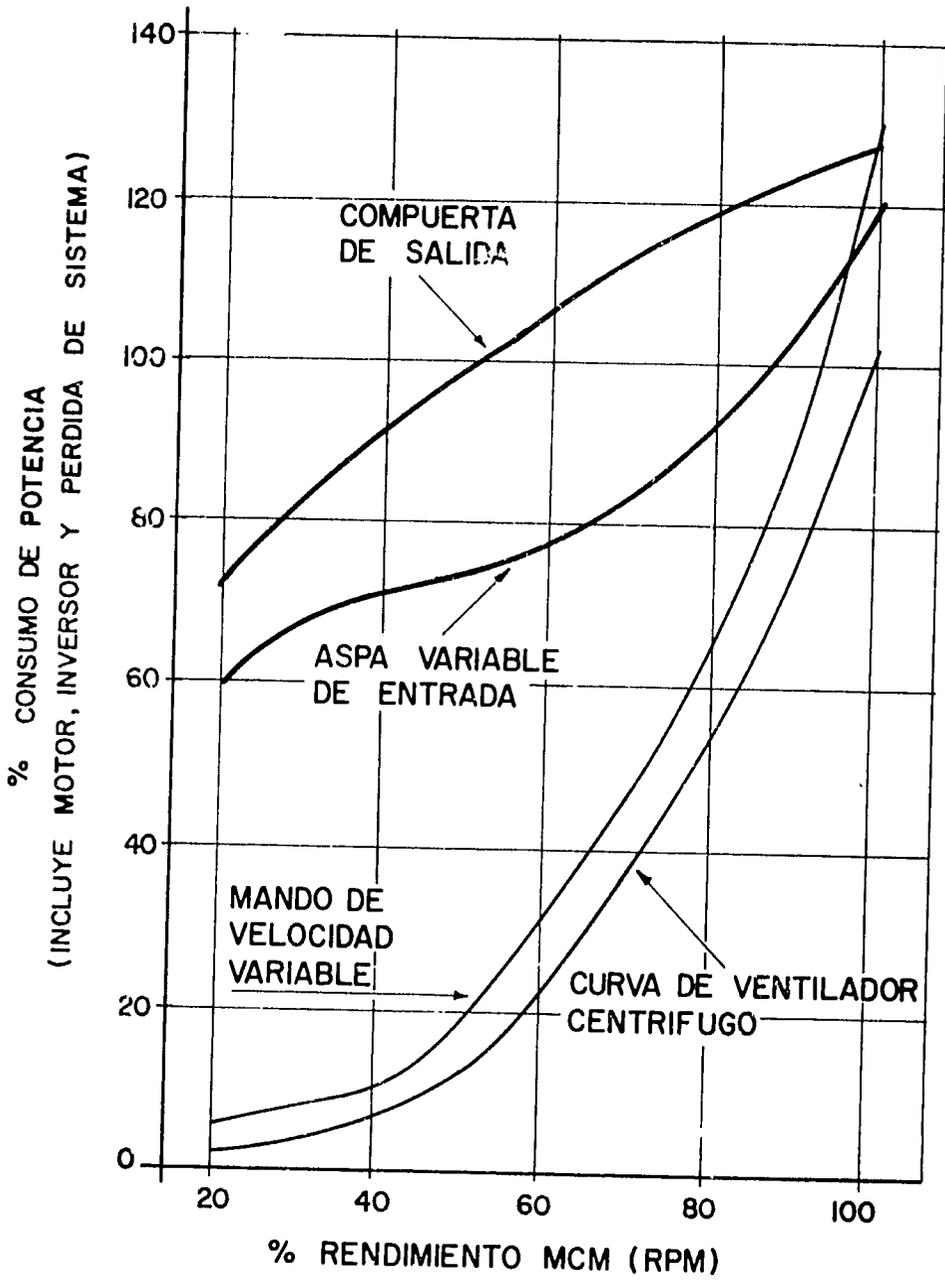


FIGURA 5.6: CONSUMO DE POTENCIA DE VENTILADOR A VOLUMEN REDUCIDO DE AIRE

cia de las diferentes opciones se representa gráficamente en la figura 5.6. En seguida, se presenta una discusión de los sistemas de control de ventiladores de velocidad variable, la cual fue preparada por ingenieros consultores de Newcomb y Bayd de Atlanta, Georgia (1).

CC: La potencia entrante de CA se convierte a CC por medio de tiristores para impulsar un motor de CC. La conversión de CA a CC es eficiente y precisa, teniendo la desventaja de tener que cambiar los carbonos o escobillas del motor y rectificar el colector a menudo. Otra desventaja son las interferencias en equipos electrónicos sensibles, que pueden ser anuladas mediante transformadores de desacoplamiento (aisladores). Cuando el factor de potencia es importante, hay que estipular que los convertidores tengan dispositivos de corrección de factor de potencia, ya que su factor de potencia a cargas reducidas es regularmente bajo.

CA DE FRECUENCIA VARIABLE: Los controladores de CA utilizan la misma transformación de CA a CC, pero luego utilizan otro conjunto de tiristores para volver a transformar la CC en CA y propulsar así un motor de CA. El circuito electrónico para la propulsión de CA es más complicado y menos eficiente que el del controlador de CC. Actualmente, el propulsor de CA es mucho más caro que la unidad de CC, pero cabe esperar que los próximos adelantos tecnológicos reducirán la diferencia. La principal ventaja de propulsores de CA es la facilidad de operar motores estándares y de alta eficiencia de CA. Los controladores de CA tienen un buen factor de potencia, pero tienen los mismos problemas de interferencias que tienen los propulsores de CC.

CORRIENTE PARASITA: Los propulsores a base de corrientes parásitas usan motores de CA y un acomplamiento de corriente parásita. El rotor de entrada (velocidad constante) genera un flujo magnético giratorio para el rotor de salida. Este flujo genera corrientes parásitas en el rotor de salida cuando existe diferencia en las velocidades en los rotores de entrada y salida. Las corrientes parásitas producen campos magnéticos que reaccionan con el campo generador, lo que da por resultado un par de sa-

lida. Los circuitos electrónicos de los propulsores de corrientes parásitas son considerablemente menos complicados que las tracciones de CC y CA, es decir son menos caros, pero menos eficientes que éstos. Su ventaja es que no producen interferencias electrónicas.

DISPOSITIVOS MECANICOS: Existen dos tipos básicos de dispositivos mecánicos de velocidad variable, a saber: propulsores de centro fijo y propulsores de centro variable. Los motores de centro fijo utilizan dos poleas de caras móviles. Las caras de la polea impulsora son colocadas en posición por un motor con engranaje reductor en respuesta a una señal externa que hace que la faja entre en la ranura o salga de ella. La polea impulsadora responde a la tensión en la faja y reacciona a fin de mantener una distancia fija del centro. Los propulsores de centro variable emplean una polea fija, ya sea de cara en "V" o plana y una polea de cara móvil, que está montada al eje del motor. La base del motor es impulsada hacia atrás y hacia adelante sobre un tornillo sinfín, por medio de un motor de engranaje reductor más pequeño.

Ambos tipos mecánicos de velocidad variable usan la tensión de la faja como un medio de mover una o ambas caras de la polea y, por lo tanto, exigen fajas de calidad industrial excelente y alineamiento crítico. Los propulsores mecánicos son bastante eficientes y deparan los medios menos costosos de obtener el control de la velocidad variable. Estos dispositivos no se recomiendan para motores con potencias superiores a 22 kW (30 hp).

5.8 CICLO ECONOMIZADOR (LADO DEL AIRE)

La adaptación de un sistema existente de manejo de aire a un ciclo economizador de operación es muy a menudo una opción económicamente atractiva. El término "ciclo economizador" se emplea generalmente para referirse a la introducción de aire exterior en vez de recircular el aire del cuarto para reducir las cargas de enfriamiento (cuando el aire exterior es suficientemente frío y seco). Este ciclo es muy apropiado para espacios con cargas internas altas y mínima exposición a la intemperie, incluso ubica

ciones tales como áreas de oficinas y ciertos ambientes de plantas industriales. Los sistemas pueden convertirse a un ciclo economizador de operación a un costo mínimo. El mayor costo sería la instalación de los ductos exteriores de toma de aire, tiros de alivio y controles. Cuando el sistema opera durante más de 8 a 10 horas por día se pueden lograr ahorros considerables.

5.9 SISTEMAS DE CONTROL AUTOMATICOS

Se desperdicia más energía en los sistemas de control automáticos que en cualquier otro medio. Los controles solamente se instalan y se dejan estar. En algunos casos, el instalador del sistema de control establece funcionamiento de calor y frío para procurar un control suave y rígido sin banda muerta. Este es un buen control pero mala economía. El debido funcionamiento de los controles debe comprobarse y calibrarse periódicamente. Los puntos de ajuste de todos los controles deben evaluarse y reajustarse a los valores óptimos con base en las necesidades reales en vez de las de diseño. El punto de reajuste de control exterior de la temperatura debe considerarse para controlar la temperatura del aire interior y del agua de enfriamiento que tienen puntos de ajuste fijos.

5.10 REDUCCION DE LAS HORAS DE OPERACION DEL SISTEMA

Uno de los medios más eficientes de ahorrar energía en los controles es reducir el número de horas de operación del sistema. Un reloj de siete días (o timer) que puede ser programado para arrancar y parar automáticamente los sistemas de VAA, según horarios apropiados para cada día de la semana. Este contador de tiempo se recomienda aún para los sistemas más pequeños. Controles manuales de intervalos pueden instalarse para suspender el ciclo "desconectado" del reloj y permitir que el sistema funcione durante el intervalo fijado manualmente, antes de volver automáticamente al control de tiempo por "contador de tiempo" y también permitir el funcionamiento de vez en cuando de horas extras sin tener que reajustar el contador programado. Co el fin de evitar excesivas bajas de temperatura durante los meses fríos, se puede necesitar un termostato

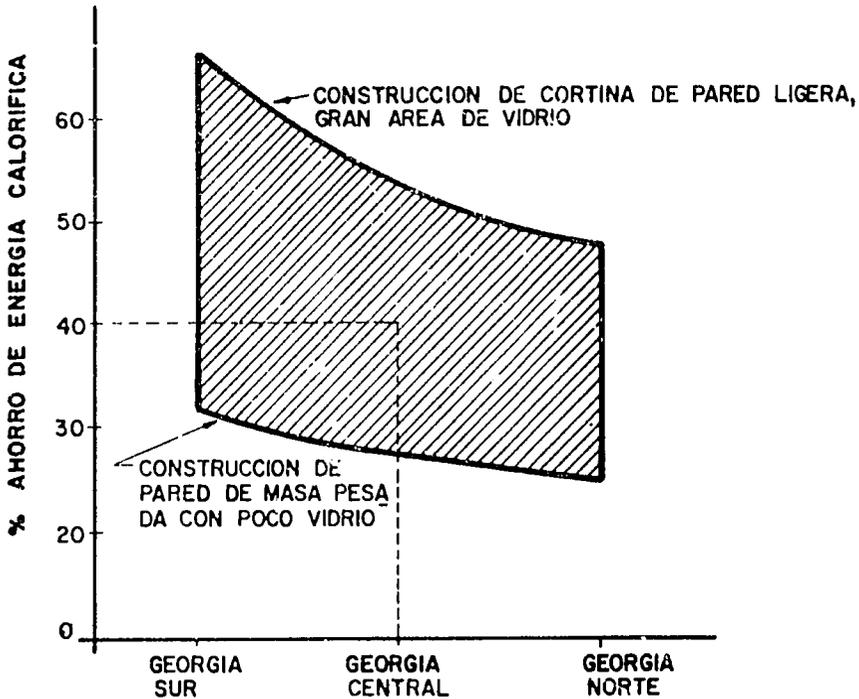
REAJUSTE

REAJUSTE NOCTURNO DE TEMPERATURA AMBIENTE

Disminuyendo la diferencia de temperatura entre el lado interno y el externo, los ahorros de energía por la reducción de pérdida de calor a través de las paredes externas, reducen el tiempo de operación de los ventiladores y disminuyen las fugas de aire de ventilación dentro del sistema manual de aire. Los ahorros reales dependerán de la localización, el tipo de construcción, el tipo de sistema de calentamiento y el ajuste original del termostato.

La siguiente gráfica da una aproximación tosca de los ahorros de energía que pueden esperarse al hacer un reajuste nocturno basado en la localización y el tipo de construcción del edificio.

**AHORRO APROXIMADO POR REAJUSTE NOCTURNO
BASADO SOBRE 10° DE RETROAJUSTE PARA 12 hr/día
Y 42 hr/semana**



EJEMPLO:

Una compañía de Georgia Central tiene un edificio con paredes de construcción tipo medio y con poca área de vidrio. En el sistema de calentamiento, en las noches durante el invierno, el termostato es colocado a 22.2°C. Los costos de energía por calentamiento son de \$ 8,000 por año. ¿Qué ahorro se logrará al instalar un sistema de reajuste en el edificio?

Con base en el gráfico, este tipo de operación podrá reducir la energía de calentamiento arriba del 40% con un reajuste del 10°F.

Esto originará un ahorro aproximado de \$ 3,100 por año. El costo del sistema de reajuste podrá recobrase posiblemente durante la época cálida del verano.

FIGURA 5.7

que detiene el contador y hace funcionar solamente el sistema de calentamiento para mantener así una temperatura mínima. Los tiros de aire exterior deben mantenerse cerrados durante este período. En la gráfica 5.7 se presenta un método para obtener, aproximadamente, los posibles ahorros de energía por medio del retroajuste nocturno de las temperaturas ambientes.

Hay a disposición controladores de ciclaje de carga que desconectan automáticamente el equipo por un período de tiempo determinado dentro de intervalos de 30 a 60 minutos. Por ejemplo, el ciclo de una unidad puede desconectarse por 10 minutos en cada período de 30 minutos. Esta técnica es más efectiva cuando el equipo es de gran tamaño y cuando se trata de un gran número de unidades. Muy a menudo el ciclaje no es ni siquiera advertido por los ocupantes del edificio. Cabe esperar un mayor desgaste en las tracciones y fajas como consecuencia de un mayor número de arranques del equipo.

5.11 CONTROL DE CICLO ECONOMIZADOR

Los dos métodos más comunes de control de cambio de ciclo economizador son el control de bulbo seco y el control de entalpía. A continuación se consideran las ventajas y desventajas de cada uno.

En el pasado, los economizadores de bulbo seco se diseñaban para un cambio al 100% de aire exterior cuando la temperatura del aire exterior llegaba a la temperatura del aire de alimentación para el enfriamiento. En este punto, debe quedar interrumpido el equipo mecánico de enfriamiento y todo el enfriamiento es provisto por el aire exterior. La temperatura de cambio para un sistema de este tipo puede estar en un intervalo de 13°C a 15.5°C (55 y 60°F). Sin embargo, se puede obtener un ahorro extra mediante la elevación del punto de cambio del ciclo del economizador a un punto tal en que, las más de las veces, el contenido total de calor, o mejor dicho la entalpía del aire exterior será menor que la entalpía del aire de retorno. Aunque se requerirá refrigeración mecánica hasta que la temperatura exterior no haya bajado a la temperatura del aire de

alimentación requerida, se reducirá la carga neta de refrigeración. El esquema de la gráfica 5.8 indica las áreas en que el aire exterior es y no es eficaz para reducir la carga total de enfriamiento. Adviértase que la selección del punto de cambio representa un compromiso basado en condiciones climáticas promedio.

