



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

OPTIMIZACION DEL CONSUMO DE ENERGIA  
ELECTRICA EN PLANTAS INDUSTRIALES

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

**INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**

P R E S E N T A ;

JUAN CRUZ ROMERO SILVA



DIRECTOR DE TESIS:  
ING. JUAN V. LEDUC RUBIO

MEXICO, D. F.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

1989



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

T E S I S

- TEMA : OPTIMIZACION DEL CONSUMO DE ENERGIA ELECTRICA EN PLANTAS INDUSTRIALES
- OBJETIVO : LO RELATIVO A COMO ECONOMIZAR ENERGIA CONTROLANDO METODOS DE ARRANQUE DE MOTORES, CONEXION DE EQUIPO ELECTRICO, CONTROL DE DEMANDA Y EL FACTOR DE POTENCIA
- DIRECTOR : ING. JUAN VICENTE LEDUC RUBIO
- CAPITULO I : DESCRIPCION DE UNA PLANTA INDUSTRIAL
- CAPITULO II : EQUIPO ELECTRICO QUE INTERVIENE EN UNA PLANTA INDUSTRIAL, ASI COMO ALGUNAS DE SUS CARACTERISTICAS
- CAPITULO III : CURVAS DE DEMANDA Y CONTROL DEL FACTOR DE POTENCIA
- CAPITULO IV : METODOS DE ARRANQUE Y OPERACION DE LAS MAQUINAS ELECTRICAS QUE SE EMPLEAN
- CAPITULO V : EJEMPLOS

## CAPITULO I

### GENERALIDADES

Una planta de proceso continuo es la que manufactura continuamente un elevado volumen de partes sin interrupciones en su producción. En este tipo de industria, el volumen de ventas esta bien preestablecido, de tal forma que la producción no depende de pedidos eventuales o particulares.

La maquinaria que genera estas partes se selecciona para conformar las piezas mediante varias operaciones, de tal manera que éstas máquinas difícilmente puedan utilizarse para otros propósitos, donde el costo unitario de las piezas deberá mantenerse a un mínimo posible.

Dentro de las piezas que fácilmente pueden reconocerse como partes producidas en forma continua, están, los envases, lápices, automoviles, tuercas, tornillos, rondanas, alambre, cemento portland, etc.

1.0 CARACTERISTICAS DE UN SISTEMA DE PRODUCCION CONTINUA Las características principales de un sistema de producción continua son las siguientes:

1.1 CARACTERISTICAS POSITIVAS, Dentro de estas podemos mencionar:

a).- Se tiene una mayor fluidez y un mayor volumen de producción, debido al arreglo de la maquinaria que hace que la secuencia de producción sea la más lineal posible.

b).- Mejor programación de la producción, es decir se pueden producir productos "similares" debido a la disposición de la maquinaria.

c).- Mayor control de calidad y cantidad de las piezas debido, a que una etapa depende de otra.

d).- Mejor control de la producción, es decir se puede secuenciar o modularizar las etapas de producción.

e).- Debido a la fácil modularización se incrementa la especialización obrera.

f).- Se determina fácilmente su rentabilidad debido a la modularización.

g).- Se puede producir para el cliente y no para el almacén como consecuencia se tiene un mejor control de la producción.

1.2 CARACTERISTICAS NEGATIVAS, Dentro de las cuales podemos notar las siguientes :

a).- Algunas veces se duplica la maquinaria, puesto que se exige que el producto o el proceso de producción vayan en línea.

b).- Es difícil que el mismo arreglo de maquinaria trabaje para piezas muy diferentes con nula similitud.

c).- Se requiere de un espacio mayor, puesto que se tiene maquinaria repetida.

d).- Hay maquinaria subutilizada con capacidad ociosa, por las características de la producción.

e).- Inflexibilidad a cambios fuertes del diseño de los productos o incluso al cambio total del producto, debido al cambio de secuencia establecida y algunas veces a la inexistencia de algunas máquinas necesarias.

1.3 CEMENTO PORTLAND, La gran versatilidad dentro del campo de la construcción ha hecho posible el enorme desarrollo que esta industria ha tenido en el mundo entero y, en particular, en la república mexicana. Siendo el cemento el elemento activo en un gran número de materiales, debe producirse cuidadosamente, ya que, para lograr una mejor eficiencia en distintos tipos de obra, conviene variar su composición de acuerdo con el empleo a que se destina.

El cemento portland es un material finamente pulverizado, ya que al agregarle agua, ya sea solo o mezclado con otros materiales, tiene la propiedad de fraguar tanto en el aire como en el agua y formar una masa endurecida.

#### 1.3.1 METODOS PARA LA FABRICACION DE CEMENTO PORTLAND

Existen dos métodos para la fabricación del cemento tipo portland, y son :

a).- Proceso seco

b).- Proceso humedo

En ambos casos el proceso comienza con la explotación de los bancos de materias primas y su acarreo a la fábrica, para que seguidamente se empleen, de acuerdo con el proceso que se vaya a utilizar.

1.3.2 MATERIAS PRIMAS Las materias primas fundamentales para la fabricación del cemento son : la caliza o marga y los materiales arcillosos como son el barro o pizarra.

1.3.3 PROCESO EN SECO Este proceso es el que generalmente se sigue en la república mexicana y consta de las siguientes etapas :

1.3.4 TRITURACION Las materias primas llegan a la fábrica, se trituran en varias etapas, en una serie de máquinas que están adaptadas en tamaños descendentes de las partículas en proceso. La reducción del tamaño de las partículas va desde grandes piedras de cantera ( desde 1 a 1.5 metros ) hasta polvo impalpable.

1.3.5 SECADO El material actualmente se muele por medio de dos procesos que son :

a).- Circuito cerrado, el material del tamaño aproximadamente a dos pulgadas, se introduce al separador de piedra y polvo, la piedra grande pasa al molino donde se tritura y se muele, al separador de gruesos y finos se le inyecta aire caliente, con lo cual se seca el material.

b).- Circuito abierto, el material se introduce libremente sin secarse, ya que con el calor de la molienda se seca el material, debido a que el molino tiene una eficiencia del 18 al 20 % , el resto se convierte en calor, lo cual se utiliza para secar el material.

1.3.6 MOLIENDA Una vez quebrados y secos la caliza y el barro se dosifican adecuadamente con basculas automaticas, pasando esa mezcla a los molinos tubulares donde se tienen motores de 200 a 3000 HP y estan divididos en su interior en 2 o 3 compartimientos por medio de diafragmas. Los molinos miden de 7 a 14 metros de largo y de 2 a 3 metros de diametro. Al material que sale de los molinos se le llama mezcla cruda o " crudo " simplemente, de ahí el nombre de " molino de crudos ".

La proporción usual para la elaboración del crudo es de un 80 % de caliza y un 20 % de barro.

Actualmente son de uso común los molinos secadores los cuales muelen y secan, con este equipo se eliminan los secadores de tubos giratorios.

1.3.7 ALMACENAJE Cuando el material " crudo " sale de los molinos en donde se mezcla entre sí, para homogenizarse en un silo homogenizador y de ahí se envían a los silos de crudo.

1.3.8 CALCINACION De los silos de crudo el material entra a los hornos de calcinación, el horno es la parte fundamental de la fábrica ya que en éste se forma el compuesto básico del cemento portland, conocido como " clinker ", además se pueden emplear otras materias primas para cementos especiales, como son : materiales férrico, materiales silíceos, cuarzo, cenizas y escencias con elevado contenido de sílice.

La industria mexicana del cemento emplea exclusivamente hornos rotatorios, los cuales estan constituidos por grandes cilindros de acero, forrados en su interior con un material refractario, para resistir las elevadas temperaturas ( hasta de 1500 °C ) las cuales son necesarias en la producción del cemento.

Los hornos existentes en el país, miden desde 1.8 a 6 metros de diámetro y desde 50 hasta 160 metros de longitud, con capacidad diaria desde 100 hasta 2000 toneladas de material calcinado o " clinker ", algunos hornos cuentan con cambiadores de calor que aprovechan los gases calientes del propio horno para precalentar el material crudo que entra en ellos.

1.3.9 ENFRIAMIENTO Anteriormente la mayoría de los enfriadores de " clinker " estaban constituidos por cilindros de acero inclinado, de 2 metros de diámetro y hasta de 20 metros de longitud, en cuyo extremo superior se introduce el " clinker " que va descendiendo y enfríandose al contacto con el aire que entra en la parte inferior.

1.3.10 MOLIENDA DEL CEMENTO Del proceso de enfriamiento de los materiales, el " clinker " pasa a los molinos de cemento o molinos de acabados junto con una cantidad de yeso, previamente dosificada en donde se muele a determinada finura. Para indicar las finuras la molienda conjunta de " clinker " y yeso se realiza en general en molinos tubulares, similares a los descritos en la molienda de crudos. La producción usual para el cemento es de 94 % de clinker y 6 % de yeso.

1.3.11 PROPIEDADES DEL CEMENTO Las propiedades del cemento quedan determinadas por las materias primas, el proceso de la fabricación y específicamente por :

- a).- La finura de las materias molidas.
- b).- El exacto mantenimiento, de una determinada relación de mezcla.
- c).- De la temperatura y de la duración de la calcinación .
- d).- De la forma de enfriar el producto.



1.3.12 TIPOS DE CEMENTOS - Los tipos de cementos que se fabrican en MEXICO son :

- a).- Común o normal. ( tipo I )
- b).- Modificado de bajo calor de hidratación. ( tipo II )
- c).- De rápida resistencia (tipo III )
- d).- De alta resistencia a los sulfatos. ( tipo IV )
- e).- De muy alta resistencia a los sulfatos y muy bajo calor de hidratación. ( tipo V )
- f).- Blanco.