El economizador de entalpía ha sido desarrollado en años recientes para determinar con más precisión el punto ideal de cambio. Estos controladores comparan la entalpía total del aire de retorno con la del aire exterior, y seleccionan una corriente de aire que proporcione la menor carga de refrigeración. La entalpía se determina a partir de medidas de la temperatura de bulbo seco y la humedad relativa tanto del aire exterior como del aire de retorno. Ya que se requieren cuatro mediciones en vez de una, es sumamente importante el ajuste y la calibración del controlador de entalpía a fin de obtener el máximo beneficio.

Las gráficas 5.9 y 5.10 representan, en forma esquemática, un ciclo economizador de entalpía. Se estima que el control de entalpía del ciclo economizador dará aproximadamente un ahorro extra del 7% en comparación con el del controlador de ampolleta seca.

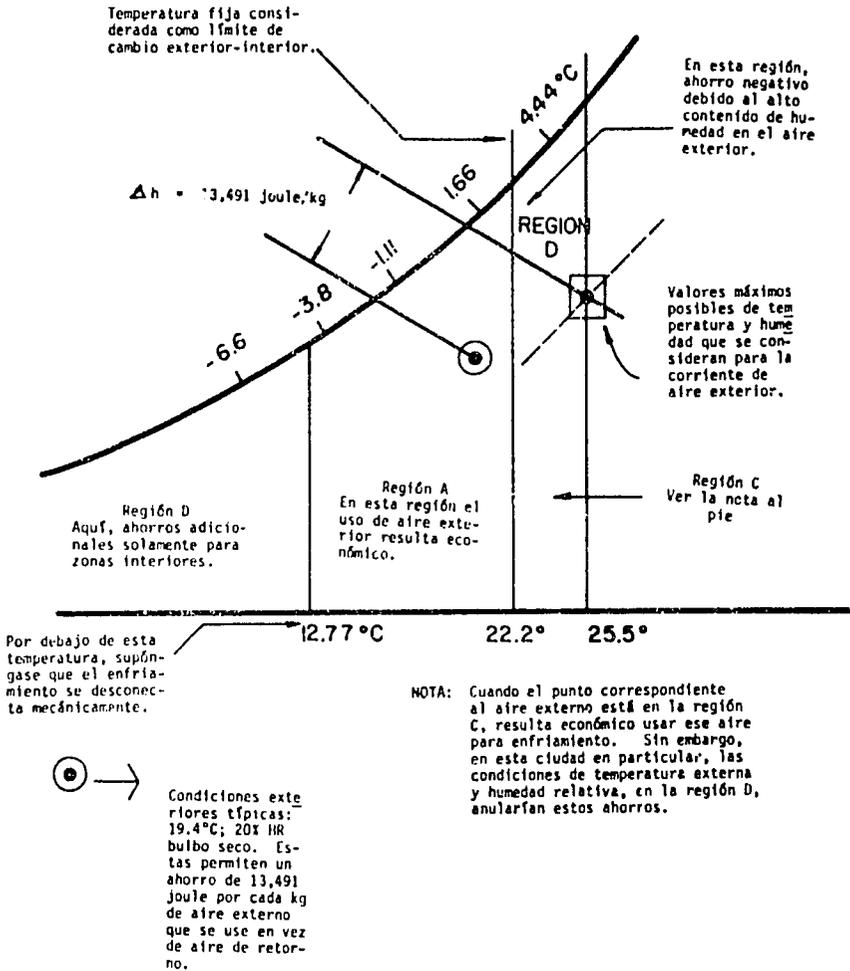


FIGURA 5.8: ECONOMIZADOR DE BULBO SECO

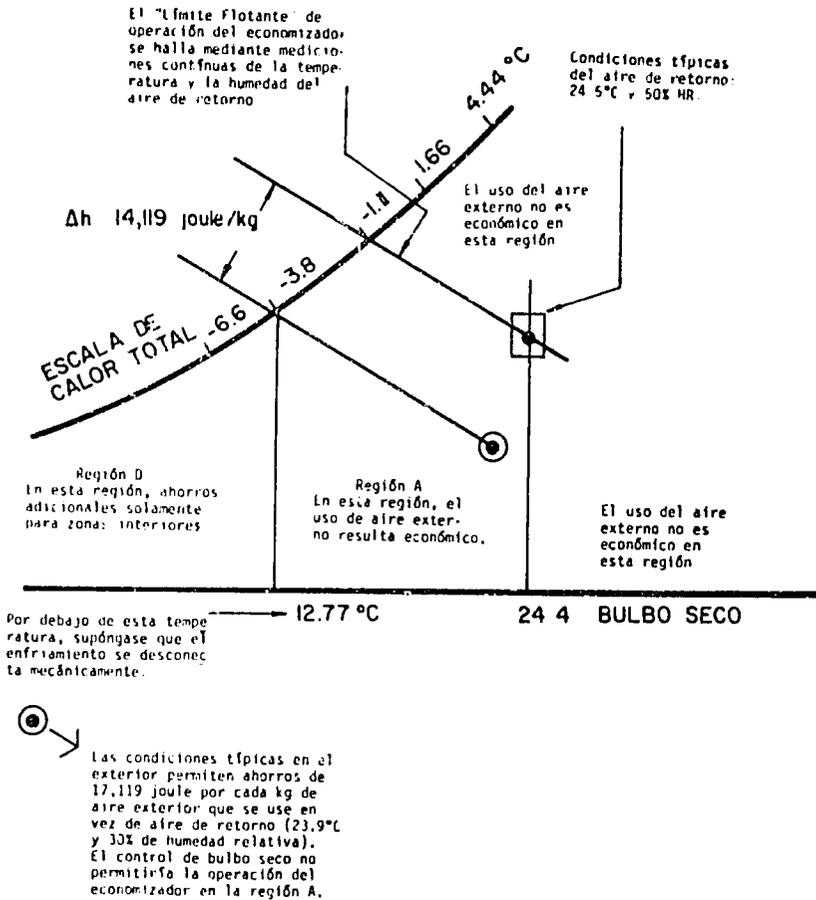
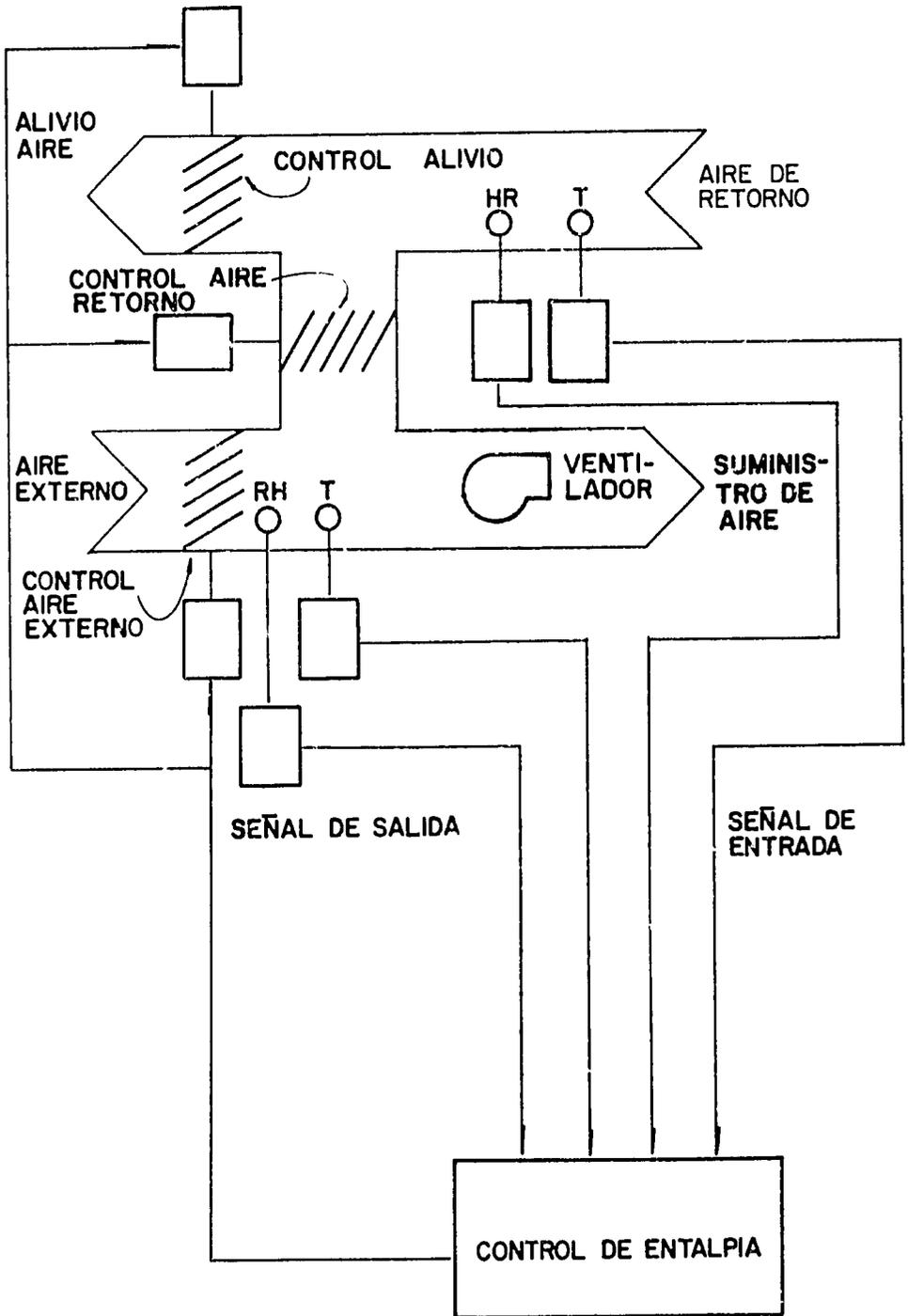


FIGURA 5.9: ECONOMIZADOR DE ENTALPIA



CONTROL ECONOMIZADOR DE ENTALPIA
FIGURA 5.10

6. EQUIPO PARA PROCESADO

Las oportunidades de conservación de energía en la maquinaria de producción pueden separarse en tres clases:

- Mejora de la eficiencia del equipo
- Control del proceso
- Reducción de pérdidas de artículos producidos

Cuando se logra reducir la producción de polvo, las fugas y las pérdidas por derrames, se pueden lograr beneficios que van más allá de la propia recuperación de los costos incurridos en producir los materiales desperdiciados. Los derrames o las pérdidas de polvo provenientes de fajas conductoras defectuosas exigen trabajos de limpieza, crean condiciones de peligro, amenazan la salud de los trabajadores y producen una diseminación excesiva de partículas contaminantes.

El adecuado control de los procesos industriales es esencial para la conservación de la calidad de los productos y para optimizar las tasas de producción. Además, si se instalan instrumentos de control para los procesos, se pueden obtener ahorros de energía considerables, tales como controles en trituración y secado.

Es muy usual que los parámetros de producción que garantizan la calidad de los productos, sean determinados con un factor de seguridad. Esta costumbre conduce casi siempre a un excesivo consumo de energía y, por lo tanto, al aumento del costo unitario del producto. A continuación se examinan algunos campos en los cuales la mejora del control de producción puede originar importantes ahorros de energía.

La técnica que evidentemente resulta adecuada para reducir el consumo de energía en los procesos industriales, es mejorar la eficiencia energética de la maquinaria. En los últimos años se han logrado mayores rendimientos en motores, transmisiones, compresores, bombas, etc. Muchas veces

es posible, con poca inversión, mejorar el rendimiento de los equipos ya existentes. Junto con nuevos tipos de accesorios y equipo de acondicionamiento para optimizar el uso de la energía eléctrica, se examinarán más adelante las técnicas de mantenimiento, carga y control para el equipo industrial.

6.1 COMPRESORES

En una sección posterior se desarrollará una ecuación exacta para la potencia suministrada a un compresor. Preliminarmente, consideraremos que la potencia necesaria es proporcional al caudal de aire y al aumento de presión.

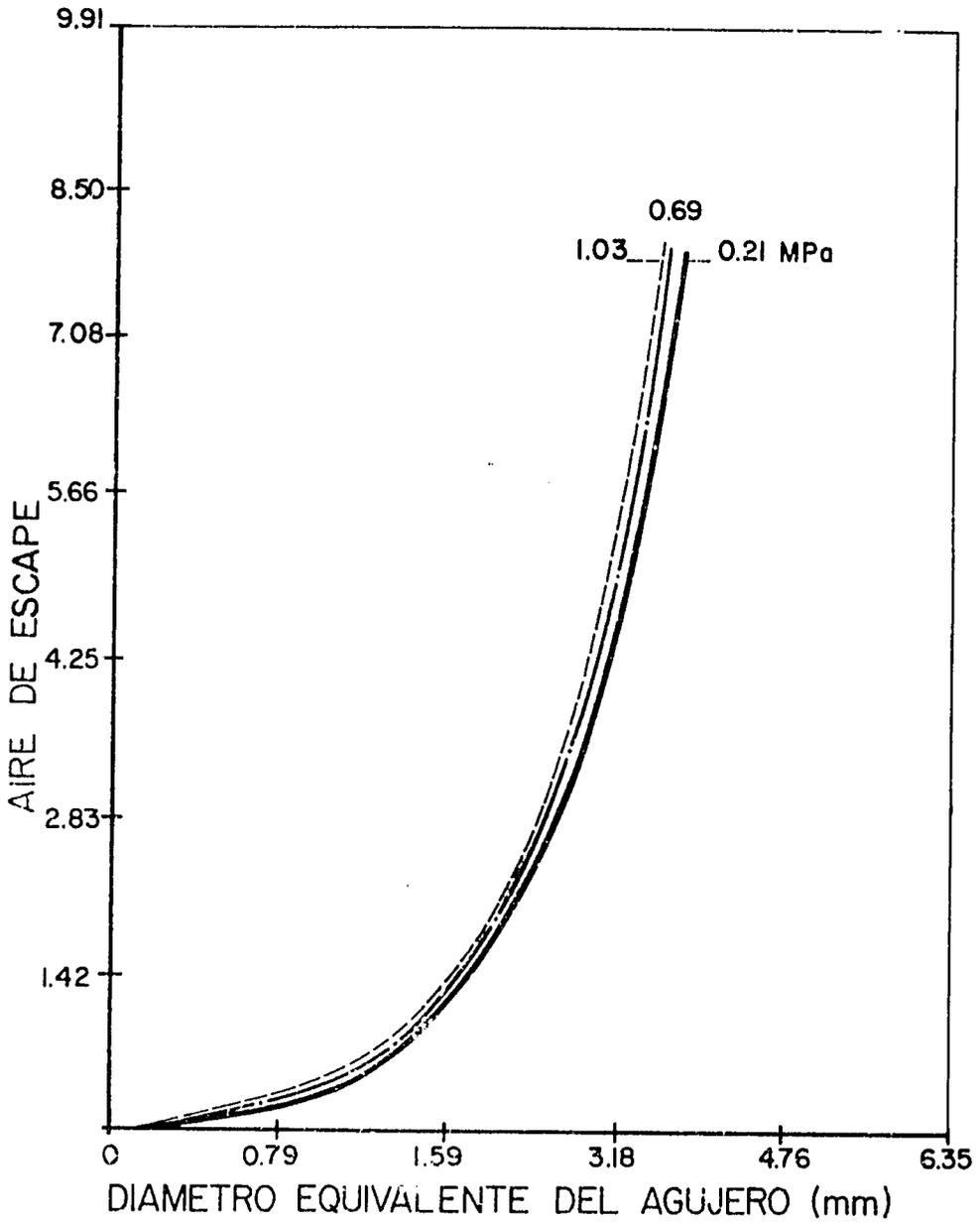
$$P \cong Q \times (P_2 - P_1) \quad (1)$$

El caudal Q y el aumento de presión dependen del diseño del equipo y de las condiciones de operación, en particular de la velocidad de rotación. De la ecuación (1) resulta que la demanda de potencia puede reducirse mediante la reducción del caudal o la reducción de la diferencia de presiones. Es de hacer notar que estas dos variables y la eficiencia del sistema, por regla general, son independientes, pero la tendencia general de la ecuación (1) se considera aproximadamente válida.

6.2 MEDIDAS DE MANTENIMIENTO

El caudal total que circula en los compresores de aire es una función de la carga del equipo, más las fugas. Las fugas de aire comprimido son la mayor y más importante fuente de desperdicio de energía en la mayoría de los sistemas de aire comprimido. El volumen de pérdidas aumenta con la presión y las horas de operación del sistema.

La figura 6.1 revela que un agujero de 1.6 mm (1/16 pulgada) de diámetro con 7 kg/cm² (100 psig) de presión desperdicia 1.4 m³ (50 pie³) de aire por hora. Debe notarse que las pérdidas de aire aumentan en función directamente proporcional al cuadrado del diámetro del agujero.



**ESCAPE DE AIRE COMPRIMIDO
CONTRA DIAMETRO DE FUGA**

FIGURA 6.1

La figura 6.2 muestra la curva teórica equivalente a la potencia requerida por un compresor por cada 2.83 m³ de aire por minuto (100 pies cúbicos de aire por minuto) contra la presión de servicio; esta gráfica está basada en aire que entra a 21 °C (70 °F) y 98.1 kPa (14.7 psig) y se trata de una máquina de una etapa, sin fricción, cuyo modelo operativo es un proceso politrópico (las demandas de potencia de un compresor se discutirán con más detalle en una sección posterior).

El costo que representan las fugas puede encontrarse multiplicando la cantidad de aire desperdiciado, por la energía necesaria para comprimirlo a la presión del sistema y por el costo de esa energía:

$$\text{\$CA} = \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \times \frac{\text{kW}}{\text{m}^3/\text{min}} \times t \times \frac{\text{\$CA}}{\text{kWh}} \quad (2)$$

Este procedimiento para calcular el desperdicio de energía tiene el inconveniente de ser indirecto e inexacto, ya que hay que estimar el número y el tamaño de las fugas. Un método más exacto consistiría en cronometrar el ciclaje de servicio del compresor (o compresores) necesario para mantener la presión en el sistema con todo el equipo alimentador previamente desconectado en su totalidad. Esta prueba podrá hacerse durante horas que no sean de trabajo; las fugas de aire, por lo general, resultan más fáciles de hallar y reparar durante esas horas, ya que el ruido es solamente el producido por las fugas. La reparación de fugas es una operación sencilla y barata que debería ser parte rutinaria del mantenimiento, pero suele olvidarse. Un cálculo sencillo revela que una docena de agujeritos de 3 mm Ø en un sistema con presión de 686.7 kPa desperdicia potencia equivalente a \\$CA 23 700 por año, con un costo de \\$CA 0.08/kWh.

La lubricación correcta y el mantenimiento apropiado de las transmisiones, la limpieza y el reemplazo oportunos de los filtros de aire de succión son otras técnicas de mantenimiento que pueden originar economías de energía. Las pérdidas de presión ocurridas a través de filtros sucios causan una presión negativa en la cámara de succión y aumentan así el factor $P_2 - P_1$ de la ecuación (1).

POTENCIA DEL COMPRESOR CONTRA LA PRESION DE LINEA

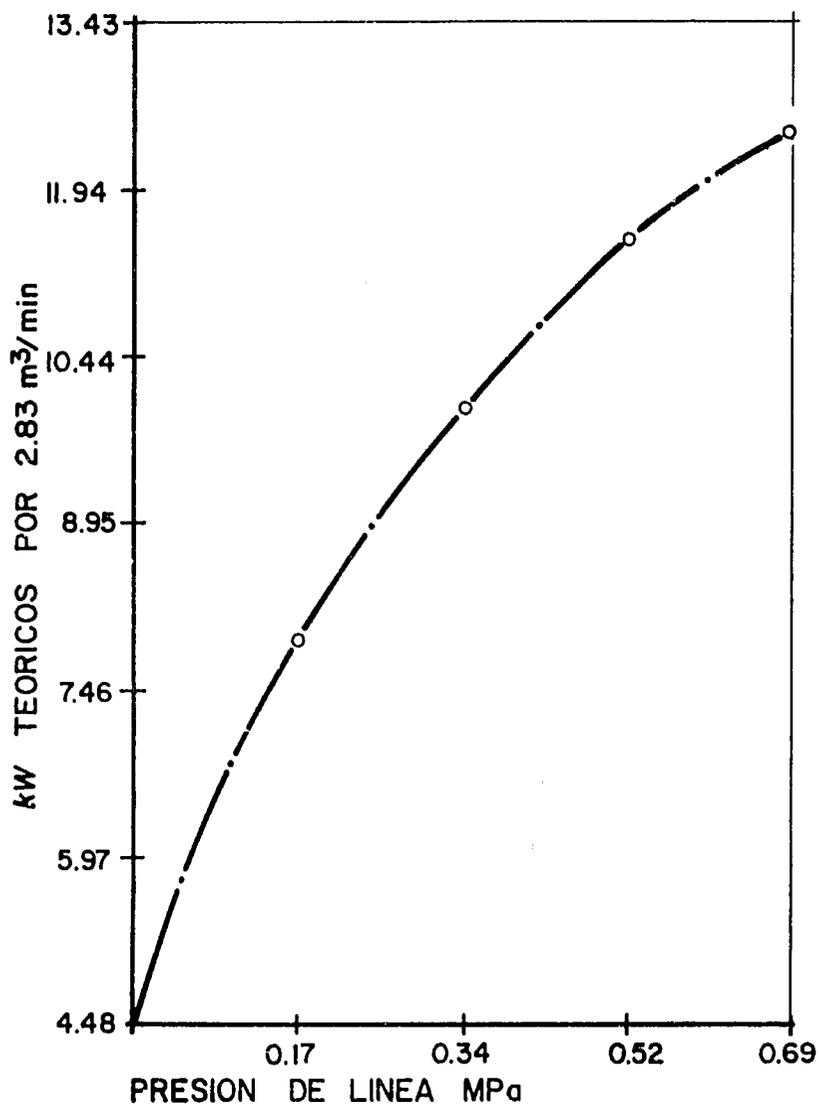


FIGURA 6.2

6.3 AJUSTE DEL EQUIPO Y PRACTICAS DE OPERACION

Retornando a la ecuación (1), resulta evidente que una segunda posibilidad de reducir el consumo de energía en los compresores es bajar la presión del sistema al valor mínimo necesario para satisfacer las demandas del equipo servido. El ajuste de presión debe hacerse un poco más alto que el que corresponda a las demandas del equipo, para compensar las caídas de presión que hubiere en las líneas de distribución. Estas caídas de presión son proporcionales a la longitud de las líneas y al cuadrado de la velocidad frontal del gas que se mueve dentro de ellas. La velocidad del gas, a su vez, es igual a:

$$v = Q/A = 4Q/\pi d^2 \text{ (para tuberías circulares)} \quad (3)$$

en donde:

A = área de la sección transversal de la tubería

d = diámetro interior de la tubería

Q = caudal

Las pérdidas por fricción en el sistema pueden reducirse colocando los compresores cerca de los puntos de mayor consumo, aumentando el diámetro de las tuberías de distribución y eliminando las fugas.

Conviene también examinar las posibilidades y las ventajas de instalar varios sistemas para varias presiones ya que, por lo general, son pocos los equipos que demandan altas presiones de aire. La figura 6.2 muestra la reducción de la demanda de potencia al reducir los intervalos de presión.

Aunque no se considera en la ecuación (1), el rendimiento global del proceso de compresión de aire depende de varios factores, incluidos el diseño de compresor y la temperatura del aire de succión. Por lo general, los compresores industriales se configuran termodinámicamente según el

modelo de un proceso politrópico, es decir, un proceso intermedio entre un adiabático y un isotérmico en el cual $P \cdot V^n$ es constante. P es la presión, V es el recíproco de la densidad (volumen específico) y n es un exponente cuyo valor varía entre 1.0 (caso isotérmico) y 1.4 (caso adiabático). Debido a que el proceso de compresión ocurre más o menos rápidamente, la transmisión de calor al bastidor del compresor es pequeña y n tendrá un valor mucho más cercano al límite 1.4.

Un valor estimado razonable para n es 1.35 para máquinas con camisas refrigeradas o con aletas alrededor de las cajas o cilindros. El trabajo teórico que debe suministrarse en un proceso de compresión politrópico está dado por la ecuación siguiente, si se supone que el aire se comporta como un gas ideal.

$$W = \frac{n R T_1}{1 - n} \left[(P_2/P_1)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \quad (4)$$

donde: R = gas constante para el aire = 287 J/kg K
 T_1 = temperatura del aire de succión, en K
 W = trabajo teórico suministrado, en J

substituyendo R y n en la ecuación (4), se obtiene:

$$W = -1106 T_1 \left[(P_2/P_1)^{0.259} - 1 \right] \quad (5)$$

El signo negativo de la ecuación (5) puede soslayarse, ya que solamente es una notación convencional para indicar que se trata de trabajo suplido; esto es en contraposición al trabajo entregado (al que correspondería el signo +) como el que produce una turbina o un motor de pistones. Un examen de las ecuaciones (4) y (5) revela que el trabajo total suplido, por libra de aire comprimido, aumenta con la temperatura del aire de succión, por lo que es fácil concluir que las tomas de aire de succión deben instalarse fuera del ambiente donde se encuentra el compresor. Aproximadamente, se puede lograr una reducción de W en un 1 % por cada 2.778 °C de

reducción de la temperatura de aire de succión. Este hecho se aprovecha en los compresores de etapas, en los cuales el aire comprimido por la primera etapa es enfriado mediante un intercambiador antes de pasar a la segunda etapa de compresión. La condición con la que se logra el máximo rendimiento en un compresor de dos etapas, es que se cumpla $P_i = (P_1 - P_2)^{0.5}$, en donde P_i es la presión intermedia, es decir, la presión en el intercambiador de calor o enfriador.

6.4 TIPOS DE COMPRESORES Y SUS RENDIMIENTOS

Hay numerosos tipos de compresores de aire o gas que se utilizan generalmente en la industria. Los tipos más comunes son:

- compresor recíprocante,
- compresor centrífugo,
- compresor de tornillo, y
- compresor de deflector deslizante.

Los fabricantes de todos estos tipos de compresores han logrado en los últimos años importantes progresos en el incremento del rendimiento energético. Mediante mejoras en los cojinetes, sellos, válvulas y reducción de tolerancias, se ha logrado reducir las pérdidas por fricción, fugas y a-livio. Para mejorar el rendimiento de los compresores que funcionan con carga parcial, se están desarrollando transmisiones de velocidad variable, derivaciones de precompresión de control por estrangulamiento parcial del aire de succión y por operación de válvulas de descarga. Debido a que la mayoría de los compresores funcionan con carga parcial, arrancando y parando, se puede acomodar su ciclaje para reducir la demanda eléctrica y, junto con los métodos indicados anteriormente, se pueden alcanzar ahorros apreciables.

6.5 BOMBAS

Los principios de operación de las bombas son muy semejantes a los que gobiernan a los compresores, con la única diferencia de que las bombas

se utilizan para mover agua u otros flúidos casi incompresibles.

Esencialmente las bombas se fabrican con las mismas configuraciones que los compresores, así: reciprocantes, axiales y centrífugas; este último tipo es el mas empleado en los procesos industriales.

Independientemente del tipo de bomba que se use, la ecuación (1) es también válida para calcular la potencia teórica para el bombeo que se necesita para mover una cantidad dada de agua contra una carga de presión estipulada. En los sistemas de bombeo para líquidos, la carga de presión proviene principalmente de dos fuentes: por una parte, las pérdidas por fricción en la tubería, en las válvulas y en los accesorios y, por otra, la altura a que debe elevarse el líquido.

En los circuitos cerrados solamente las pérdidas por fricción tienen importancia, ya que la carga de altura (carga estática) en la línea de retorno compensa la presión requerida para bombear el líquido a la parte alta del sistema de tuberías. En los sistemas abiertos, por ejemplo en torres de enfriamiento o en bombas sumergidas, debe suministrarse potencia para vencer la carga estática además de las pérdidas por fricción. Poco puede hacerse en lo que refiere a la potencia para vencer las cargas estáticas, pero sí es posible lograr economías en la potencia necesaria para vencer las pérdidas por fricción.

Las pérdidas por fricción obedecen a las mismas ecuaciones de los factores de Darcy que se emplea para los gases:

$$h = f \cdot \frac{L \cdot V^2}{2dg}$$

donde:

- h = pérdida de carga de presión, en metros
- f = factor de fricción (tubería y accesorios)
- L = longitud total de la tubería en metros

- d = diámetro interior de la tubería en metros
 g = aceleración de la gravedad en m/s^2
 v = velocidad del frente del fluido en m/s

Puede verse que con sólo la duplicación del diámetro interior de la tubería es posible reducir las pérdidas por fricción a 1/32 parte para un caudal dado. Al diseñar un sistema nuevo de tuberías o uno de reemplazo, se recomienda tomar en consideración la importancia relativa de los costos de la tubería y los costos del bombeo.

6.6 MANTENIMIENTO

Hay varios factores relacionados con la operación y el mantenimiento que afectan el consumo de energía en sistemas de bombeo. El programa de mantenimiento deberá permitir que se realicen verificaciones periódicas del rendimiento del sistema para hacer las correcciones que fueren necesarias.