1.4 MEDIDAS PARA EL AHORRO DE ENERGIA ELECTRICA Para el ahorro de energía eléctrica de una planta de proceso continuo, se pueden tomar las siguientes medidas :

1.4.1 Las que se refieren al manejo del consumo específico de energía del proceso continuo y, para las cuales se pueden tomar las acciones siguientes :

- a).- Reemplazo de plantas obsoletas.
- b).- Transformación de proceso húmedo a seco, ( esto equivale a un ahorro del 50 % del consumo de energía específica ).

1.4.1.2 CAMBIOS IMPORTANTES EN EL PROCESO Los cambios importantes en el proceso seco los cuales equivalen al 15 % del consumo específico de energía y pueden ser :

- a).- Transformar los hornos largos a sistemas de precalentadores.
- b).- Aumentar el número de etapas de precalentamiento hasta alcanzar el máximo de cuatro, todo lo anterior equivale a amortizar de 3 a 4 años.

1.4.1.3 APROVECHAMIENTO DE LOS SISTEMAS El mejor aprovechamiento de los sistemas de intercambio de calor de los ciclones de precalentadores de suspensión y en hornos. Esto se relaciona con la absorción máxima de calor en el crudo para lo cual se recomiendan las siguientes acciones :

a).- Para hornos sin precalentadores conviene el uso de cadenas o cruces utilizando los materiales adecuados.

b).- Para precalentadores conviene examinar el diseño de las chimeneas inferiores de los ciclones, así como la entrada de la materia prima al horno.

Lo anterior produce un ahorro del 35 % y una amortización de 5 a 6 años.

1.4.1.4 MEJORAS EN ENFRIADORES El mejoramiento de enfriadores de parrilla ( esto equivale a un ahorro del 2.5% y una amortización no mayor de 3 años ).

1.4.1.5 SECADO DE LA MATERIA PRIMA El secado de la materia prima con el aire del enfriador de parrilla o gases del horno ( ahorro de energía del 1% y amortización de 2 a 3 años ).

#### 1.4.1.6 MEDIDAS RELACIONADAS CON EL AISLAMIENTO

a).- Las pérdidas por radiación, conducción y convección en el horno se estiman de unos 80 Kcal/Kg, lo cual representa un ahorro del 10 % de la energía consumida.

b).- Si se toman las medidas adecuadas se estiman ahorros del 1% y amortizaciones de 3 a 4 años.

1.4.1.7 SISTEMAS DE COMBUSTION Las medidas relacionadas con el sistema de combustión ( significa un ahorro del 0.8 por ciento y una amortización de 2 años ).

a).- Uso del quemador adecuado de acuerdo al combustible.

b).- Mantenimiento y cambio de los quemadores.

c).- Manejar el aire primario y relación elevada de aire primario a aire secundario.

#### 1.4.1.8 ENTRADA DE AIRE FALSO

a).- La eliminación de entradas de aire falso filtrante ( ahorro del 0.5 % y amortización no mayor de 2 años ).

b).- Control específico del combustible ( ahorro del orden del 1 % ), en resumen se tiene un ahorro total del 25 % .

1.4.2 EMPLEO DE NUEVAS TECNOLOGIAS Algunas de las tecnologías que se pueden utilizar son :

a).- Sistemas nuevos de precalentamiento.

b).- Molinos de precalcificación.

c).- Aislamiento ( producción de nuevos materiales refractarios ).

d).- Enriquecimiento con oxígeno en caso de utilizar combustible.

e).- Mas precisión en la instrumentación y control, que vaya de acuerdo a los adelantos en la electronica de control.

1.4.3 Las que inciden en el manejo de la energía eléctrica de acuerdo al proceso ( manejo adecuado de la subestación, factor de potencia del equipo electrico usado, control efectivo de la demanda máxima ) y no de acuerdo a la carga total del proceso.

Siendo la última la más adecuada para instrumentar, sobre todo cuando no se tiene la infraestructura suficiente y hay que importar tecnología y equipo del extranjero.

Aunque es necesario mencionar que de alguna manera se llegan a combinar las tres, sin embargo es conveniente hacer notar la ventaja de la ultima en que se requiere invertir cero pesos para llevarse a cabo, pues solamente hay que crear rutinas, y aplicarlas al proceso para el ahorro efectivo de energía eléctrica.

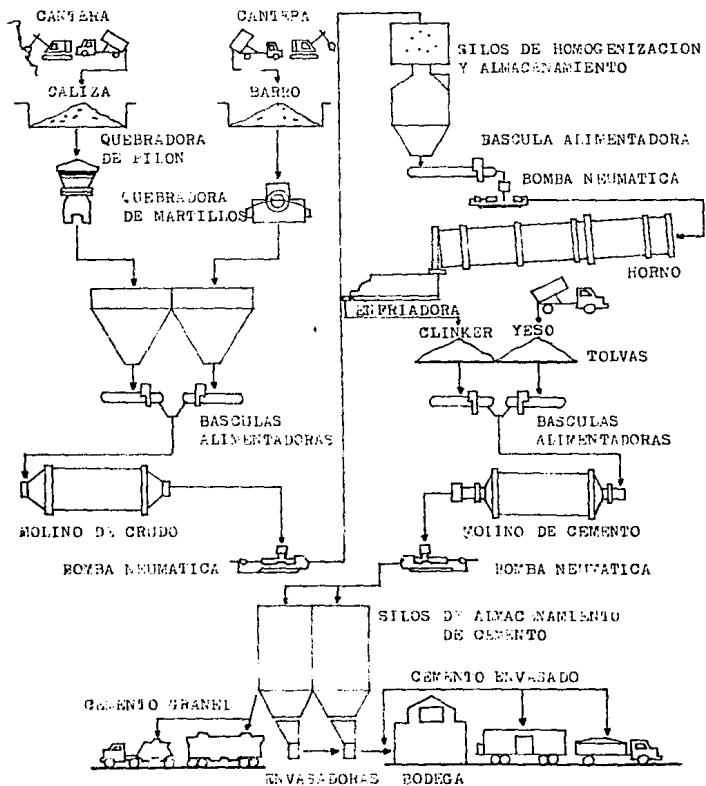


Figura. 1.1 DIAGRAMA DEL PROCESO DE FABRICACION DE CEMENTO (SISTEMA SECO)

## CAPITULO II

### INTRODUCCION

Las fábricas de cemento como toda la industria en general, son alimentadas de energía eléctrica por medio de las redes publicas de alta o medía tensión y también, excepcionalmente mediante una central propia de la empresa. En todo caso, la energía eléctrica debe distribuirse a los puntos receptores de mediao baja tensión.

En el presente capitulo se expone un concepto de la distribución de la electricidad, tomando un modelo representativo de una fábrica de cemento, así como otras aplicaciones.

Se da a continuación, un resumen de la gama de equipo y sistemas disponibles de distribución, pudiendo utilizarse en diversos niveles de tensión y para los campos de potencia bien distintos en la distribución de la electricidad dentro de una fábrica de cemento.

**2.0 ARREGLO DE SUBESTACIONES** La energía eléctrica ha adquirido tal importancia en la vida moderna, que una interrupción de su suministro causa trastornos y pérdidas económicas, por lo cual la selección de la estructura adecuada para el desarrollo del sistema de distribución juega un papel muy importante en la planeación ya que no influirá solo en la operación sino en su costo y confiabilidad a través de la vida útil de la red.

En cuanto a su operación, existen dos tipos fundamentales de redes de distribución que son : Radial y Anillo.

A continuación se muestran algunos de los sistemas tipo radial más comunes así como sus características, ya que estos son los más usados en la industria.

### 2.1.1 RADIAL :

- a).- Presenta una simplicidad adecuada para cargar hasta 1000 KVA.
- b).- Su capacidad es reducida al aprovechar la diversidad de las cargas de la planta.
- c).- Tiene una alta corriente de corto-circuito.
- d).- Sus interruptores son de alta capacidad y una alta corriente.
- e).- Los alimentadores son largos y costosos.
- f).- Tiene una mala regulación debido a las pérdidas de los alimentadores.

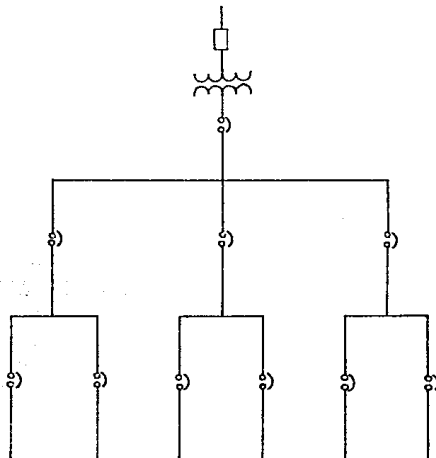


Figura.2.1 SISTEMA RADIAL

### 2.1.2 RADIAL CON CENTROS DE POTENCIA:

a).- Es el sistema más económico cuando se tiene una carga mayor de 1000 KVA.

b).- Los alimentadores son costosos debido a la colocación de cada centro de potencia en forma inmediata al centro de carga.

c).- Tiene una baja corriente de corto-circuito.

d).- El equipo de interrupción es de baja capacidad.

e).- Tiene una buena regulación de voltaje.

f).- Las pérdidas son moderadas.

g).- Presenta una mala continuidad, puesto que una falla en el alimentador principal significa una interrupción total.

h).- Cuenta con poca flexibilidad.