Algunos de los aspectos que deben verificarse son:

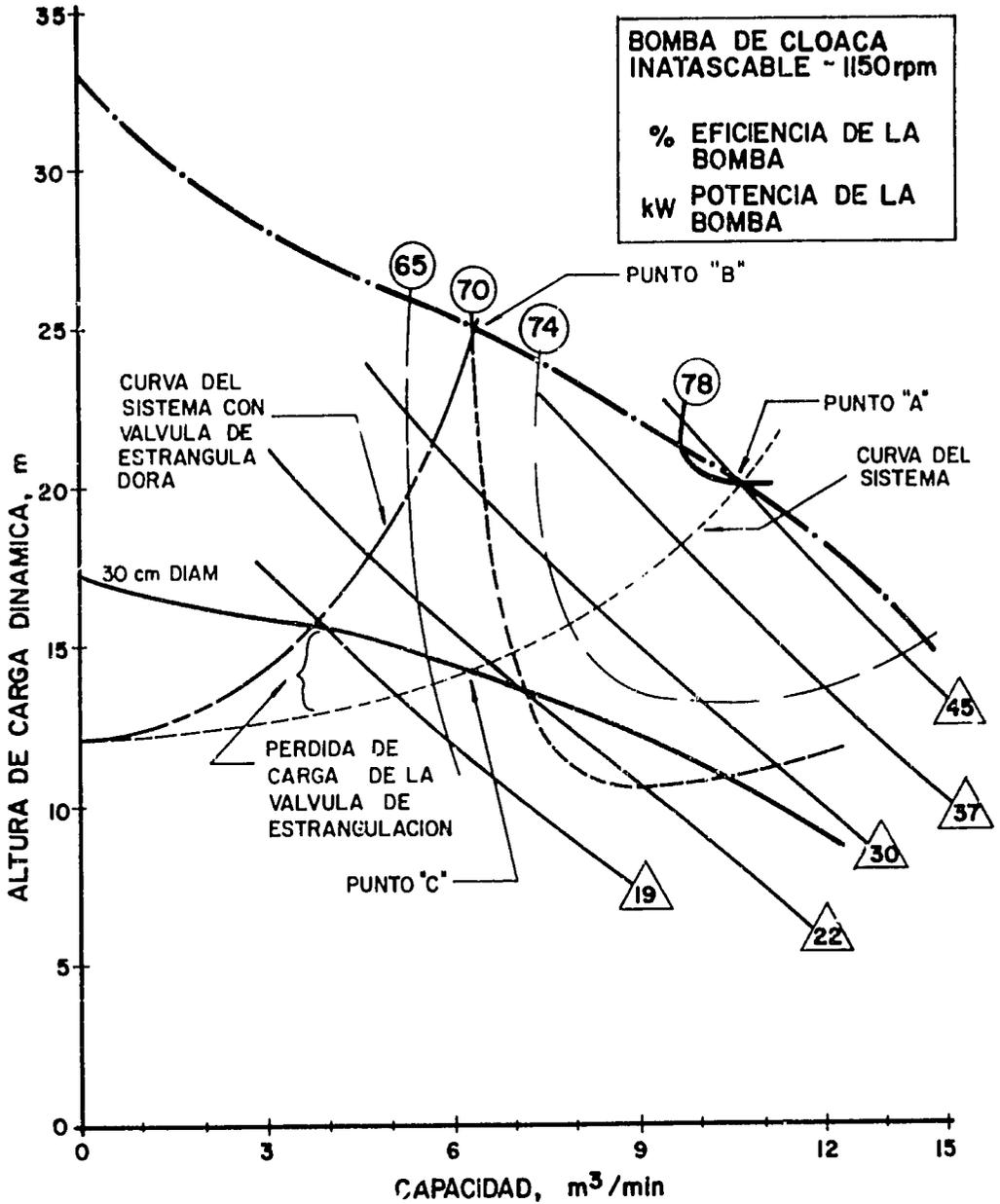
- Obstrucciones en las válvulas, tuberías y bombas, que pueden obligar a hacer una limpieza general.
- Desgaste de impulsores y cuerpo de la bomba que ocasionan disminución de la eficiencia hidráulica.
- Alineamiento entre motor y bomba que ocasionan desgaste prematuro del eje, daños en los cojinetes y mayor consumo de energía de hasta un 5% sobre el consumo nominal.
- Ajustes de tiempos de ciclaje (arranque y parada) que son motivo de trabajo innecesario y que frecuentemente sólo aumentan los costos de energía y aumentan el desgaste de los elementos de bombeo.

6.7 OPERACION Y CONTROL

Para mejorar el rendimiento energético de un sistema de bombeo hay varios ajustes cuyo costo es bajo o a veces nulo. Las características de las bombas centrífugas normalmente son semejantes a las que se muestran en la gráfica 6.3 que indica que, para una bomba y un impulsor determinados, el caudal y el consumo de energía disminuyen en tanto que la carga de bombeo aumenta. Tal como lo demuestra la gráfica, el cierre parcial de la válvula de descarga de la bomba crea una carga artificial como consecuencia de la cual se mueve el punto que representa la operación de la bomba sobre la curva, desde "A" a "B". Ajustes como éste pueden hacerse para períodos de poca demanda del fluido; sin embargo, es necesario asegurarse de que las válvulas no han sido cerradas por completo y que cierren la tubería o que las velocidades del fluido en las tuberías sean tan bajas que permitan la sedimentación de sólidos contenidos.

Es importante notar que ésta es una forma de control bastante ineficaz a pesar del ahorro en potencia, ya que se reduce el caudal mediante el estrangulamiento, y aumenta así en más o menos 10.34 m la carga dinámica, mientras que el nivel de rendimiento de la bomba disminuye de un 78% a un 70%. La potencia de bombeo se reduce de 60 hp a 48 hp o sea un 20%, para una reducción del 43% en el caudal.

Existen otros métodos para reducir la energía de bombeo, entre ellos: modificaciones en la bomba, cambios en el número de bombas y cambios en la velocidad de cada bomba. Si una bomba ha de trabajar a una fracción de su capacidad durante largo tiempo, es posible economizar energía instalándole un motor más pequeño. Tal como lo muestra la figura 6.3 en el punto "C", este método reduce el flujo de la misma forma que el estrangulamiento, pero reduce el consumo de energía en mayor medida. A continuación se muestra una tabla comparativa basada en el caso que muestra la figura 6.3.



EFFECTOS DE ESTRANGULAMIENTO Y AJUSTE DEL IMPULSOR DE BOMBAS EN LA DEMANDA DE POTENCIA.

FIGURA 6.3

Comparación del consumo de energía con caudal reducido

ESTADO	Flujo gpm	Rendimiento de la bomba %	Potencia suministra- da a la bomba kW	Potencia suministra- da al motor kW
Diseño nominal (Punto "A")	2 800	78	45	49
Descarga estrangulada (Punto "B")	1 600	70	36	40
Impulsor pequeño (Punto "C")	1 600	67	22	25

La manera más eficiente y flexible de variar el régimen de bombeo, reduciendo la demanda de energía, es controlar la velocidad de la bomba. Esta velocidad puede controlarse de varias formas según las condiciones de bombeo y el grado de automatización que se desea. Los métodos simples y variables consisten en el cambio del tamaño de las poleas de transmisiones por fajas, o en el cambio por motores de velocidad variable más bajas que la velocidad nominal.

En la medida en que se desee una mayor flexibilidad, se pueden usar transmisiones de poleas con ajuste manual o transmisiones controladas electrónicamente. Con estos métodos sólo es necesario que los operadores hagan girar una manija, pulsen un botón, o ajusten un dial para variar la velocidad.

La figura 6.4 muestra el efecto de un cambio de velocidad en el consumo de energía para una bomba centrífuga. Se advierte que la reducción de la velocidad de la bomba más que demandar un diámetro menor del impulsor, permite el uso de más rendimiento de impulsores de tamaño original, y permite al mismo tiempo que la capacidad de bombeo puede ser aumentada en forma rápida y sencilla. La operación a baja velocidad ayuda a prolongar la vida útil de la bomba.

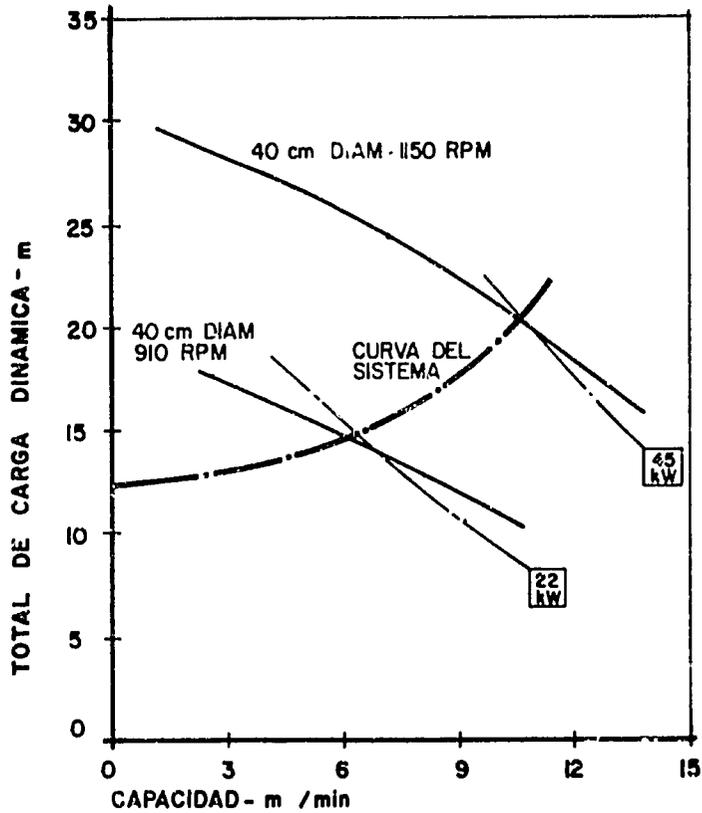


FIGURA 6.4 EFECTO DE LA REDUCCION DE VELOCIDAD EN EL REQUERIMIENTO DE POTENCIA PARA BOMBAS

El paso siguiente en la escala de flexibilidad y control es el bombeo a velocidad variable. En este tipo de bombeo, la velocidad de la bomba se regula automáticamente, ya sea por variación la velocidad del motor o bien mediante una tracción intercalada entre motor y bomba. La velocidad se controla para variar el flujo de la bomba según una característica variable escogida, tal como el nivel de agua en un pozo o la presión de descarga. Este método es muy flexible y capaz de dar ahorros significativos de energía. Sin embargo, es necesario tomar en cuenta algunos aspectos importantes que, en última instancia, podrían anular los ahorros previstos, tales como: pérdida de rendimiento en la transmisión de velocidad variable; costo inicial de la transmisión y del sistema de control; y aumento del costo por mantenimiento de la transmisión y de los sistemas de control.

No todas las bombas tienen las mismas características como las descritas para las bombas centrífugas. Las bombas de propulsor o de flujo axial se caracterizan porque, por regla general, requieren más potencia cuando se aumenta la altura de descarga. Las demandas de potencia para bombas de desplazamiento positivo varían casi en proporción directa a la presión de descarga.

Los ahorros de energía se pueden lograr en mejor forma mediante la variación de la velocidad de la bomba, en especial para las bombas de desplazamiento positivo. Casi todos los métodos de variación de velocidad discutidos anteriormente se pueden aplicar eficazmente a las bombas de desplazamiento positivo. Con frecuencia las bombas pequeñas de desplazamiento positivo traen incorporadas dispositivos graduados para controlar, ya sea la longitud o la duración de la carrera del pistón de bombeo. Los ajustes que estos tipos de bombas requieren son fáciles de hacer, se realizan rápidamente, ya sea en forma manual o automática. Se puede disponer de un regulador de tiempo ajustable para controlar los períodos de operación y los intervalos de desplazamiento del émbolo de la bomba.

Es posible lograr ahorros de energía, si la carga de bombeo se distribuye entre un sistema de varias bombas que opera solamente la cantidad de ellas que sea necesaria para el manejo del flujo requerido. Una técnica que a menudo se deprecia es el uso de motores de combustión interna para accionar bombas centrífugas y bombas de desplazamiento positivo. El ajuste de la velocidad de estos motores puede ser manual o por medio de un estrangulador, o automática merced a un gobernador. Esta técnica bien empleada suministra ahorros apreciables.

6.8 EQUIPO DE TRITURACION Y MOLIENDA

Las operaciones de trituración y molienda son muy comunes en los procesos industriales; para ello se usan equipos de diferentes tamaños y modelos. La trituración, independientemente del material procesado, se realiza mediante uno o más de los tres siguientes mecanismos: compresión, impacto y corte. El tipo de triturador y la combinación de los mecanismos de trituración se eligen según el material que se triturará, su tamaño original, el tamaño final, las características de los gránulos y otras cuestiones.

Las oportunidades de ahorrar energía en este tipo del equipo deben buscarse principalmente en el campo de los procedimientos operativos y de los procesos de control. Es además necesario dar un mantenimiento adecuado al equipo para conservar su rendimiento y su vida útil en valores elevados.

Uno de los métodos más simples para mejorar el rendimiento de trituración y molinos es optimizar la operación de carga del equipo. Todas las máquinas tienen una velocidad de proceso, propia de su diseño, con la cual operan más eficientemente. Esto es debido a que toda máquina tiene algunas pérdidas que consumen cantidades fijas de energía, independientemente de la carga; como ejemplo de estas pérdidas se pueden citar la fricción, la potencia para ventilación, las pérdidas en las transmisiones, la potencia para bombear los lubricantes, etc. Cuando las máquinas se hacen trabajar con cargas parciales estas pérdidas fijas representan proporcionalmente un rubro importante en los consumos de energía por tonelada

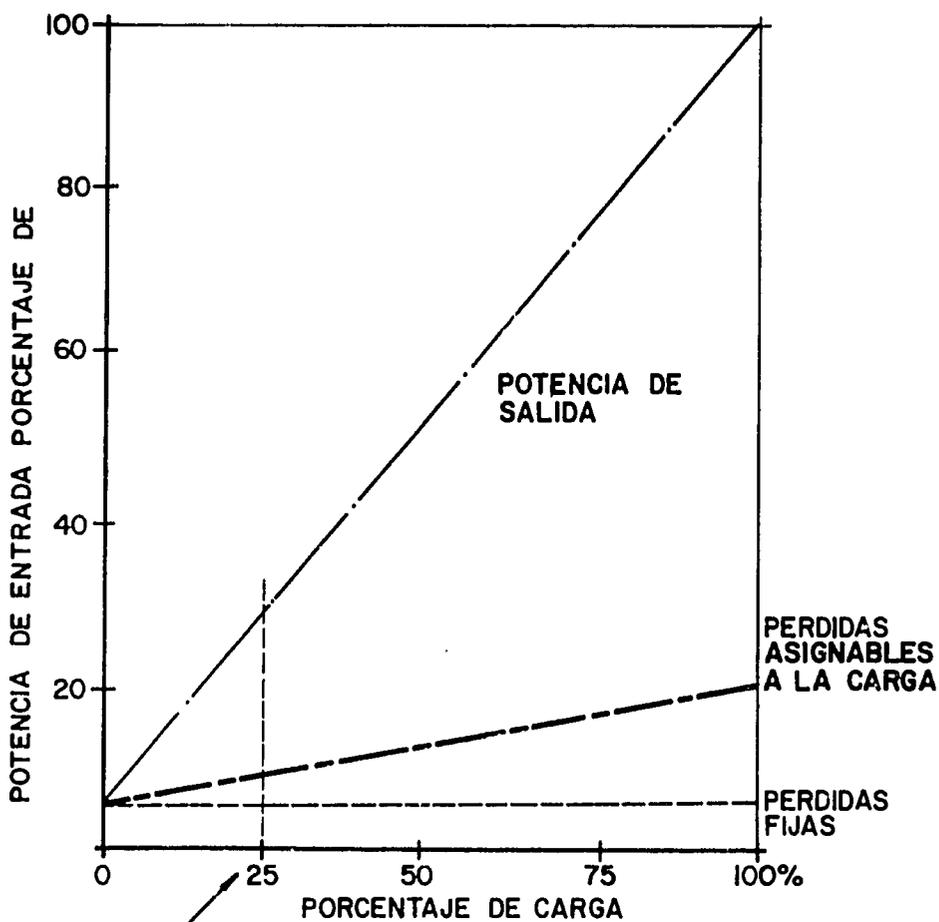
producida en los procesos de triturado. La figura 6.5 muestra objetivamente estas consideraciones.

No es posible parar y arrancar frecuentemente la maquinaria grande para acomodarla a breves interrupciones en el suministro de materia prima; pero una máquina que opera en neutro puede consumir enormes cantidades de potencia, en especial si se trata de molinos de trituración que consumen grandes cantidades de energía para ventiladores que secan y clasifican. En muchas operaciones mineras los trituradores primarios y las fajas transportadoras trabajan continuamente mientras que los camiones o los cargadores frontales llegan hasta el triturador y echan en él tandas de roca o arcilla; como consecuencia, los tiempos muertos llegan a representar hasta un 50% o más, y por otro lado, ocurren tremendas variaciones de carga (desde carga nula hasta sobrecarga) que sobreesfuerzan el triturador y el motor y que pueden causar demandas muy altas en las líneas de suministro eléctrico, lo que a su vez afecta adversamente a otros equipos de la planta.