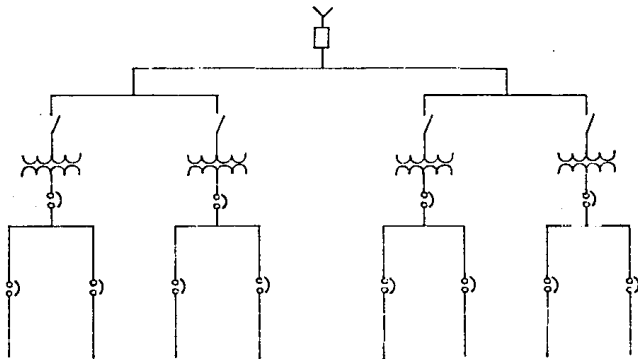


Figura. 2.2 SISTEMA RADIAL CON CENTRO DE POTENCIA

### 2.1.3 SISTEMA RADIAL SELECTIVO PRIMARIO:

a).- Su continuidad es aceptable, puesto que al fallar un alimentador se cambia la carga rápidamente al otro alimentador, cada uno de estos circuitos primarios deben tener capacidad para llevar el total de la carga instalada.

b).- En el caso de una falla en algún transformador, la unidad se desconecta rápidamente y se restaura el servicio dejando fuera una zona de la fábrica.

c).- Tiene una baja corriente de corto-circuito.

d).- El interruptor es de baja capacidad.

e).- Las pérdidas son moderadas.

f).- Tiene una mayor flexibilidad al sistema anterior, pero su costo es de un 10 % mayor.

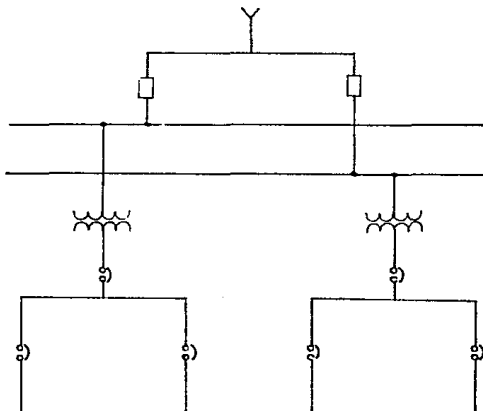


Figura. 2.3 SISTEMA RADIAL SELECTIVO PRIMARIO



#### 2.1.4 SISTEMA RADIAL SELECTIVO SECUNDARIO :

a).- El sistema permite una pronta restauración del servicio, por fallas en el alimentador primario o en el transformador.

b).- Cuenta con una mejor continuidad que en el sistema radial selectivo primario y en el sistema radial con centros de potencia.

c).- Cuando falla un transformador, la alimentación no se interrumpe por largo tiempo, ya que la carga se pasa al otro mediante el interruptor de amarre. Cada transformador debe poder llevar toda la carga de la estación, esto hace que sea un 55% más costosa que el sistema radial con centros de potencia.

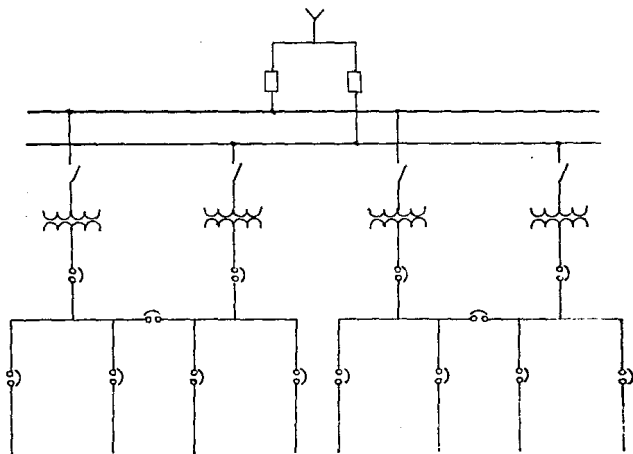


Figura. 2.4 SISTEMA RADIAL SELECTIVO SECUNDARIO

2.3 SUBESTACIONES COMPACTAS La energía eléctrica que se suministra a muchas plantas industriales, en ocasiones se realiza a voltajes que son muy altos para ser aplicados a las cargas conectadas al sistema eléctrico de dicha planta. Con el objeto de convertir los voltajes mencionados a niveles adecuados, como 220, 240 ó 480 Volts, se utilizan las subestaciones unitarias también llamadas subestaciones secundarias.

Algunas de las razones para el uso de estas subestaciones son :

- a).- Están diseñadas totalmente por el fabricante.
- b).- El costo de la subestación compacta es bajo ya que se producen en serie.
- c).- Su construcción es totalmente blindada, de frente muerto la cual proporciona seguridad y confiabilidad.

La subestación unitaria ( S.E. ) se compone de tres partes que son :

- a) - La primera parte, es la sección para la línea de acometida, lo cual proporciona los medios para recibir el cable que entrega la energía eléctrica, un desconectador y posiblemente fusibles para la protección del transformador.
- b).- La segunda parte es el transformador el cual convierte el voltaje primario a un voltaje adecuado para su distribución a los equipos consumidores de la planta industrial.
- c).- La tercera sección, es el equipo de baja tensión, el cual distribuye la carga total entre varios alimentadores primarios.

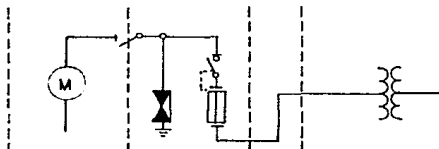


Figura. 2.5 DIAGRAMA UNIFILAR DE UNA SUBESTACION COMPACTA

2.4 TABLEROS DE DISTRIBUCION Muy a menudo es conveniente agrupar dispositivos protectores a los circuitos de baja y alta tensión, dentro de una estructura cubierta la cual presenta ventajas al distribuir la energía a las cargas individuales, estas ventajas son:

- a).- Facilidad de instalación.
- b).- Una mayor continuidad y mayor seguridad en el servicio.
- c).- Más económico.
- d).- Se pueden realizar ampliaciones futuras.

Los tableros se dividen en :

2.4.1 TABLEROS DE MANIOBRA Y TABLEROS UNIVERSALES Estos tableros se agrupan en forma coordinada, dispositivos de protección de circuitos en conjunto autoportados y totalmente protegidos por cubiertas metálicas. Estos agrupamientos de dispositivos de protección, ensamblados bajo técnicas de manufacturas, son conocidos como tableros blindados. Los tableros de maniobra son aquellos conjuntos en los que predominan los interruptores de aire y los tableros universales son aquellos en que su mayoría constan de interruptores termomagnéticos en cajas moldeadas o dispositivos fusibles.

2.4.2 TABLEROS MULTICIRCUITOS Suministran energía a pequeños alimentadores y cargas individuales. Estos tableros se instalan empotrados en la pared o sobrepuestos, pueden contar con interruptores termomagnéticos de caja moldeada o interruptores fusibles de seguridad para alimentar a pequeños motores, lamparas, equipos de calefacción y equipos de oficina.

2.4.3 EQUIPO DE CONTROL AGREGADO Las funciones de este tablero son de arrancar, parar y medir los equipos rotatorios de sistemas completamente automáticos. Puede incluirse cierta cantidad de equipo de distribución en un tablero con el objeto de proporcionar una estructura uniforme y eliminar compartimentos de transición. El tipo más común de este equipo de control es el centro de control de motores.

**2.5 INTERRUPTORES** Los interruptores son dispositivos que están destinados al cierre y apertura de un circuito bajo carga en condiciones normales, así como bajo condiciones de corto-circuito. De acuerdo a los elementos que intervienen en la apertura de las cámaras se dividen en :

a).- Gran volumen de aceite Este tipo de interruptor fué el primero que se empleo, el arco eléctrico se extingue en aceite, el manejo del interruptor puede ser en forma eléctrica, con resortes o compresores.

b).- Pequeño volumen de aceite Este tipo de interruptor es usado en tensiones de hasta 230 KV, emplea aproximadamente un 5 % del aceite total que contiene un interruptor en gran volumen de aceite.

c).- Neumáticos o de aire comprimido En este tipo de interruptores donde el arco se extingue por la acción violenta de un chorro de aire, donde la potencia de ruptura es proporcional a la presión de ruptura, se utilizan en voltajes desde 25 KV hasta 380 KV, esto dependiendo del número de cámaras. Además de tener un bajo costo, rapidez de operación, no arde, ni explota, aumenta la capacidad de ruptura en proporción a la presión del aire.

d).- Hexafluoruro de azufre ( SF<sub>6</sub> ) La cámara de extinción opera dentro del gas SF<sub>6</sub>, que tiene la capacidad dieléctrica mayor que los fluidos dieléctricos conocidos, esto lo hace más compacto y durable, se emplea en tensiones de 23KV hasta 880 KV.

e).- Interruptores de vacío Estos, tienen aplicaciones en voltajes medianos para distribución hasta de 34.5 KV y dentro de tableros blindados, tienen como ventaja al ser compactos, no necesitan mantenimiento y como desventajas, presentan como dificultad el mantener un buen vacío debido al arqueo y la desgasificación de los electrodos, durante el arqueo se produce una pequeña emisión de rayos X, aparecen sobretensiones sobre todo en circuitos inductivos.

**2.5.1 INTERRUPTORES TERMOMAGNETICOS** Estos funcionan por el efecto del calentamiento, al paso de corrientes mayores a las previstas, condición que hace operar mecánicamente el automático para expulsar un botón normalmente cerrado, indicando la falla en el circuito. Se emplean en voltajes hasta de 600 Volts y corrientes hasta de 600 Amperes, estos interruptores se distinguen por su forma de conectarse a las barras colectoras de los tableros o centros de carga, teniendo el del tipo enchufar o el tipo atornillado.

2.5.2 CUCHILLAS Se emplean para conectar, desconectar y seccionar diversas partes de una instalación eléctrica, para efectuar maniobras como mantenimiento del equipo, estas pueden abrir o cerrar con carga, y pueden ser del tipo :

- a).- Horizontal.
- b).- Horizontal invertido.
- c).- Vertical.
- d).- Pantógrafo.

2.5.3 FUSIBLES Son dispositivos de corriente eléctrica que hacen las veces de interruptor siendo más baratos que éste, abren con carga o sin carga, existen diversos tipos de fusibles entre los cuales podemos mencionar :

- a).- Expulsión.
- b).- Limitador-s de corriente.
- c).- De vacío.

2.6 TRANSFORMADORES El transformador es un aparato que transfiere energía eléctrica de un circuito a otro, estando este último aislado eléctricamente del primero, al hacer el acoplamiento por medio de un campo magnético variable en el tiempo. Los transformadores son importantes por sus extensas y variadas aplicaciones y de sus interrelaciones con procesos y aparatos para la conversión de energía electromecánica, ya que además de transferir energía se emplea para transformar voltajes, corrientes e impedancias. De acuerdo con las aplicaciones se puede dividir en :

a).- Transformadores de potencia, se emplean conjuntamente con generadores para la transmisión y distribución de energía eléctrica en forma eficiente, los cuales tienen dos características importantes que son la regulación de voltaje y la eficiencia del transformador.

b).- Transformadores de medición, son usados para medir altos voltajes y corrientes por medio de instrumentos sensitivos de escala reducida, conjuntamente con relevadores para la protección del equipo contra los daños provocados por las sobrecargas, corto-circuitos, etc.

**CARACTERISTICAS DE LAS CONEXIONES DE LOS TRANSFORMADORES**  
Dentro de los arreglos más empleados de los transformadores podemos anotar los siguientes :

**2.6.1 ESTRELLA-ESTRELLA.**

- a).- El aislamiento en mínimo.
- b).- La cantidad de cobre es mínima.
- c).- Es económico para baja carga y alta tensión.

**2.6.2 ESTRELLA-ESTRELLA, CON TERCERARIO EN DELTA.**

a).- La delta proporciona un camino para la tercera armónica magnetizante, eliminando los voltajes de la tercera armónica en los devanados principales.

b).- Esta conexión aumenta el tamaño y el costo del transformador.

**2.6.3 DELTA-DELTA.**

a).- Se emplea muy poco debido a que no tiene neutro y no se puede conectar a tierra, por lo cual se necesita un banco de tierra que encarece al transformador.

b).- Usa cantidades mayores de cobre y de aislamiento.

**2.6.4 DELTA-ESTRELLA**

a).- Este arreglo se emplea tanto en transformadores elevadores de tensión así como en reductores de tensión.

b).- Al aterrizar el neutro se aíslan las corrientes de secuencia cero.

c).- Los voltajes de la tercera armónica se quedan circulando en la delta.

### 2.5.5 AUTO-TRANSFORMADOR.

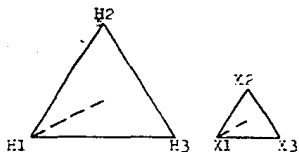
a).- Se emplea cuando la relación de transformación del circuito es menor a cuatro.

b).- Son más baratos que los transformadores equivalentes, debido a su menor tamaño y peso.

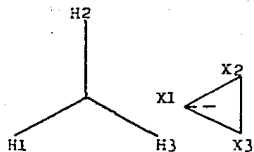
c).- Tiene mayor posibilidad de fallas.

d).- Como solo es una bobina, la baja tensión soporta también las sobretensiones.

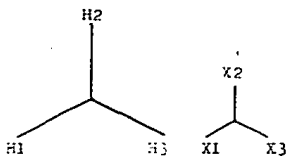
e).- Las conexiones del primario y del secundario deben ser iguales.



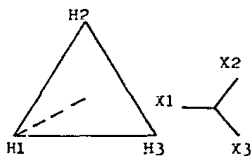
DELTA-DELTA CONNECTION



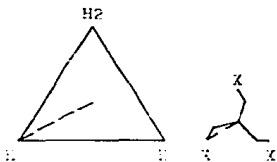
Y-DELTA CONNECTION



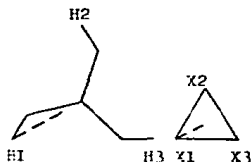
Y-Y CONNECTION



DELTA-Y CONNECTION



DELTA-Z CONNECTION



Z-Z CONNECTION

FIGURA 2.6 CONEXION DE TRANSFORMADORES



**2.6.6 BANCOS DE TIERRA** Es un transformador cuya función principal en sistemas aislados de tierra, es proporcionar un circuito de descarga de la corriente de corto-circuito a tierra, el transformador utilizado en este caso es del tipo ZIG-ZAG.

**2.6.7 OPERACION DE TRANSFORMADORES EN PARALELO** La conexión de los transformadores se utiliza para incrementar la potencia de un sistema eléctrico, ya que cuando un solo transformador no es capaz de soportar toda la carga se dispone de otro transformador conectado en paralelo con el primero, de manera que la carga se reparta entre los dos.

Existen algunas condiciones para que los transformadores sean conectados en paralelo y son :

a).- Los transformadores deben tener la misma secuencia de fases, ya que si no son acoplados en forma correcta las fases provocan un corto-circuito.

b).- Deben ser conectadas con la misma polaridad, para que el circuito este balanceado.

c).- Deben tener la misma relación de transformación en vacío, de no ser así originan una corriente de compensación que circularía por los transformadores, los cuales originan pérdidas que alteran el rendimiento de la instalación.

d).- No tiene importancia si los transformadores no tienen la misma capacidad de potencia o impedancia ( aunque esto provoca calentamiento al transformador de más baja impedancia ).

e).- Han de presentar la misma corriente de corto-circuito, es necesario puesto que la carga de los transformadores acoplados en paralelo se reparte en forma distinta cuando existe diferencia en dichas corrientes, el funcionamiento en paralelo se realiza en condiciones satisfactorias cuando las corrientes de corto-circuito no difieren del 10%.

f).- En este tipo de conexiones de los transformadores se tiene que poner mayor equipo de protección, ya que hay mayores probabilidades de un corto-circuito.

**2.7 CAPACITORES** Los capacitores son dispositivos formados por dos láminas conductoras separadas por una lámina dieléctrica que al aplicarse una diferencia de potencial almacenan carga eléctrica, los capacitores de alta tensión están sumergidos en un tanque con líquidos herméticamente cerrados, sus terminales salen a través de dos boquillas de porcelana.

Los capacitores monofásicos pueden ser de 50, 100, 150, 300 y 400 KVAR y los trifásicos de 300 KVAR.

Los capacitores se emplean para corregir el factor de potencia, aumentar las capacidades de las líneas o transformadores, los capacitores deben estar bien ventilados para que no sobrepasen la temperatura de diseño, ya que 10 grados arriba de la temperatura nominal se degradan un 70 % debido a que los dieléctricos se comportan en forma exponencial al aumentar la temperatura.

Si el capacitor sobrepasa la frecuencia de diseño, las pérdidas en el capacitor aumentan, los capacitores pueden trabajar hasta un 10 % arriba del voltaje de diseño aunque se acorta la vida de los mismos hasta en un 50 % .

**2.8 TIPO DE ALIMENTADORES** La energía eléctrica se transmite a través de conductores de cobre o aluminio, estos conductores deben estar aislados unos de otros y con respecto a tierra, los conductores deben estar protegidos contra daños mecánicos, medio ambiente, así como posibles descargas eléctricas.

Existen tres métodos para la distribución de energía eléctrica en las industrias y son :

a).- Por medio de cable aislado colocado dentro de tubería conduit.

b).- Por medio de cable armado con cinta barnizada aislante.

c).- Por medio de ductos metálicos en cuyo interior se encuentran los conductores, generalmente en forma de barras.

Cada uno de estos métodos tiene sus propias características con ventajas y desventajas entre sí, la selección del método más adecuado o la combinación de ellos dependerá de cual satisface los requisitos de la instalación eléctrica.

2.9 SELECCION DE LOS NIVELES DE VOLTAJE: Es posible que una planta tenga el mejor sistema de distribución que se haya diseñado a la capacidad adecuada y con lo necesario para garantizar su adaptabilidad y servicio sin interrupciones, pero perderá todas las ventajas mencionadas anteriormente si no se tienen los niveles de voltaje adecuados para su operación. Dentro de los niveles de voltaje existentes podemos mencionar los siguientes : 120, 240, 600, 2,400, 4,600, 6,900, 13,800, etc.

Los resultados de una elección adecuada de los voltajes redundarán en la disminución del costo del equipo, los cables, protecciones, muy poca regulación de carga, etc.

Con la selección adecuada se alcanza un mejor funcionamiento general del equipo, un sistema mas sencillo y una operación al más bajo costo posible, una de las consideraciones que se deben tomar en cuenta son el tamaño de la carga y la distancia a la que se transmitirá la energía eléctrica.

Estudios que se han realizado tomando en cuenta los costos en los sistemas de distribución como son transformadores, tableros, interruptores, cables, centros de carga, etc, se puede resumir en los siguientes :

2.9.1 SISTEMAS DE DISTRIBUCION DE MEDIANA TENSION El nivel de voltaje de 4,160 Volts generalmente es mejor para plantas con capacidad total de menos de 10,000 KVA, ya que para plantas de menos de 10,000 KVA el equipo de distribución cuesta menos para un voltaje de 4,160 Volts y que la diferencia en el costo de los cables es insignificante.