Otro campo en el que se puede mejorar la eficiencia de la molienda es la mejora de los procesos de control para evitar que el producto sea sobreprocesado. Son varios los factores que determinan la cantidad de energía que se requiere para reducir una partícula a un tamaño estipulado, pero se pueden considerar divisibles en dos categorías. La ley de Kick, que se aplica a partículas grandes, consiste en el enunciado de que el trabajo invertido es proporcional a la reducción de volumen de las partículas. Por otra parte, la teoría de Rittinger postula que la energía para molienda es proporcional a la superficie total de los nuevos granos formados y, por lo tanto, proporcional al porcentaje de reducción del diámetro de las partículas.

En vista de que no ha existido un método rápido y exacto para medir el tamaño del producto, la mayoría de las compañías sobremuelen para tener la seguridad de que así exceden los requisitos.

**FIGURA 6.5 EFICIENCIA DEL MOLINO
CONTRA CARGA**



A 25% de carga, use el 14% de la potencia de entrada para pérdidas fijas.

A 100% de carga, use solamente el 5% de la potencia de entrada para pérdidas fijas

Esta costumbre puede resultar muy cara, ya que el molido es un proceso que consume mucha energía. Las demandas de energía para el molido final pueden aumentar un 50% más por la práctica del sobremolido, según la forma de la curva granulométrica del producto. También resulta enormemente aumentado el costo final del producto cuando se produce un exceso de finos que no se usarán y/o de pérdidas de polvo.

Existen diversos procedimientos para medir la granulometría que van desde el tamizado y el filtrado hasta los sistemas continuos de discriminación de alta velocidad, que aprovechan la difracción óptica y el procesamiento de información por microcomputadoras. En aquellas plantas que usan grandes cantidades de energía para moler sus productos, tales como cementeras o procesadoras de piedra o minerales, se ha encontrado que aún los más complicados y modernos instrumentos resultan económicamente ventajosos y, por lo tanto, se usan sin reserva. Una planta cementera ha informado que pretende economizar US\$ 100 000 por año mediante un control estricto de sus procesos de molienda.

6.9 MANEJO Y TRANSPORTE DE MATERIALES

En las plantas industriales con frecuencia el total de la potencia consumida en los transportadores y elevadores de material asciende a varios cientos de kW. Los transportadores, por regla general, se instalan en ambientes hostiles tales como refrigeradores, hornos, cámaras de secado y en ambientes con gases corrosivos, suciedad, etc. También reciben poco mantenimiento y lubricación porque se acostumbra colocarlos en lugares con difícil acceso. La fricción y las fajas flojas que resbalan son responsables de una merma en el rendimiento de los transportadores, pero también pueden ser la causa de fallas prematuras en los motores.

Los transportadores funcionan generalmente en vacío o con cargas muy bajas, consumiendo así incontables kilovatios-hora. Tal derroche resulta innecesario, en vista de la disponibilidad y bajo costo de los sensores

de material, los reguladores de tiempo y bloques eléctricos existentes en el sistema. Dos dispositivos para evitar los frecuentes ciclos de parada y arranque de los transportadores a su operación al vacío son las transmisiones de velocidad variable para motores y los embudos o tolvas inclinadas.

Posiblemente la manera más eficaz de reducir el consumo de energía eléctrica en los transportadores es hacer tal distribución de la planta que éstos no sean necesarios. El equipo deberá situarse durante la etapa de planificación de tal manera que se reduzca a un mínimo el manejo de materiales. Cuando sea posible, se recomienda separar o tamizar los materiales cuando todavía están en el nivel de piso, para evitar que, innecesariamente, sean elevados a una instalación teniendo ya las dimensiones finales requeridas (y que generalmente son la mayor parte en estos procesos), para que finalmente caigan por gravedad otra vez al nivel del piso. La atención que se preste a los detalles durante la etapa de diseño de la planta se pagará con las reducciones logradas en el consumo de energía, en costos de operación y mantenimiento, eliminación de los derrames de materiales y pérdidas.

6.10 SISTEMAS DE MANEJO DE AIRE

Por regla general se usan motores eléctricos de varios cientos de kW para hacer funcionar ventiladores que inducen corrientes de aire forzado en hogueras y hornos o que se usan para control de polvos o contaminación. En el capítulo relativo a los sistemas de ventilación y aire acondicionado, se incluye una discusión pormenorizada de las leyes que gobiernan los ventiladores y las medidas de conservación de energía correspondientes. Una lista simple de mejoras en los sistemas se da a continuación en el capítulo correspondiente.

Eliminar la infiltración

La potencia de un ventilador es proporcional al caudal de aire que circula por el sistema y a la caída de presión que el ventilador debe vencer; además la pérdida de presión causada por fricción en las tuberías, en las casas de filtros, etc., resulta ser proporcional también al flujo, de manera que las filtraciones de aire en un sistema de recolección de polvo pueden aumentar innecesariamente la potencia requerida por el ventilador.

Mantener limpias las tuberías

La acumulación de polvo o de hilachas en las tuberías reduce su sección transversal efectiva, aumenta la velocidad del frente de aire y eleva las pérdidas por fricción en el ducto; si se producen depósitos de polvo en las curvas, en los tramos horizontales largos o detrás de humidificadores o protuberancias, pueden llegar a obstruir prácticamente los conductos, después de un cierto tiempo, por lo que se producen grandes caídas de presión.

Cambiar los filtros con regularidad

Es muy frecuente que se instalen filtros para ventiladores de aire de combustión, y que luego se olviden, dando lugar a que las demandas eléctricas de los ventiladores de tiro forzado resulten ser más altas y que algunas veces se cause combustión ineficaz por falta de suficiente aire.

Usar transmisiones de velocidad variable

Las compuertas controlan el flujo de aire porque disipan la carga de presión del ventilador cuando el aire pasa a través de ellas. Por eso resulta mucho más eficaz reducir la velocidad de rotación del ventilador, ya que el flujo de aire es proporcional a esa velocidad, pero la potencia consumida por el ventilador es proporcional al cubo de la velocidad. Cuando se opera con volumen fijo es necesario ajustar la velocidad del ventilador cambiando la velocidad del motor o los diámetros de

las poleas. Cuando se trabaja con flujos variables conviene usar algunas de las distintas transmisiones de velocidad variable descritas en el capítulo 5.

Equipo para refrigeración

Los elementos que más consumen energía en los sistemas de refrigeración son los compresores y los ventiladores. Estos dos tópicos se desarrollan en el capítulo 5, que trata de ventilación y aire acondicionado.

7. INSTRUMENTACION

7.1 INTRODUCCION

El uso de la energía industrial se percibe a veces como un costo de producción invisible e incontrolable. En la mayoría de plantas industriales los únicos medidores instalados son los que indican el consumo energético del gas propano y el de la energía eléctrica. Si la energía utilizada por procesos individuales y por equipos puede medirse, ésta se hace tangible como una cantidad conspicua que puede controlarse. Es por esto que para establecer un programa efectivo de conservación de energía, es conveniente y necesario implantar métodos de medición.

7.2 MEDICIONES ELECTRICAS. VOLTIMETROS

Voltaje se define como la diferencia de potencial eléctrico que existe entre dos conductores. Utilizando una analogía práctica, se puede comparar con agua que fluye en una tubería. Voltaje es la medida del potencial o la habilidad para entregar electrones, así como la presión en la tubería del agua es el potencial contenido en el tubo para entregar esta agua.

Voltaje es el valor eléctrico más generalmente medido y los voltímetros son excelentes instrumentos para la búsqueda de fallas en equipos individuales, así como en todo el sistema de distribución de potencia en una planta.

Voltajes inadecuados en una planta pueden dar lugar a fallas prematuras del equipo, un rendimiento muy pobre, y cuentas más altas en la facturación de la energía eléctrica. Existe una gran variedad de voltímetros disponibles para uso industrial. En los siguientes párrafos se describe la operación e instalación de los voltímetros, sus principios de operación, y las opciones que existen en cuanto a

tipos de calidad.

7.2.1 Operación básica e instalación

Todos los voltímetros requieren la conexión de al menos dos cables o alambres al sistema que ha de medirse. Los instrumentos portátiles se suministran con cables flexibles y puntas de prueba para mediciones rápidas. Los voltímetros de tablero vienen equipados con terminales en la parte de atrás del instrumento para ser conectados permanentemente. Los voltímetros portátiles no están diseñados para un uso continuo y no deben alambirse permanentemente al sistema de potencia eléctrica.

Los voltímetros de Corriente Directa (CD) están marcados en sus terminales con los signos (+) y (-), o tienen cables codificados en colores, generalmente rojo para el positivo y negro para el negativo. Cuando se utiliza adecuadamente un voltímetro de corriente directa, es necesario asegurarse que la polaridad está correcta; una conexión equivocada puede resultar en la quemadura del fusible del instrumento o, aún peor, en el daño permanente del voltímetro. La conexión para los voltímetros de corriente alterna (CA) no requiere polarización alguna; sin embargo debe tenerse especial cuidado cuando se conecten a sistemas trifásicos, porque una conexión impropia de un voltímetro de una fase, al punto neutral, que se conecte entre las fases, puede dar como resultado la aplicación de un voltaje excesivo al instrumento, que puede dañarlo.

Los voltímetros para corriente directa y los diseñados para corriente alterna no son intercambiables. La aplicación de un voltaje de corriente directa a un voltímetro de corriente alterna, o viceversa, producirá una lectura incorrecta del instrumento. La conexión prolongada de un voltaje equivocado, puede dañar permanentemente al voltímetro. Algunos voltímetros que utilizan circuitos electrónicos

internos pueden cambiar automáticamente entre CA y CD.

Para lograr los mejores resultados, los voltímetros (y cualquier otro equipo de medición eléctrica) deben utilizarse de manera que el voltaje medido esté indicado en el tercio superior de la escala del instrumento. Debido a que el error del medidor es siempre un porcentaje de la escala total, el leer en el tercio superior de la escala, asegurará que el error efectivo sea el más bajo posible.

El voltaje puede medirse en los terminales de los cables que alimentan a un determinado equipo o "carga" eléctrica, tales como motores, lámparas, etc. estando éstos conectados o desconectados del sistema. Cuando se determine el voltaje aplicado a un equipo en particular, es recomendable que tal equipo esté conectado y funcionando normalmente. Esta condición asegurará que cualquier "caída de voltaje" asociada con la conexión del propio equipo se tome en consideración para la lectura del voltaje.

Cuando se opere un voltímetro, asegúrese de que se utiliza en la posición para la cual fue diseñado. La mayoría de instrumentos para tablero deben colocarse en posición vertical para que registren o midan correctamente; por otro lado, los voltímetros portátiles pueden operarse en posición vertical u horizontal. Los voltímetros que tienen indicación digital no son sensibles a la posición.

Los voltímetros que funcionan cerca de tableros de distribución de alta potencia, pueden verse afectados por el paso de corrientes por el tablero. Siempre que sea posible es conveniente que se instalen retirados de conductores que lleven alta potencia.

Los voltímetros portátiles utilizan indicadores que generalmente no están diseñados para operación continua. Una conexión prolongada puede generar suficiente calor dentro del instrumento que dañe partes

importantes del mismo. Es probable que no suceda una falla total del instrumento, pero el daño producido puede causar daños permanentes en su calibración.

Cuando se utilice un voltímetro de gamas o escalas múltiples, empíese la medición en la gama más alta, reduciéndose hasta lograr una lectura adecuada. Esta operación asegurará que el indicador no se dañe por una condición de voltaje en exceso.

7.2.2 Principios de operación

Virtualmente todos los voltímetros del tipo "analógico" (de carátula indicadora) utilizan uno de dos tipos comunes de "movimiento del medidor" (este término se aplica a la sección indicadora del instrumento). El galvanómetro "d'Arsonval" o movimiento de imán permanente y bobina móvil, es uno de los movimientos más utilizados en instrumentos indicadores. Este movimiento conocido como d'Arsonval es un sistema muy sensible a la corriente directa y su construcción se muestra en la figura 7-1.

Este consiste de una bobina montada en pivotes, sobre la cual está adherida una aguja indicadora y rodeada por un imán permanente. Una pequeña corriente (generalmente en el orden de microamperios) que pase por la bobina, producirá una atracción entre el núcleo de la bobina y el imán. Esta atracción causará la rotación del núcleo y el movimiento de la aguja indicadora. Los galvanómetros comunes necesitan corrientes muy pequeñas, entre 10^{-3} y 10^{-6} amperios para producir una deflexión completa de la aguja indicadora sobre la escala del instrumento. Esta situación hace que un galvanómetro sea muy limitado en aplicaciones prácticas tal como se ha descrito, pero combinado con otros componentes resulta un instrumento muy versátil.

El movimiento de lámina de hierro, tal como se muestra en la figura 7-2 es otro tipo común de "movimiento de medidores"; utiliza una

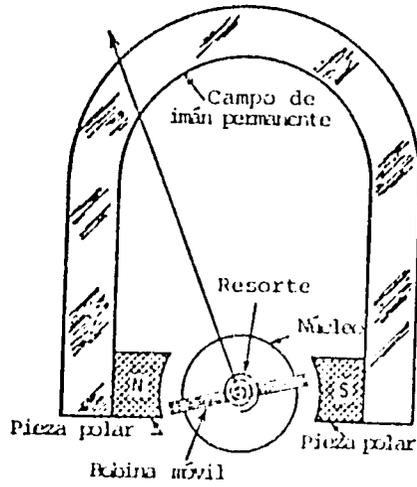


Figura 7-1. Galvanómetro D'Arsonval

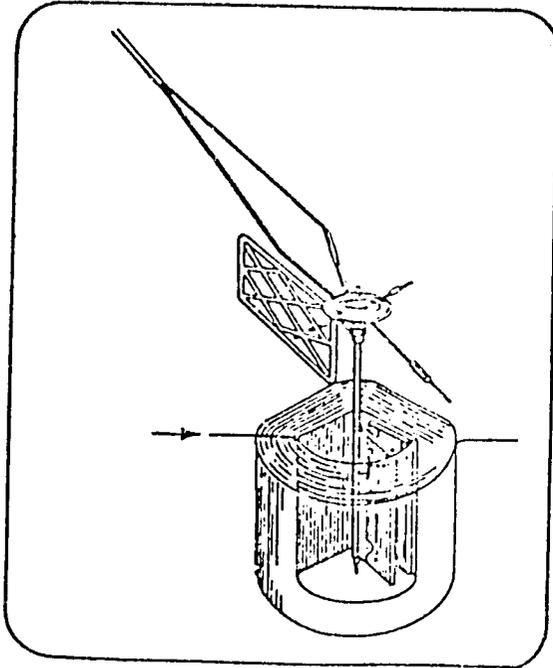


Figura 7-2. Galvanómetro de hierro móvil

bobina fija, una lámina de hierro estacionaria y otra móvil. La corriente que pasa a través de la bobina exterior produce una repulsión entre las láminas de hierro: la fija y la móvil. El movimiento de la lámina móvil (y la aguja indicadora) es proporcional al flujo de carga eléctrica. Este tipo de "movimiento" no es tan preciso como el de bobina móvil, pero es menos sensible a la humedad y a la vibración; se utiliza típicamente en la construcción de instrumentos que no son críticos, tales como voltímetros y amperímetros usados en cargadores de baterías.