Los voltajes de 4,160 y 13,800 Volts, pueden resultar económicos para plantas de 10,000 a 20,000 KVA de capacidad, pero es esencial considerar el voltaje mas conveniente , ya que el costo del sistema de 4,160 Volts puede ser más económico, pero si la planta aumenta a 15,000 KVA o hasta 25,000 KVA entonces sería mas económico el sistema de 13,800 Volts con un sistema intermedio de 4,160 Volts.

El voltaje de 13,800 Volts casi siempre es el indicado para plantas de más de 20,000 KVA, ya que el equipo de distribución cuesta menos que el de 4,160 Volts y ocupa menos espacio, el costo del cable es menor puesto que requiere menos cobre.

2.9.2 SISTEMAS DE DISTRIBUCION EN BAJA TENSION El voltaje de 480 Volts es preferible para la gran mayoría de las plantas industriales sin considerarse el voltaje primario.

El voltaje de 220 Volts se recomienda sólo cuando menos en la tercera parte de la carga, ya que puede accionarse a 480 Volts y si no se desea incurrir en el costo de cambiar otros motores a 480 Volts.

Los voltajes de 220/120 y 240/120 Volts, solo se recomiendan para plantas muy pequeñas.

2.10 CONCLUSIONES Todo el equipo descrito anteriormente consume energía eléctrica, si por ejemplo se tiene a una planta de 1,000 KW instalados tanto en motores, alumbrado, capacitores, etc. y estan alimentados por un solo transformador de 1,200 KVA, con un factor de potencia de 0.85 se puede decir que la planta trabajaría sin problemas.

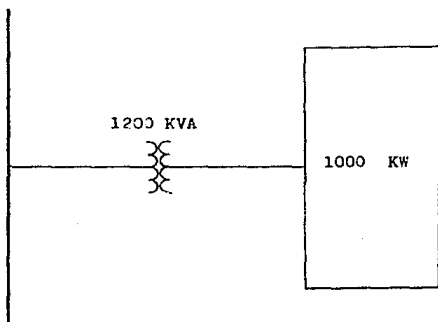


Figura. 2.7 ALIMENTACION CON UN SOLO TRANSFORMADOR

Pero en la realidad este factor de potencia no llega a mantenerse en el 85% deseado, sino que por lo general tiende a bajar debido a los programas y ciclos de trabajo de las industrias, que mantienen en pocas horas el pico de producción, pero el resto del día se mantiene con una demanda muy por debajo de la capacidad del transformador, ocasionando con esto que baje el factor de potencia menor al 85% de lo permitido, esto acarrea una gran cantidad de problemas que se convertirán en pérdidas de dinero ya que la compañía suministradora de energía impondrá multas por tener un factor de potencia menor al descrito anteriormente.

Por lo que nos obligará a comprar equipo para corregir el bajo factor de potencia, en cambio si la planta planea su subestación con varios transformadores dependiendo del ciclo de producción de la planta quedaria como resultado el esquema siguiente :

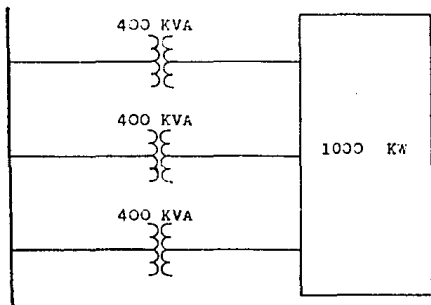


Figura. 2.8 ALIMENTACION CON DOS O MAS TRANSFORMADORES

Cada transformador puede trabajar en paralelo cuando la carga está al máximo o solamente trabajar uno cuando la demanda sea mínima.

Esto se puede realizar por medio de un programa de producción que nos fijará una demanda de KWHR y a su vez con un ciclo de demanda se tendría que proyectar la S.E. de la planta.

En conclusión se puede decir que la conveniencia de proyectar una S.E. de acuerdo al proceso de producción y no proyectar la S.E. y el proceso de manera independiente.

### CAPITULO III

#### BREVE HISTORIA DEL DESARROLLO DE LOS SISTEMAS DE ENERGIA ELECTRICA

El desarrollo del fenómeno de la inducción electromagnética por FARADAY, en 1831 que dió lugar al invento del generador eléctrico, es el punto inicial de la electrotecnia cuyo desarrollo esta íntimamente ligado al de los sistemas de energía eléctrica.

Generalmente se considera que los sistemas de energía eléctrica se inician en 1882 con las instalaciones de EDISON en NUEVA YORK, aunque existian ya algunas instalaciones de alumbrado utilizando lámparas de arco eléctrico.

Con el invento del transformador por GAULARD Y GIBBS en 1883 se hizo posible la elevación eficiente y económica de la tensión utilizando sistemas de corriente alterna para la generación y la transmisión de energía eléctrica, la cual desplazo al sistema de corriente continua, por otra parte la superioridad del motor de corriente continua sobre el de corriente alterna para las aplicaciones de tracción hace que se haya mantenido hasta la fecha los sistemas de tracción con corriente continua, sin embargo actualmente se prefiere hacer la alimentación con corriente alterna y realizar la conversión de corriente alterna a corriente continua.

En 1883 TESLA inventó las corrientes polifásicas, en el año de 1886 desarrollo un motor polifásico de inducción y en 1887, patentó en los ESTADOS UNIDOS un sistema de transmisión trifásico.

El sistema de corriente alterna trifásica se desarrolló rápidamente y en la actualidad es de empleo general, ya que representa la ventaja de que la potencia total suministrada es constante, siempre que el sistema trifásico sea equilibrado, mientras que un sistema monofásico la potencia es pulsante.

## CURVAS DE DEMANDA

3.1 CLASIFICACION DE LAS CARGAS Existen diversos criterios para la clasificación de las cargas, dentro de las cuales podemos anotar las siguientes :

3.1.2 LOCALIZACION GEOGRAFICA Un sistema de distribución debe atender usuarios de energía eléctrica localizados tanto en zonas urbanas como en zonas periféricas de la ciudad y se pueden clasificar de la siguiente forma :

ZONA	MVA / KM <sup>2</sup>
URBANA CENTRAL	40 - 100
URBANA	5 - 40
SEMIURBANA	3 - 5

Tabla 3.1 Localización geográfica de las cargas.

3.1.3 TIPO DE UTILIZACION DE LA ENERGIA La finalidad a la cual el usuario destina la energía eléctrica puede ser también como un criterio para clasificar las cargas.

- a).- Carga residencial.
- b).- Carga comercial.
- c).- Carga industrial.
- d).- Carga mixta.



3.1.4 CONFIABILIDAD Tomando en cuenta los daños que pueden sufrir los usuarios por las interrupciones del servicio de energía eléctrica, es posible clasificar las cargas en :

3.1.5 SENSIBLES Son las cargas en las que una interrupción instantánea en la alimentación de la energía causa importantes perjuicios al consumidor por ejemplo :

- a).- Máquinas computadoras.
- b).- Maquinaria controlada por sistemas electrónicos.
- c).- Hospitales.
- d).- Etc.

3.1.6 SEMISENSIBLES Son todas las cargas en las que una interrupción pequeña ( no mayor de 10 minutos ), no causan grandes problemas al consumidor.

3.1.7 NORMALES En este tipo cae el resto de los consumidores los cuales pueden tener un tiempo de interrupción comprendido en el intervalo :

$$1 < T < 5 \text{ Hrs.}$$

3.2 TARIFAS El criterio que se usa con mayor amplitud para la clasificación de las cargas, es a través de las tarifas que varían dependiendo de la empresa suministradora de energía, en nuestro caso la COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD En la siguiente tabla (3.2) se da la clasificación de tarifas que actualmente se aplica en el país.

---

TARIFA No 1	SERVICIO DOMESTICO.
TARIFA No 1A	SERVICIO DOMESTICO EN CLIMA MUY CALIDO.
TARIFA No 2	SERVICIO GENERAL HASTA 25 KW DE DEMANDA.
TARIFA No 3	SERVICIO GENERAL PARA MAS DE 25 KW DE DEMANDA.
TARIFA No 4	SERVICIO PARA MOLINOS DE NIXTAMAL.
TARIFA No 5	SERVICIO DE ALUMBRADO PUBLICO.
TARIFA No 6	SERVICIO DE BOMBEO DE AGUAS POTABLES Y NEGRAS.
TARIFA No 7	SERVICIO TEMPORAL.
TARIFA No 8	SERVICIO GENERAL EN ALTA TENSION.
TARIFA No 9	SERVICIO PARA BOMBEO DE AGUA PARA RIEGO AGRICOLA.
TARIFA No 10	SERVICIO DE ALTA TENSION PARA REVENTA.
TARIFA No 11	SERVICIO EN ALTA TENSION PARA EXPLOTACION Y BENEFICIO DE MINERALES.
TARIFA No 12	SERVICIO GENERAL PARA 5000 KW O MAS, DE DEMANDA EN TENSION DE 66 KW O SUPERIORES.

---

Tabla. 3.2 Tarifas aplicables a los usuarios de energía eléctrica.

**DEMANDA** La demanda de una instalación eléctrica es la carga en las terminales receptoras tomada en un valor medio en un intervalo de tiempo determinado. El período durante el cual es tomado el valor medio se denomina intervalo de demanda. El tiempo que se fije a este intervalo dependerá del valor de demanda que se desea conocer, estos intervalos usualmente son de 15 a 30 minutos o de una hora ver figura 3.1

Se afirma que para establecer una demanda es requisito indispensable indicar el intervalo de demanda, ya que sin éste el valor establecido no tendría ningún sentido práctico. La demanda se puede expresar en KW, KVA o Amperes.

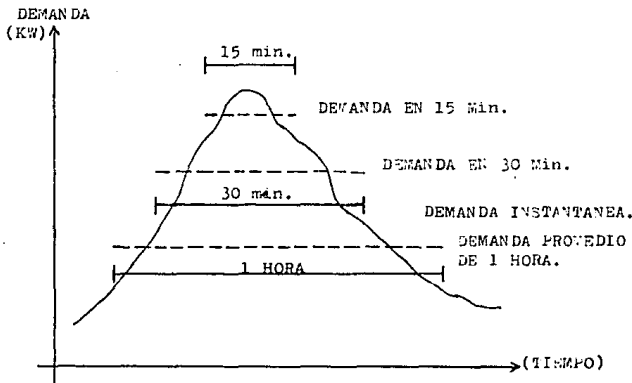


Figura. 3.1 CURVA DE DEMANDA

3.3.1 DEMANDA MAXIMA La demanda máxima de una carga es la demanda máxima mayor que se presenta en una carga, en un periodo de trabajo establecido. ( ver fig. 3.2 )

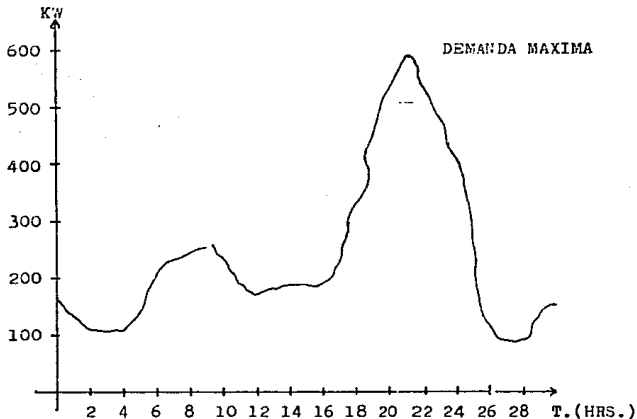


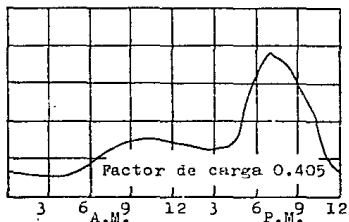
Figura. 3.2 DEMANDA MAXIMA

3.3.2 CARGA INSTALADA Es la suma de las potencias nominales de los servicios conectados en una zona determinada se expresa generalmente en : KVA, KW, MVA O MW.

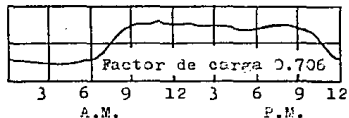
$$C i = K w \quad ( 1 )$$

3.3.3 FACTOR DE DEMANDA El factor de demanda, en un intervalo de tiempo ( t ) de una carga, es la razón entre la demanda máxima y su carga total instalada, este factor de demanda generalmente será menor que uno, siendo unitario solo durante el intervalo en que todos los aparatos conectados estuviesen absorbiendo sus potencias nominales, se puede expresar de la siguiente forma :

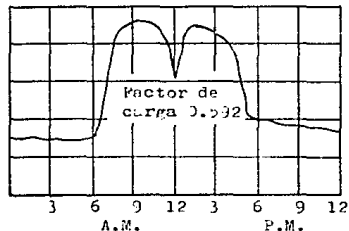
$$F D = D M ( t ) / C i \quad ( 2 )$$



a) CURVA DE CARGA HABITACIONAL.



b) CURVA DE CARGA COMERCIAL.



c) CURVA DE CARGA INDUSTRIAL.

CARGAS SERVICIOS HABITACIONALES	FACTOR DE DEMANDA
ASILLOS Y CASAS DE SALUD	45 %
ASOCIACIONES CIVILES	40 %
CASAS DE HUESPEDES	45 %
SERVICIOS DE EDIFICIOS RESIDENCIALES	40 %
ESTACIONAMIENTO O PERKSIONES	40 %
HOSPICIOS Y CASAS DE CUNA	40 %
IGLESIAS Y TEMPLOS	45 %
SERVICIO RESIDENCIAL S / AIRE ACOND.	40 %
SERVICIO RESIDENCIAL C / AIRE ACOND.	55 %

CARGAS COMERCIALES	FACTOR DE DEMANDA
TIENDAS Y ABARROTES	65 %
AGENCIA DE PUBLICIDAD	40 %
ALFOMBRAS Y TAPETES	65 %
ALMACENES DE ROPA Y BONETERIA	65 %
ARMERIAS	55 %
ARTICULOS FOTOGRAFICOS	55 %
BANCOS	50 %
BANOS PUBLICOS	40 %
BAZARES	50 %
BOTICAS, FARMACIA Y DROGUERIAS	50 %
CABARETS	50 %
CAFETERIAS	55 %
CAMISERIAS	65 %
CASAS DE MODAS	65 %
CENTROS COMERCIALES, TIENDAS DE DESC.	65 %
COLEGIOS	40 %
DEPENDENCIA DE GOBIERNO	50 %
EMBAJADAS, CONSULADOS	40 %
GASOLINERIAS	45 %
IMPRENTAS	50 %
JUQUETERIAS	55 %
PAPELERIAS	50 %
MERCADOS Y BOBETAS	50 %
MOLINOS DE NIXTAMAL	70 %
OPTICAS	55 %
PANADERIAS	40 %
PELUQUERIAS Y SALAS DE BELLEZA	40 %
RESTAURANTES	60 %
TEATROS Y CINES	50 %
ZAPATERIAS	60 %

EQUIPOS DE FUERZA	FACTOR DE DEMANDA
HORNOS DE ARCO E INDUCCION	100 %
SOLDADORAS DE ARCO Y RESISTENCIA	60 %
MOTORES PARA BOMBAS, ELEVADORES, MAQUINAS-HERRAMIENTA Y VENTILADORES	70 %
MOTORES PARA OPERACION CONTINUAS, TALES COMO FABRICAS TEXTILES	80 %

Tabla ( 3.3 ), en la cual se enlistan los factores de demanda reales aplicadas para servicio de baja tensión.

3.3.4 FACTOR DE UTILIZACION El factor de utilización de un sistema eléctrico en un intervalo de tiempo ( t ), es la razón entre la demanda máxima y la capacidad nominal del sistema. Es conveniente hacer notar aquí que, mientras el factor de demanda nos expresa el porcentaje de carga instalada que se está alimentando, el factor de utilización nos indica la fracción de la capacidad del sistema que se está utilizando durante un pico de carga, en el intervalo considerado.

$$F_u = D_M ( t ) / \text{Cap. inst.} \quad ( 3 )$$

3.3.5 FACTOR DE CARGA Es la razón entre la demanda promedio en un intervalo de tiempo dado y la demanda máxima observada en el mismo intervalo.

$$F_c = D_m / D_M \quad ( 4 )$$

En este caso el intervalo que generalmente se considera para el cálculo del valor de demanda máxima ( D M ) es el instantáneo. Para la determinación del factor de carga de un sistema, es necesario especificar el intervalo de demanda en el que se están considerando los valores de demanda máxima instantánea ( D M ) y la demanda promedio ( D m ), ya que para una misma carga, un período establecido mayor dará por resultado un factor de carga más pequeño.

$$F_c \text{ anual} < F_c \text{ mensual} < F_c \text{ semanal} < F_c \text{ diaria}$$

Se pueda decir que el factor de carga queda entre los siguientes límites :

$$0 < F_c < 1$$

**3.3.6 FACTOR DE DIVERSIDAD** Cuando varias cargas tienen que ser alimentadas por un mismo cable, deberá de tomarse en cuenta el concepto de diversidad de las cargas, ya que sus demandas no coinciden en el tiempo.

Esta diversidad entre las demandas máximas de un mismo grupo se establece por medio del factor de diversidad, que se define como la sumatoria de las demandas máximas individuales y la demanda máxima del conjunto.

$$F_d = \sum D_{m.i} / D_{M \text{ sis}} \quad ( F_d > 1 ) \quad ( 5 )$$

Este factor puede aplicarse a diferentes niveles de un sistema eléctrico como son :

- a).- Consumidores energizados de un mismo cable.
- b).- Entre transformadores de un mismo alimentador.
- c).- Entre alimentadores pertenecientes a una misma fuente.
- d).- Entre subestación eléctrica de un mismo sistema de distribución.

**3.3.7 FACTOR DE COINCIDENCIA** Este factor se define como el recíproco del factor de diversidad.

$$F_{co} = 1 / F_d \quad ( 6 )$$



A continuación se muestra la tabla 3.4 donde se resumen algunos de los factores de diversidad / coincidencia en algunos equipos o cargas.

EQUIPO / SISTEMA	F d	F c o
ENTRE TRANSFORMADOR S	1.20 - 1.35	0.83 - 0.74
ENTRE ALIMENTADORES PRIMARIOS	1.08 - 1.20	0.92 - 0.83
ENTRE S.B. DE DISTRIBUCION	1.05 - 1.25	0.95 - 0.08

Tabla. 3.4 Factores de diversidad / coincidencia.

2.3.8 FACTOR DE PERDIDAS Se define como la razón entre el valor medio y el valor máximo de la potencia disipada en pérdidas, en un intervalo de tiempo considerado.

$$F P = P m / P M \quad ( 7 )$$

En muchas ocasiones es muy difícil calcular el valor del factor de potencia, por lo cual se han desarrollado algunas relaciones entre el factor de pérdidas ( F P ) y el factor de carga ( F c ) y se han obtenido las siguientes relaciones :

$$F P = 0.3 + 0.7 F c^2 \quad ( \text{EUROPA} ) \quad ( 8 )$$

$$F P = 0.4 + 0.6 F c^2 \quad ( \text{E.U.} ) \quad ( 9 )$$

$$F P = 0.5 + 0.5 F c \quad ( 10 )$$

## FACTOR DE POTENCIA

Siempre que se aborda el tema del factor de potencia ( F P ), debemos de tener un concepto claro de lo que ésto implica.