7.3 VOLTÍMETROS DE CORRIENTE DIRECTA

El voltímetro de CD, en su forma más simple, consiste de un resistor (o resistencia) y un móvil sensible al paso de corriente. La figura 7-3 ilustra un esquema simple de un voltímetro de CD. El resistor, R , tiene un alto valor y la corriente que pasa por el medidor es pequeña; generalmente varios miliamperios (10^3 amperios). El movimiento de la aguja indica flujo de carga. Dado que la resistencia total del circuito del medidor es constante, la corriente que pasa por el circuito (y el movimiento de la aguja indicadora) es proporcional al voltaje medido.

$$V = I \times R_T$$

donde:

V = Voltios aplicados

I = corriente en el circuito del medidor

R_T = resistencia del circuito del medidor ($R + R_m$)

Para una R_T constante,

$$V \propto I$$

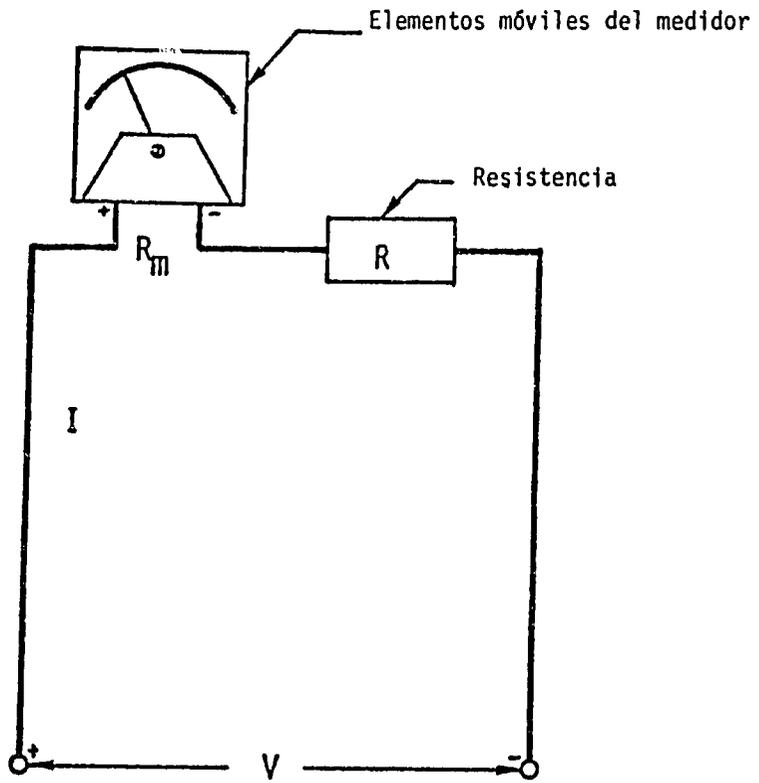


Figura 7-3. Voltímetro CD

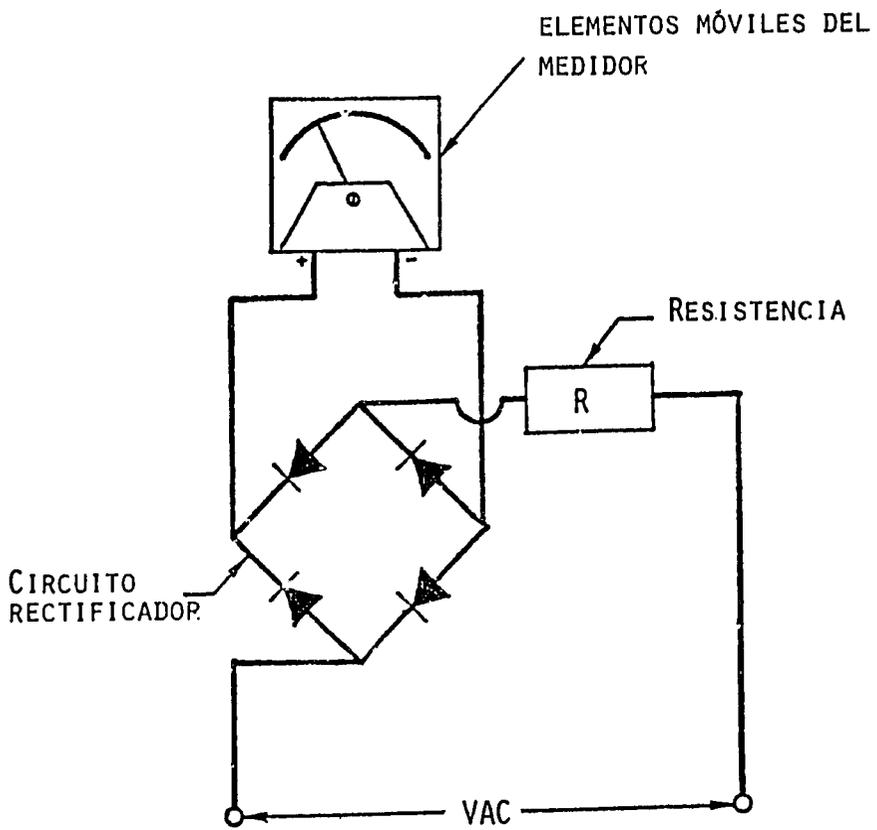


Figura 7-4. Voltímetro CA

7.3.1 Voltímetros de corriente alterna

La mayoría de los voltímetros de corriente alterna son similares a los voltímetros de CD, pero incluyen un circuito de 4 "diodos" llamado rectificador. Este rectificador convierte la corriente alterna (CA) que pasa por el circuito del medidor, en CD. El movimiento del indicador registra la corriente directa (CD), y como se expresó anteriormente, el paso de corriente es proporcional al voltaje (CA) aplicado. La figura 7-4 ilustra un esquema de un voltímetro simple de CA. La resistencia del medidor de los voltímetros de CA es típicamente más baja que la de los voltímetros de CD debido a que los diodos en el rectificador no producen una señal perfecta de CD para el movimiento del indicador; por esto es deseable una señal mayor de corriente.

7.3.2 Voltímetros electrónicos

Los voltímetros electrónicos, o de estado sólido (transistorizados) utilizan un circuito especial para aislar el movimiento del medidor del circuito de medición. La figura 7-5 ilustra un voltímetro electrónico simple. Este circuito típico tiene tan alta resistencia que se necesita una batería externa para que amplifique la señal medida. La mayoría de voltímetros electrónicos, tanto para CA como para CD, tienen una resistencia de 40 000 veces de la lectura de voltaje a toda escala. Esto permite el uso de estos voltímetros para hacer mediciones de gran precisión, al mismo tiempo que se absorben corrientes extremadamente pequeñas del circuito que se esté midiendo. Muchos voltímetros electrónicos se construyen reemplazando el tradicional "movimiento sensible de corriente" con indicadores electrónicos digitales.

7.3.3 Opciones de equipos

Los voltímetros se obtienen para casi cualquier gama de los voltajes

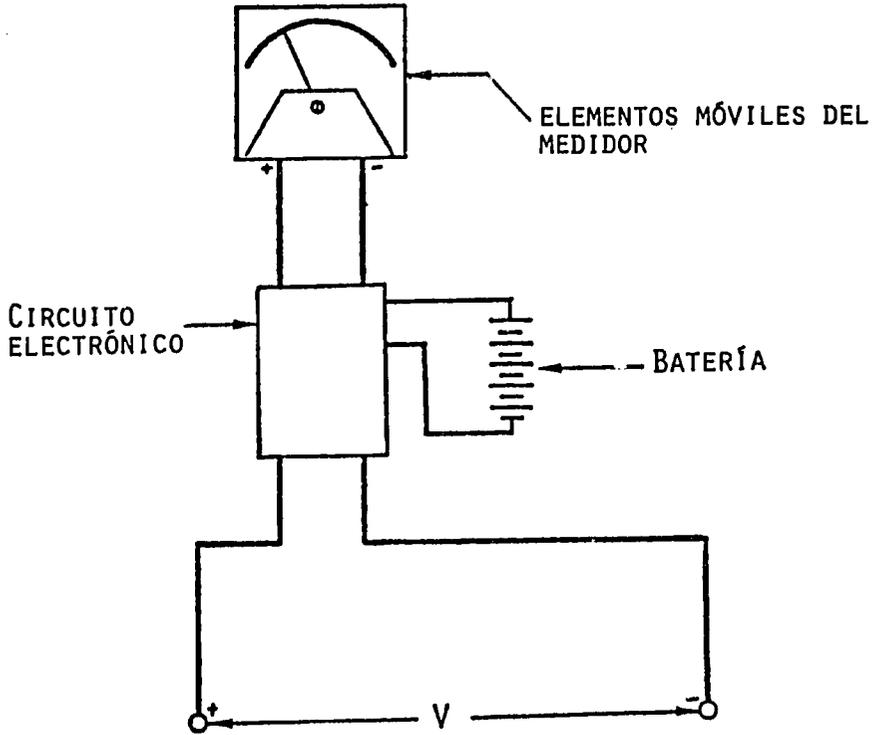


Figura 7-5. Voltímetro electrónico

que se usan en la industria. Los tipos de equipo que se mencionan en los párrafos que siguen no representan toda la gama de instrumentos disponibles para mediciones de voltaje, sino más bien aquéllos que son más apropiados para uso en medios industriales.

A. Voltímetros para tableros

Descripción: un voltímetro para tablero o panel, es generalmente un medidor de función simple diseñado para una conexión permanente y montado en un tablero de alguna máquina o tablero principal. Estos voltímetros se obtienen para medir toda gama de voltajes, desde milivoltios ($10^{-3}V$) hasta kilovoltios (10^3V), tanto para CA como para CD. Los voltímetros de tablero hasta para 1 000 voltios son los de tipo que se han descrito bajo "principios de operación", anteriormente. Arriba de los 1 000 voltios muchos voltímetros de tablero utilizan un sensor o transductor para reducir la señal del voltaje que se aplica al medidor. Los transformadores de potencial reducen el voltaje que se aplica al instrumento en razón a la proporción entre embobinados del transformador. Transductores especiales pueden reducir altos voltajes de CD a valores de un nivel utilizable. La figura 7-6 ilustra algunos voltímetros comunes de tablero. Existe una gran variedad de tamaños, estilos y diseños en el comercio. Generalmente los voltímetros de tablero son baratos, entre \$40 y \$100, pero los medidores de precisión y aquellos diseñados con escalas especiales son de alto costo.

Aplicaciones recomendadas: los voltímetros de tablero deben utilizarse donde exista la necesidad de medir voltaje, o donde la conexión de un voltímetro portátil sea difícil o no práctica. Tales voltímetros se fabrican para uso continuo; están diseñados para lograr una buena ventilación a manera de prevenir daños al instrumento debido a la generación de calor dentro del mismo.

El indicador propiamente dicho es generalmente de una construcción

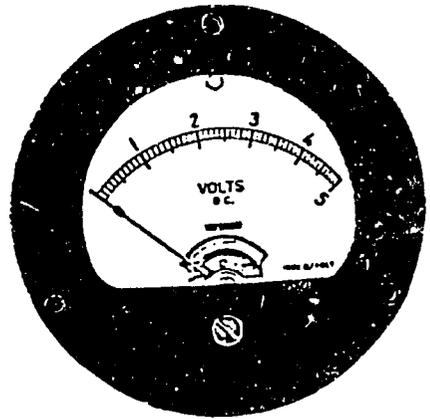


Figura 7-6. Voltímetros de tablero

fuerte para soportar la vibración que ocurre comúnmente en tableros principales y paneles de control de equipos.

Los instrumentos de tablero deben instalarse en posición vertical, preferiblemente a una altura a la cual puedan leerse al nivel del ojo. Si se hace necesario verificar varios voltajes en un solo tablero, los fabricantes ofrecen una variedad de interruptores (switches) selectores para este propósito.

Limitaciones: debido a que los voltímetros de tablero son diseñados para prestar servicio continuo y en ambientes desfavorables, se sacrifica algo de sensibilidad y precisión a expensas de su durabilidad. Estos voltímetros no deben utilizarse para mediciones críticas; y en caso de que sea necesario verificar lecturas de voltaje dentro del tablero, es conveniente usar un voltímetro portátil de mayor precisión.

El hecho de que los voltímetros de tablero se diseñen para uso en servicio ordinario no significa que sean diseñados para usarse como instrumentos portátiles. Generalmente, el indicador de un voltímetro de este tipo es sensible a la orientación y puede dar lecturas falsas, si no se coloca verticalmente. Además, los terminales expuestos en la parte de atrás del instrumento dan lugar a que aumente el riesgo de "shock eléctrico" o cortocircuitos si se utilizan fuera del montaje del tablero.

Precisión y confiabilidad: como la mayoría del equipo de medición eléctrica del tipo de tablero, los voltímetros de este grupo no son muy precisos ($\pm 5\%$ a 10% a plena escala); sin embargo, se pueden adquirir instrumentos de mejor precisión, pero a un costo mayor. Los voltímetros que utilizan el "movimiento del indicador" de lámina de hierro son menos precisos que los de d'Arsonval. Los voltímetros electrónicos para tablero sí tienen circuitos de mucha precisión, pero ésta está limitada al número de dígitos que se muestran en la pantalla.

Finalmente, los voltímetros para tablero están diseñados para prestar un servicio por muchos años, sin problemas de mantenimiento; a pesar de que no son muy precisos, sí son confiables.

B. Multímetros

Descripción: el multímetro es la forma más común de un voltímetro portátil. Es un instrumento autocontenido, portátil, para medir funciones múltiples de CA o CD; además, miliamperios (CD) y ohmios. La figura 7-3 ilustra tres tipos de multímetros más comunes. Estos instrumentos están equipados con puntas de prueba aisladas para mediciones rápidas. La circuitería interior del multímetro puede variar desde un banco de resistencias convencionales hasta circuitos electrónicos elaborados, y las formas de indicación pueden ser desde medidores convencionales del tipo d'Arsonval (analógicos) o pantallas electrónicas digitales.

Generalmente, el costo de un multímetro depende de su precisión y de su gama de selección de funciones; entre más funciones, más caros. El costo de estos instrumentos puede variar entre CA\$45 y CA\$450 ó más, dependiendo de su complejidad.

Aplicaciones recomendadas: los multímetros se utilizan para mediciones momentáneas, tanto para CA como para CD y hasta 1 000 voltios, así como para mediciones de baja corriente (miliamperios) y mediciones de resistencia. Los multímetros electrónicos, en aplicaciones industriales ofrecen muy poca ventaja en comparación con los multímetros convencionales, pero son de mayor utilidad cuando se trabaja en sistemas de control de diseño electrónico o en equipos electrónicos de baja potencia. Los multímetros deben utilizarse cuando no se requiera la instalación de un tablero o que tal instalación no sea práctica. Finalmente, los multímetros pueden usarse para verificar aquellas lecturas registradas por los voltímetros de tablero cuyo valor sea dudoso.

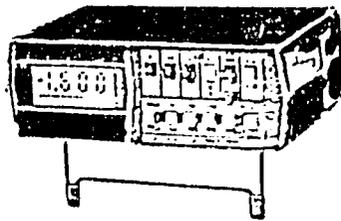
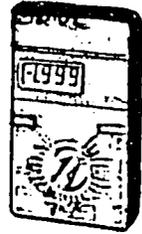
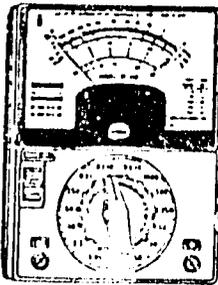


Figura 7-7. Multímetros

7.4 AMPERIMETROS

La corriente eléctrica se define como el flujo de cargas eléctricas (en amperios) a través de un conductor. El amperímetro, en sus variadas formas, es el instrumento que se utiliza para medir el paso de corriente. En la mayoría de aplicaciones industriales, en donde el suministro de voltaje es casi constante, las mediciones de corriente proveen una indicación del consumo de la potencia eléctrica en los equipos o sistemas de carga. Dado a que las pérdidas de energía en equipos o sistemas están relacionadas más bien con la corriente que con el voltaje, se encuentra una mayor aplicación del uso de amperímetros para identificar y aislar las pérdidas de energía en dichos equipos y sistemas.