Por lo tanto hemos planteado una serie de incognitas que a continuación se enumeran :

- a).- ¿Qué es el factor de potencia?
- b).- ¿Cómo se expresa el factor de potencia?
- c).- ¿Cuál es la causa de un bajo factor de potencia?
- d).- ¿Qué efectos tiene el factor de potencia en una planta industrial?
- e).- ¿En qué afecta un alto o bajo factor de potencia y cuáles son sus beneficios?
- f).- ¿Interviene el factor de potencia en el cobro de la energía eléctrica?
- g).- ¿cómo puede mejorarse el factor de potencia?

El objetivo de éste trabajo es tratar de plantear una solución breve a las preguntas presentadas con anterioridad e incluir una información adicional a los problemas relacionados con el factor de potencia.

**3.6 FUNDAMENTO DEL FACTOR DE POTENCIA** Un concepto muy fácil de traducir del factor de potencia, como un efecto simple, y es el basado en el hecho de que la corriente requerida por los motores de inducción, transformadores, hornos de calentamiento por inducción, resistencias de soldadura, lámparas fluorescentes, etc. pueden separarse en dos clases de corrientes, y las cuales son :

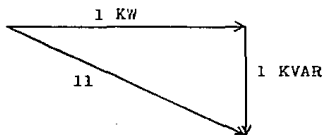
**3.6.1 CORRIENTE PRODUCTORA DE ENERGIA** La corriente productora de energía o corriente de trabajo es la que se convierte en útil, como un movimiento giratorio; tal como un torno, haciendo una soldadura o accionando una bomba de agua. La unidad de medición de energía producida es el Kilowatt ( K W ) .

**3.6.2 CORRIENTE MAGNETIZANTE** La corriente magnetizante es conocida también como carente de watts, reactiva o corriente sin trabajo, y la cual se requiere para producir el flujo necesario para la operación de dispositivos de inducción.

Sin la corriente magnetizante, la energía no podría fluir a través del núcleo de un transformador o a través del espacio de aire de un motor de inducción. La unidad de medición de los amperes magnetizantes es el Kilovar ( K VAR ) .

**3.6.3 LECTURA DE CORRIENTES** La corriente total que se lee sobre un amperímetro en un circuito determinado, se forma generalmente de la corriente magnetizante y la que produce energía. La unidad de los volts-amperes totales o energía aparente es el Kilovolt-ampere ( K VA ) .

La mayoría de los sistemas de energía de corriente alterna requieren tanto de los kilowatts como los kilovars. La adición de una corriente de kilovar y una de kilowatts, debe seguir un principio geométrico por lo que la corriente total puede encontrarse por medio de la relación de un triángulo rectángulo, como sigue :



$$(1 \text{ KVAR})^2 + (1 \text{ KW})^2 = 11^2$$

$$11 = \sqrt{(1 \text{ KVAR})^2 + (1 \text{ KW})^2}$$

Figura. 3.5 RELACION DE POTENCIAS

3.6.6 ECUACIONES DEL FACTOR DE POTENCIA Se pueden emplear las siguientes fórmulas cuando KW, KVAR y KVA se substituyen por sus respectivas corrientes :

$$KVA = ( (KW)^2 + (KVAR)^2 )^{1/2} \quad (11)$$

$$KVAR = ( (KVA)^2 - (KW)^2 )^{1/2} \quad (12)$$

$$KW = ( (KVA)^2 - (KVAR)^2 )^{1/2} \quad (13)$$

Otra definición de factor de potencia la cual es generalmente más útil, es la relación de KW o potencia de trabajo a los KVA totales o potencia aparente, esto es :

$$F.P. = KW / KVA \quad ( 14 )$$

$$KVA = KW / F.P. \quad ( 15 )$$

$$KW = KVA \times F.P. \quad ( 16 )$$

Dicho de otra forma, el factor de potencia es el factor por el cual debe de multiplicarse la potencia aparente para obtener la potencia de trabajo.

3.7 EFECTOS DE UN BAJO FACTOR DE POTENCIA Algunos de los efectos de un bajo factor de potencia en una planta industrial pueden ser causa de lo siguiente :

- a).- Sobrecarga en cables y transformadores.
- b).- Aumento de pérdidas en el cobre.
- c).- Nivel de voltaje reducido.
- d).- Iluminación reducida.
- e).- Aumento en los costos de energía.

3.7.1 REDUCCION DEL FACTOR DE POTENCIA Hay también otros factores que contribuyen a bajar el factor de potencia tales como :

- a).- El reemplazamiento de lámparas incandescentes por lámparas fluorescentes.
- b).- Uso de rectificadores en vez de equipos motogeneradores sincrónicos para las fuentes de corriente directa.
- c).- Aumento en la instalación de varios dispositivos de inducción.
- d).- Unidades de acondicionamiento de aire, entre otras.

La mayoría de estos cambios o reemplazos se hacen en interés del confort y eficiencia de los trabajadores, bajo costo de manufactura o avances técnicos, casi siempre el hecho de que ésto constituya a bajar el factor de potencia la planta se considera de segunda importancia.

En general a medida que una planta incrementa el empleo de motores u otros dispositivos de inducción se puede esperar a que el factor de potencia sea más pobre, a menos que se tomen las medidas necesarias para corregirlo.

3.7.2 RAZONES PARA MEJORAR EL FACTOR DE POTENCIA Algunas de las razones principales para mejorar el factor de potencia son :

a).- Reducir el pago de energía cuando hay un factor poderosamente incentivo en la condición del costo.

b).- Aumentar la capacidad de distribución eléctrica del sistema.

Aunque la primera es todavía de primordial importancia la segunda viene a ser más importante que lo económico, como los ingenieros saben, esto es especialmente verdadero cuando se emplean capacitores para mejorar el factor de potencia debido a que la capacidad eléctrica liberada es valuada en varias veces el costo de los capacitores.

### 3.8 FACTOR DE POTENCIA EN PLANTAS

a).- Es muy importante en cualquier planta industrial mantener un valor adecuado del factor de potencia, ya que un factor de potencia bajo, implica tener penalizaciones por parte de la compañía suministradora de energía eléctrica. Además de otros problemas que serán descritos a continuación.

b).- De acuerdo con estudios realizados por la COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD, INSTITUTO MEXICANO DEL PETROLEO, E INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ELECTRICAS y que fueron presentados en el seminario sobre el uso eficiente de la energía industrial, en noviembre de 1982, en la tabla 3.5 se muestran los valores típicos de factor de potencia para diferentes tipos de industria.

INDUSTRIA	RANGOS DEL FACTOR DE POTENCIA ( % )
AUTOMOTRIZ	75 - 80
CERVECERA	75 - 80
CEMENTERA	80 - 85
QUIMICA	65 - 75
MINAS D. CARBON	65 - 80
DEL VESTIDO	35 - 60
REC. ELECTROLITICO	65 - 70
FUNDICION	75 - 80
FORJA	70 - 80
HOSPITALES	75 - 80
FABRICA DE MAQUINAS	60 - 65
MAQUILADO	65 - 70
EDIFICIO EN OFICINAS	80 - 85
BOMBEO DE PETROLEO	40 - 60
FABRICA DE PINTURAS	55 - 65
PLASTICOS	55 - 70
TROQUELADO	60 - 70
PALERIA	65 - 80
TEXTILES	65 - 70

Tabla. 3.5 Valores típicos de factor de potencia en la industria.

3.9 PENALIZACIONES POR BAJO FACTOR DE POTENCIA - De acuerdo a lo establecido por la SECRETARIA DE COMERCIO, el usuario de energía eléctrica, debe mantener un promedio de 0.85 ( 85 % ) o más de factor de potencia, durante cualquier período de facturación. En caso de tener un factor de potencia menor del 85 %, la compañía suministradora tiene el derecho de cobrar al usuario el monto de la facturación por cobrar, por el cociente que resulte de dividir 0.85 entre el factor de potencia promedio obtenido en el promedio de facturación.

### 3.10 MAYOR CAPACIDAD DE TRANSFORMADORES POR BAJO FACTOR DE POTENCIA

1).- El factor de potencia interviene directamente en la elección de la capacidad de un transformador de acuerdo a la relación siguiente :

$$KVA_t = 'KW_c / P.P. \quad ( 17)$$

Donde :

$KVA_t$  = Potencia en KVA del transformador.

$KW_c$  = Carga real conectada al transformador.

P.P. = Factor de potencia de la carga.

2).- Tomando una carga unitaria real conectada al transformador y considerando diferentes valores de factor de potencia de la carga, en la tabla 3.6 se ve cual es el incremento de la potencia del transformador conforme baja el factor de potencia.



$KW_c$	F P	$KVA_t$
1	1.00	1.000
1	0.95	1.052
1	0.90	1.111
1	0.85	1.176
1	0.80	1.250
1	0.75	1.333
1	0.70	1.428
1	0.65	1.538
1	0.60	1.666
1	0.53	1.818
1	0.50	2.000

Tabla. 3.6 Incrementos de la potencia de un transformador conforme baja el factor de potencia.