7.4.1 Operación básica e instalación

Aunque la instalación de varios tipos de amperímetros obligan a la interrupción de la energía eléctrica, existen ciertos tipos de amperímetros que no requieren esta interrupción. Los amperímetros conocidos como de "Shunt" y algunos llamados "con transformadores de corriente" deben colocarse en la línea que ha de medirse. La mayoría de los amperímetros más populares de transformador de corriente (CT) sólo necesitan colocarse alrededor del cable o barra bajo medición.

Los amperímetros de transformador de corriente se utilizan únicamente en líneas que conducen corriente alterna (CA). De ser instalados en líneas conductoras de corriente directa (DC) no registran ninguna lectura y generalmente no se dañan.

Los amperímetros conocidos como de "Shunt" están diseñados para conectarse "en serie" con la carga eléctrica que se está midiendo; la conexión de uno de estos amperímetros conectados "en paralelo" con

la carga puede causar daños severos al instrumento. Los amperímetros de "Shunt" para mediciones de corriente directa deben conectarse con la polaridad adecuada, ya que de forma invertida pueden dañarse permanentemente.

Por otro lado, los transformadores externos de corriente están diseñados para una operación en paralelo y casi en cortocircuito y entregan solamente un máximo de 5 amperios de corriente. Las figuras 7-8 y 7-9 ilustran diagramas de conexiones de amperímetros del tipo "Shunt" (o derivación) y del tipo de transformador de corriente, (CT). Al conectar un amperímetro, consúltese siempre las instrucciones del fabricante.

Cuando se conecten o reparen transformadores externos de corriente, los cables del devanado secundario nunca deben dejarse desconectados si la línea bajo medición está energizada y conduciendo corriente. Este tipo de transformador está diseñado para funcionar en estado de cortocircuito, por lo que los terminales del devanado secundario (los que usualmente se conectan al indicador) deben cortocircuitarse antes de desconectarlos del instrumento. En caso contrario se generará un alto voltaje dentro del transformador que puede causar "shock" eléctrico o dañar el aislamiento del transformador.

Como en el caso de los voltímetros, los amperímetros de CA y CD no son intercambiables. Una conexión momentánea a una fuente equivocada generalmente no produce ningún daño, pero si es durante mucho tiempo se dañará el indicador. El conectar un amperímetro de CD a una fuente de CA, o viceversa, dará como resultado una lectura incorrecta.

Los amperímetros deben utilizarse de manera que la corriente medida pueda leerse en el tercio superior de la escala del instrumento. Debido a que el error del indicador es siempre un porcentaje de la escala total, el leer en el tercio superior de la escala asegurará que el error efectivo sea el mínimo. La corriente debe medirse bajo condiciones de carga, ya que si no existe paso de corriente no habrá ninguna lectura.

Como cualquier otro instrumento de medición eléctrica, un amperímetro debe operarse en la posición para la cual fue diseñado. Los instrumentos para tablero deben montarse verticalmente; las unidades portátiles funcionan en cualquier posición; los amperímetros digitales no son sensibles a la posición, y los transformadores de corriente no son sensibles en cuanto a su orientación.

Los amperímetros portátiles generalmente no están diseñados para una operación continua. Estos instrumentos utilizan un resistor (o resistencia) en derivación (Shunt) en los que el calor generado en el mismo no afecta su operación; sin embargo puede afectar la operación de otros componentes. Una conexión prolongada no causa una falla total del instrumento, pero sí puede afectar su calibración.

Al utilizar un amperímetro de escalas múltiples, iníciase su operación en la gama más alta, reduciéndose hasta obtener una lectura adecuada. Esta precaución asegurará que el instrumento no se dañe por un exceso de corriente.

7.4.2 Principios de operación

Como se mencionó anteriormente en el párrafo 7.2, en los principios de operación de los voltímetros, los amperímetros funcionan bajo los mismos principios de "movimientos de medición": el galvanómetro de Arsonval y el "movimiento de lámina de hierro".

El amperímetro de Corriente Directa (CD) de "Shunt" o derivación se utiliza para la medición de corriente CA y CD. La figura 7-8 ilustra un esquema de un amperímetro de este tipo. El "Shunt" o elemento de derivación es una resistencia de bajo valor que se "inserta" en la línea en que se mide, y en la que la combinación del indicador

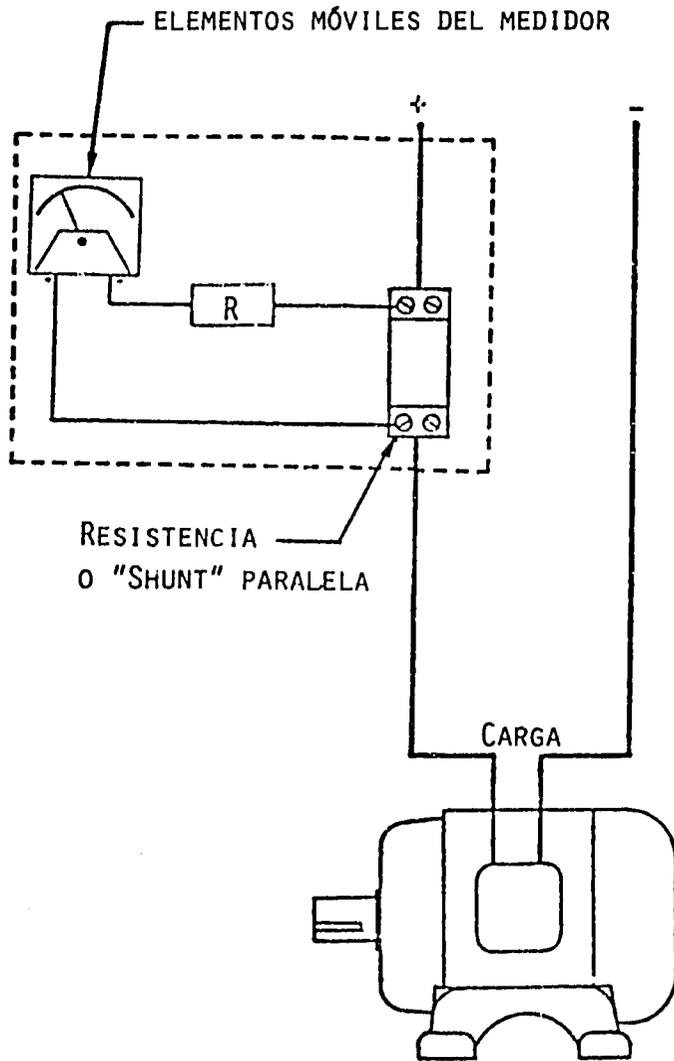


Figura 7-8. Amperímetro de CD de "Shunt"

(movimiento del medidor) y la resistencia "R" mide la caída de voltaje que ocurre a través del "Shunt". Dado que ambas resistencias tienen un valor fijo, la corriente que pasa por el indicador es proporcional a la corriente que pasa por el "Shunt". Los amperímetros de "Shunt" para corriente alterna (CA) operan bajo el mismo principio, incorporando un circuito rectificador de 4 diodos como se ilustra en la figura 7-9.

El amperímetro de transformador de corriente utiliza un transformador del tipo de anillo o dona para medir el paso de corriente. La figura 7-9 también ilustra un amperímetro simple de este tipo. Debido a que funcionan bajo el principio de "inducción", estos amperímetros se usan únicamente para la medición de corriente alterna. El núcleo del anillo está hecho de hierro laminado. La corriente que pasa por el alambre conductor bajo medición induce una corriente en el devanado secundario alrededor del núcleo. Esta corriente secundaria pasa por el shunt. La parte del indicador funciona como un amperímetro de shunt para CA. Algunos instrumentos de menor precisión tienen conectado el indicador directamente a los terminales del devanado secundario del transformador de corriente (CT). La lectura de estos instrumentos está afectada por las variaciones del voltaje de línea y la frecuencia. Los amperímetros de transformador de corriente de escala múltiple tienen derivaciones en el devanado secundario, o varios devanados secundarios para obtener lecturas en varias gamas.

Existe una variedad de transformadores de corriente para ampliar la gama de amperímetros de "Shunt". La figura 7-10 ilustra dos variaciones de este tipo de transformadores. Con el transformador del tipo de anillo o dona (b en la figura), el conductor bajo medición actúa como un devanado primario. En a) se muestra un transformador del tipo "en línea" con devanados internos, y la corriente que se mide debe pasar a través del transformador. En cualquier caso, el devanado primario induce un campo magnético en el núcleo de hierro

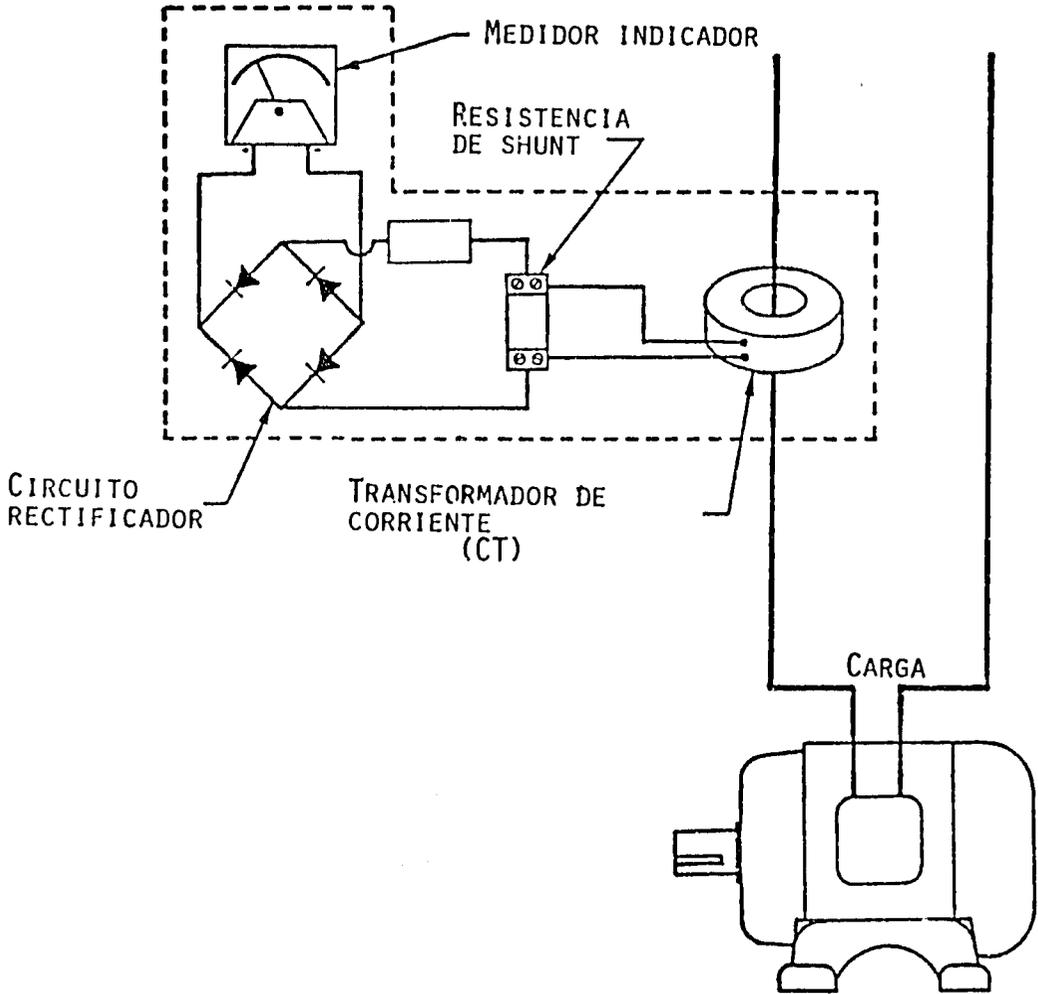
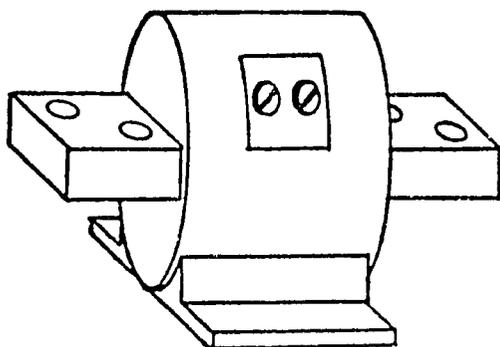
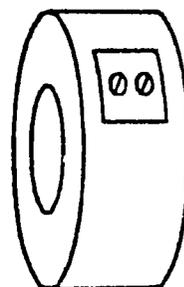


Figura 7-9. Amperímetro de CA (CT)



a) TIPO DE TRANSFORMADOR
EN LÍNEA



b) TIPO DE ANILLO
O DONA

Figura 7-10. Transformadores de corriente

laminado. Este campo, a su vez, induce una corriente en el devanado secundario. Dado a que el voltaje de la línea es constante y que el devanado secundario está casi en cortocircuito (la resistencia del "shunt" es muy baja), la corriente que pasa por el devanado secundario es proporcional a la que pasa por la línea bajo medición.

Opciones de equipos

Existe una gran variedad de amperímetros para casi cualquier gama de corriente que pueda medirse en la industria. Los tipos de equipos que se mencionan en los párrafos siguientes no representan toda la gama de instrumentos disponibles, sino más bien aquéllos más apropiados para uso en medios industriales.

A. Amperímetros para tableros

Descripción: los amperímetros de shunt para tableros pueden adquirirse en una gran variedad de tamaños y estilos. Aunque pueden adquirirse en gamas de hasta 100 amperios, la mayoría son de 30 amperios o menos. Estos instrumentos son esencialmente un amperímetro de "shunt" y un detector de caída de voltaje contenidos en una misma caja. Los indicadores pueden variar desde uno del tipo de "lámina de hierro" como el de los cargadores de batería, hasta amperímetros digitales para mediciones precisas. El costo de estos instrumentos puede variar entre \$CA80 a \$CA300.

Aplicaciones recomendadas: los amperímetros para tablero se utilizan generalmente para una lectura continua en equipos o tableros principales. Existen versiones tanto para CA como para CD; estos instrumentos se utilizan para mediciones en aplicaciones que no sean críticas, tales como amperímetros para cargadores de baterías y como su nombre implica el indicador está diseñado para montarse en un tablero. La corriente medida se conecta a través del indicador por medio

de terminales en la parte de atrás del instrumento.

Limitaciones: debido al calor generado en el "Shunt" dentro de la caja del instrumento y a la longitud necesaria en los cables que llevan la corriente al instrumento indicador, la mayoría de los amperímetros de "Shunt" se utilizan en áreas de baja corriente. Arriba de 30 amperios se utilizan con preferencia amperímetros de "Shunt" externo o del tipo de transformador de corriente (CT).

Precisión y confiabilidad: como cualquier instrumento de tablero, los amperímetros de "Shunt" interno están mecánicamente bien diseñados para prestar un servicio confiable. A pesar de que proveen una indicación relativa ($\pm 15\%$ de precisión en los indicadores de CD de lámina de hierro), las mediciones críticas deben hacerse con un amperímetro portátil de transformador de corriente (CT) para CA, o utilizando un "Shunt" de precisión y un milivoltímetro para mediciones de CD.

B. Amperímetros de Shunt externo

Descripción: para mediciones de corriente directa mayores de 30 amperios, el "Shunt" del indicador se instala afuera de la caja del instrumento. Este arreglo asegura que el calor generado por el shunt no dañe el "movimiento" del indicador y también permite la conveniencia de conectar cables gruesos al propio shunt. El shunt se inserta en la línea que ha de medirse. El medidor propiamente dicho es un milivoltímetro cuya deflexión a plena escala es generalmente entre 50 a 500 milivoltios (10^{-3}), graduada en amperios y que corresponde al tamaño del shunt. El instrumento indicador se conecta a través del shunt con cables de calibre adecuado. La caída de voltaje a través del shunt es proporcional a la corriente que pasa por el mismo.

Existen combinaciones de milivoltímetro/shunt para mediciones de

corriente directa desde 10 a muchos miles de amperios y para voltajes hasta 1 000 voltios. En tanto que los shunts son bastante precisos, la precisión del milivoltímetro varía con el costo. Estos instrumentos pueden adquirirse desde un indicador simple y barato del tipo de lámina de hierro como los amperímetros que indican la función de un generador-batería de "carga y descarga", hasta un amperímetro electrónico de pantalla digital y cuyos precios varían entre \$CA60 a \$CA200.

Aplicaciones recomendadas: los amperímetros de shunt externo se utilizan comúnmente para mediciones continuas o regulares de corriente directa de medio y alto nivel. En la industria están generalmente instalados en sistemas de control de CD; a menudo se incluye un interruptor o "switch" selector para utilizar un sólo shunt con varios milivoltímetros. Debido a que los indicadores de transformador de corriente no funcionan con corriente directa, los amperímetros de shunt de CD son los únicos instrumentos para registrar grandes cargas de CD como en motores de CD, tanques de galvanoplastia o electroimanes pesados.

La figura 7-11 ilustra algunos "Shunts" comunes que se utilizan con amperímetros de tablero. Estos shunts se diseñan para montarse en el propio tablero en serie con los conductores que han de medir.

El voltaje en los cables del instrumento indicador es muy bajo y no constituye un peligro de "shock eléctrico" en tanto se mantengan debidamente aislados.

Limitaciones: los amperímetros de tablero del tipo de shunt externo están limitados hasta una operación de 1 000 voltios o menos. Debido a que los shunts están expuestos para que se enfríen adecuadamente, a voltajes mayores de 1 000 voltios puede ocurrir "arco eléctrico" o existir peligro de electrocución.

Precisión y confiabilidad: la precisión de estos amperímetros está en función de su costo. La mayoría de los amperímetros de shunt son bastante precisos (± 1 a 5% a plena escala). Los milivoltímetros baratos como los del tipo de movimiento de lámina de hierro son menos exactos; los milivoltímetros digitales pueden tener una precisión de $\pm 0.01\%$.

Los amperímetros para corriente directa de shunt externo se fabrican para que presten muchos años de servicio. Se utilizan para montaje en tableros y, por lo tanto, están diseñados para resistir vibraciones, uso continuo y aún golpes leves.

C. Amperímetros de transformador de corriente

Descripción: para la medición de corriente alterna mayor de 30 amperios, se utilizan amperímetros de transformador de corriente. Debido a que no existe conexión física entre el circuito del indicador y la línea bajo medición, estos instrumentos pueden utilizarse ampliamente en cualquier planta industrial. El transformador de corriente se diseña de manera que el devanado secundario produzca corriente que varíe entre 0 y 5 amperios, correspondiente a una variación entre cero y máximo de la corriente bajo medición. Generalmente estos amperímetros son más caros que los del tipo de shunt/CD, pero son bastante precisos y confiables. Sin embargo, por su diseño son peligrosos si no se adoptan las precauciones mencionadas anteriormente. Su costo varía entre \$CA90 y \$CA200.

Aplicaciones recomendadas: los amperímetros de transformador de corriente se diseñan para montaje en tableros de subestaciones y mecanismos de interrupción. La figura 7-12 muestra algunos transformadores de este tipo asociados con amperímetros. Su precisión puede variar desde $\pm 15\%$ como en el caso de los indicadores de lámina de hierro, hasta los indicadores digitales cuya precisión puede ser de $\pm 0.01\%$ a plena escala.



Figura 7-11. Amperímetros de "Shunt"
y de tablero

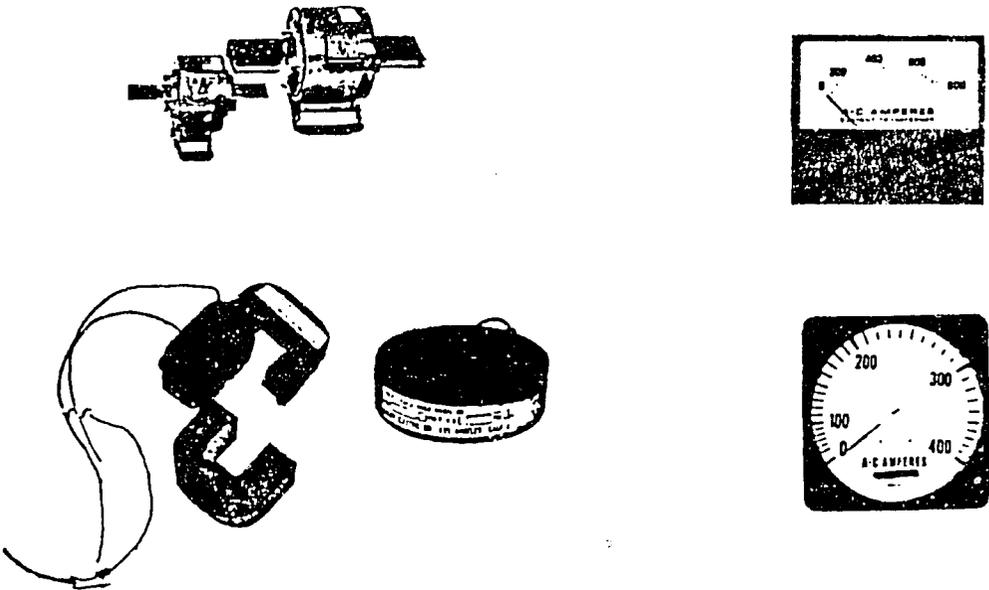


Figura 7-12. Amperímetros de transformador
de corriente y de tablero

D Amperímetros portátiles de transformador de corriente

Para mediciones rápidas de paso de corriente, se utilizan ampliamente en las plantas industriales volt-amperímetros portátiles, popularmente conocidos como "de candado o de gancho". Estos instrumentos consisten de un transformador de corriente (CT) con quijadas de hierro laminado accionadas por resorte, un devanado secundario, un shunt interno secundario y un indicador analógico o digital. Se fabrican en una variedad de gamas desde un amperio hasta varios miles; estos instrumentos generalmente incluyen escalas para mediciones de voltaje y de resistencia. Las quijadas del instrumento se abren manualmente y se colocan alrededor del conductor y no requieren que se interrumpa la energía para abrir o separar el conductor.

El costo de este tipo de instrumentos está en función de su gama de operación, la precisión en la lectura y accesorios para diferentes aplicaciones. Este tipo de instrumentos son bastante precisos, pero algunos de bajo precio están limitados en cuanto al tamaño de las quijadas y a las gamas de medición. Su precio varía entre \$CA 100 a \$CA 300.

Aplicaciones recomendadas: Estos amperímetros portátiles de transformador de corriente, están diseñados para mediciones momentáneas en circuitos de corriente alterna, tanto para maquinaria como para sistemas de suministro eléctrico. El tamaño de las quijadas varía de acuerdo a su aplicación; se fabrican para mediciones en conductores gruesos y barras distribuidoras, así como para mediciones en conductores usualmente usados en equipos industriales.

Limitaciones: Los amperímetros portátiles de transformador de corriente (CT) no se recomiendan para el uso en sistemas que sobrepasen los 1 000 voltios. Además una conexión prolongada puede generar suficiente calor en el interior del instrumento que puede dañarlo. Nunca deben instalarse permanentemente.

Precisión y confiabilidad: Los amperímetros portátiles son de

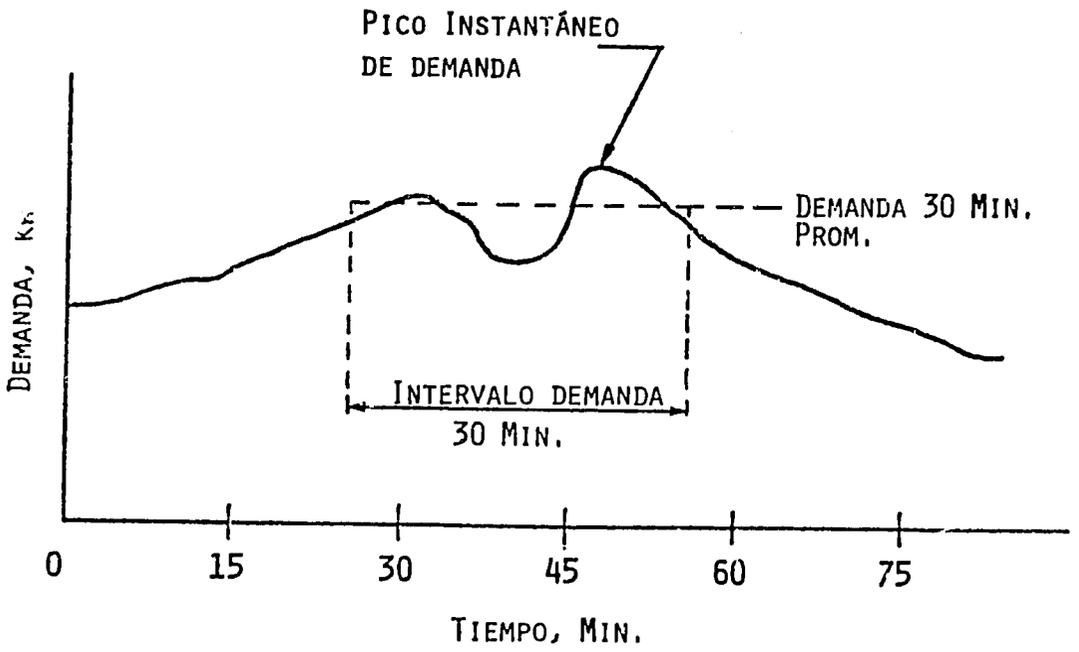


Figura 7-13. Demanda eléctrica

diseño confiable y muy precisos. Debido a su portabilidad no están diseñados para resistir vibraciones, operación continua, ni calor excesivo. A plena escala su precisión es de $\pm 1\%$ o aún mejor que este valor. Los modelos electrónicos pueden tener una precisión tan buena de hasta $\pm 0.01\%$ de lectura real (no a escala plena), y si se manipulan y usan propiamente funcionan confiablemente por muchos años.

7.5 VATIMETROS DE CA E INDICADORES DE DEMANDA EN kW

Potencia es la relación del paso o uso de la energía eléctrica y se mide en vatios, o más comúnmente en kilovatios. La potencia es un parámetro eléctrico instantáneo, de igual manera que el voltaje y la corriente. Los vatímetros miden la potencia utilizada en un momento dado en cualquier carga eléctrica.

Los vatímetros son realmente una combinación de amperímetros y voltímetros. En cuanto a la corriente directa (CD) la potencia es simplemente el producto del voltaje por la corriente y por esta razón no se fabrican vatímetros de corriente directa; dado que con la medición de voltios y amperios se puede fácilmente determinar la potencia eléctrica en circuitos de CD, este tópico por su sencillez no se considera en este Manual.

Las mediciones de potencia en circuitos de corriente alterna no son tan directas como las mediciones en CD. Debido a que tanto el voltaje como la corriente alterna varían con relación al tiempo, estos dos parámetros puede que no coincidan en todo momento; los vatímetros de CA deben medir la magnitud y la relación de fase entre voltaje y corriente. Los sistemas polifásicos (tres fases) comúnmente utilizados en la industria hacen que las mediciones de potencia resulten más complicadas.

El kilovatio de demanda (kW) se define como el promedio instantáneo del consumo de potencia eléctrica en un intervalo de tiempo dado. La

figura 7-13 ilustra este concepto. En la facturación de la energía eléctrica, la demanda pico se define como el máximo promedio del consumo de potencia en un período de tiempo dado, generalmente con una duración de 30 minutos. La mayoría de los medidores de demanda o "Demandómetros" que se utilizan actualmente, emplean un vatímetro y un circuito electrónico o "memoria" que promedia continuamente la demanda en un período de 30 minutos. Antes de que aparecieran los demandómetros electrónicos, la demanda se determinaba utilizando un medidor de diseño especial conocido como electrodinámometro (ver los principios de operación más adelante) que estaba mecánicamente limitado por medio de un amortiguador, para indicar el valor del kilovatio de demanda, con dependencia del tiempo. De esta manera se calculaba la demanda pico promedio utilizando este valor de kW. Los demandómetros, que se describen en los párrafos siguientes, se limitarán a aquellos que se usan en plantas industriales y no a los que instalan las compañías que suministran energía eléctrica. Aunque estos demandómetros son tan precisos como los que utilizan las empresas de electricidad, no se construyen con sellos a prueba de apertura ilegal.

7.5.1 Operación básica e instalación

La mayoría de vatímetros requieren la conexión tanto de sensores de voltaje como de corriente. Aunque los tipos tradicionales obligan a la interrupción del paso de corriente para la interconexión de transformadores de corriente, los vatímetros electrónicos utilizan un sensor o transductor que necesita solamente adelantarse alrededor del conductor en que se mide. Todos los vatímetros necesitan alimentación de voltaje.

Para la medición de alta corriente, la mayoría de vatímetros convencionales utilizan transformadores de corriente (CT). Al conectar o desconectar estos dispositivos los cables o alambres del secundario (los que conectan el medidor) deben cortocircuitarse para prevenir la generación de alto voltaje en el devanado del transformador. Este voltaje representa un peligro de "shock eléctrico" y también puede dañar el transformador.

B I B L I O G R A F I A

- Anderson, M. y Lee, R. "Efficiency in Lighting". Manual 10. The MIT Press, 1a. Edición, 1982.
- Andreas, John C. "Energy-Efficient Electric Motors" 1982.
- AEG - "Handbuch der Elektrotechnik". 10a. Edición, 1971.
- Favié, J. W., "Alumbrado". Biblioteca Técnica Philips, 1a. Edición, 1963.
- Flachmann/Mai/Stamer. "Elektrotechnik", 1a. Edición, 1977.
- Georgia Institute of Technology, "Electrical Energy Management". 1a. Edición, Octubre 27, 1981.
- Georgia Institute of Technology, "Instrumentation" (electrical). 1a. Edición.
- Georgia Department of Education. "Energy Conservation"
- Industrial Energy Extension Service. "Electrical Energy Management" Georgia Institute of Technology. 1a. Edición, Octubre 27, 1981.

- Liwschitz, Michael & Whipple, Garik y Clyde C. "Máquinas de corriente alterna". 7a. Edición, Octubre, 1976. C.E.C.S.A.
- Philips, "Manual de alumbrado", 1a. Edición, 1976.
- SIECA. Secretaría de Integración Económica Centroamericana, 1982-83.
- Sprague Electric Company. "Corrección del factor de potencia". 1a. Edición, 1965.
- Texas Energy Management. "Electrical Demand Control" 2a. Edición, Diciembre 1981.
- Westinghouse Electric Corporation, "Lighting Handbook" 1a. Edición, 1969.