3).- Lo indicado en la tabla 3.6 quiere decir que si una planta industrial tiene una carga real de 1,000 KW con un factor de potencia de 0.75 se requiere un transformador de la siguiente potencia : ( de la ecuación 17 )

$$KVA_t = 1,000 / 0.75 = 1,333 \text{ KVA}$$

Pero si se modifica el factor de potencia en la misma carga a 0.90 se requiere un transformador de la siguiente potencia :

$$KVA_t = 1000 / 0.90 = 1,111 \text{ KVA}$$

4).- De acuerdo a las capacidades nominales de los transformadores en ambos casos se requeriría un transformador de 1,500 KVA, pero el tener un factor de potencia de 0.90 en lugar de uno de 0.75 nos da las siguientes ventajas.

- a).- Se trabaja más eficientemente el transformador.
- b).- Se eliminan penalizaciones por bajo factor de potencia.
- c).- Se tienen menos pérdidas en el transformador.
- d).- Se tiene mayor capacidad disponible en el transformador para futuras ampliaciones.

3.11 CALIBRE DE CONDUCTORES REQUERIDOS POR BAJO FACTOR DE POTENCIA La corriente que circula en un conductor que alimenta a una carga está definida por las siguientes expresiones :

a).- Para carga monofásica :

$$I = P / ( V \times P.P. \times \eta ) \quad ( 18 )$$

b).- Para carga trifásica :

$$I = P / ( V \times P.P. \times \eta \times 3 ) \quad ( 19 )$$

Donde :

I = Corriente que circula en los conductores ( Amp. )

P = Potencia real de la carga ( Watts ).

V = Voltaje de operación de la carga ( Volts ).

P P = Factor de potencia ( P.U. )

$\eta$  = Eficiencia de la carga ( P.U. )

3.11.1 EFECTO JOULE EN LOS CONDUCTORES La corriente que circula por un conductor crea una disipación de calor ( efecto JOULE ), el cual está definido por las expresiones siguientes :

$$p d = R \times I^2 \quad ( 20 )$$

Donde :

pd = Potencia disipada en forma de calor ( Watts ).

R = Resistencia del conductor ( ohms ).

I = Corriente que circula por el conductor (Amp.).

3.11.2 LIMITE DE OPERACION DE LOS CABLES Considerando que el cable debe mantener la temperatura límite de operación de aislamiento, se requiere mantener a  $R I^2$  constante, esto quiere decir que si la corriente ( I ) se duplica la resistencia ( R ) debe reducirse a un cuarto de su valor, esto implica que para una longitud de cable constante, el área del conductor debe incrementarse en cuatro veces, por lo cual considerando que para mantener a  $R I$  constante, para una longitud del conductor y potencia real constante, el área del conductor es directamente proporcional al cuadrado de la corriente (  $A \propto I^2$  ). Manejando esta relación para determinar las áreas del conductor para diferentes valores del factor de potencia tenemos los resultados mostrados en la tabla 3.7 .

F.P. ( P.U. )	I ( P.U. )	AREA REQUERIDA ( P.U. )
1.00	1.000	1.000
0.95	1.052	1.108
0.90	1.110	1.234
0.85	1.176	1.384
0.80	1.250	1.562
0.75	1.333	1.777
0.70	1.428	2.040
0.65	1.538	2.366
0.60	1.666	2.777
0.55	1.818	2.305
0.50	2.000	4.000

de un conductor requerido.

3.11.3 CABLES ALIMENTADORES El tener un bajo factor de potencia en cables alimentadores puede ocasionar gastos extras, ya que a menor factor de potencia se requiere mayor calibre del conductor y por lo tanto mayor costo. Por ejemplo si se tiene una carga que consume una corriente de 100 amperes con un factor de potencia del 100 % (1.00), en la tabla 3.8 se muestran los calibres de conductor requeridos para los diferentes valores del factor de potencia.

F.P. ( P.U. )	I ( AMPERES )	CALIBRE ( AWG )
1.00	100	2
0.95	105	2
0.90	111	2
0.85	117	1/0
0.80	125	1/0
0.75	133	1/0
0.70	143	1/0
0.65	153	2/0
0.60	165	2/0
0.55	182	3/0
0.50	200	3/0

Tabla 3.8 Calibre de los conductores para valores diferentes del factor de potencia.

3.11.3 EJEMPLO Como se pudo ver las pérdidas de energía en un conductor por efecto JOULE, están definidas por la ecuación ( 20 ), es decir :

$$p d = R X I^2 \quad ( 20 )$$

Esto es, que para un conductor, cuanto más grande es la corriente que pasa son mayores que pérdidas. Suponiendo que se tiene un alimentador trifásico con calibre de 300 MCM, que trabaja con 280 amperes por conductor, y con un factor de potencia de 0.75, los conductores tienen una resistencia de 0.0001157 ohm / m ( de tablas ), la longitud del circuito es de 60 metros. Donde el alimentador trabaja 8 horas diarias durante 26 días al mes, entonces las pérdidas son :

$$p d = 0.0001157 X ( 280 )^2 = 9.07 \text{ w/m}$$

- Las pérdidas totales son :

$$p d_T = 9.07 X 3 \text{ conduc.} X 60 \text{ mtrs.} = 1632.6 \text{ w}$$

- Las pérdidas por día son :

$$p d_D = 1632.6 X 8 = 13056 \text{ WH}$$

Para el mismo alimentador pero ahora con un factor de potencia de 0.90 tenemos :

$$I = 280 \times ( 0.75 / 0.90 ) = 233.33 \text{ Amperes}$$

$$p d = 0.0001157 \times ( 233.33 )^2 = 6.28 \text{ W/m}$$

Las pérdidas totales son:

$$p d_T = 6.28 \times 3 \times 60 = 1130.4 \text{ W} = 1.13 \text{ kw}$$

Las pérdidas por día son:

$$p d_D = 1.13 \times 8 = 9.04 \text{ KWH}$$

Como se puede observar del ejemplo anterior, llevar al factor de potencia de 0.75 a 0.9, tiene un ahorro de energía de 4.016 KWH diarias, que con los costos de energía se tendría el siguiente ahorro mensual :

Por menor demanda máxima :

$$\text{Kilowatts ahorrados} = 1.632 - 1.13 = 0.5 \text{ Kw}$$

Ahorro por demanda máxima ( tarifa 8 - Ene. / 85 )

$$0.5 \times 928.96 = \$ 464.56$$

Ahorro por consumo :

$$0.5 \times 8 \text{ hrs} \times 26 \text{ días} \times 4.64 \text{ \$/KWH} = \$ 482.56$$

El ahorro total para el mes de Ene. / 85 es de :

$$464.48 + 482.56 = \$ 947.04$$

Ahora, haciendo las operaciones para todo el año de 1985, tiene la tabla siguiente :

MES	AHORRO ( \$ )
ENERO	947.04
FEBRERO	971.08
MARZO	994.47
ABRIL	1,020.19
MAYO	1,045.18
JUNIO	1,071.51
JULIO	1,098.17
AGOSTO	1,126.20
SEPTIEMBRE	1,153.52
OCTUBRE	1,182.23
NOVIEMBRE	1,212.33
DICIEMBRE	1,242.80
<b>AHORRO TOTAL AÑO DE 1985</b>	<b>13,064.72</b>

Tabla. 3.9 Indica el ahorro mensual obtenido

Considerando que una fábrica tiene una infinidad de alimentadores, se puede obtener un ahorro considerable.

**3.12 USO EFICIENTE EN EL ALUMBRADO** Existen algunos aspectos fundamentales que se deben considerar en las instalaciones de alumbrado :

**3.12.1 ALUMBRADO EN LOS PROYECTOS** Proyecto o reacondicionamiento de los edificios y comprende:

a). - La abertura de las ventanas debe proyectarse de tal manera que admitan la mayor cantidad de luz para iluminar toda el área del piso, ( si es posible ).

b). - En algunos casos es conveniente el uso de vidrios refractarios, difusores, domos ó láminas translúcidas a fin de mejorar la distribución de la luz diurna en el local, especialmente en las zonas alejadas de las ventanas.

c). - Las estructuras metálicas o techos con forma de diente de sierra y otras semejantes que se utilizan en pisos industriales, permiten obtener una iluminación diurna uniforme muy adecuada en toda el área y debe preferirse siempre que sea posible.

d).- Un factor importante al diseñar la iluminación diurna, es la relación entre el techo y la altura de las ventanas, a fin de no producir sombras inconvenientes.

3.12.2 EQUILIBRIO ENTRE LA LUZ DIURNA Y LA LUZ ARTIFICIAL EL equilibrio entre la luz diurna y la luz artificial, es necesario puesto que tener un balance adecuado proporciona un ahorro de energía en el transcurso del día, además de tener una mejor calidad de iluminación.

3.12.3 SISTEMA DE ALUMBRADO Siempre que se vaya a iluminar por primera vez un local, a verificar o modificar su nivel de iluminación, es necesario hacer un análisis de las tareas visuales que se realizarán, ya que de él depende la selección del sistema de alumbrado. Así tenemos:

- 1).- Iluminación general (espaciamiento de luminarios).
- 2).- Iluminación generalizada localizada ( concentrar en algunos locales la iluminación en el techo ).
- 3).- Iluminación localizada( colocar luminarios muy cerca del lugar de trabajo ).

Esto es recomendable para :

- a).- Trabajos con exigencias visuales muy críticas.
- b).- Si se necesita que la luz venga de una posición precisa.
- c).- Cuando la iluminación general no alcanza ciertas zonas.
- d).- Cuando el trabajador tiene deficiencia visual.
- 4).- Iluminación direccional ( la iluminación proviene de una dirección preferida o de la más conveniente ).

3.12.4 CALCULO ECONOMICO La inversión inicial comprende el costo d : los luminarios, lámparas y balastros, en cuanto al equipo y mano de obra necesario para la instalación. Es importante conocer la cantidad de lúmenes necesarios para el trabajo y el tiempo empleado.

### 3.12.5 ECUACIONES PARA CALCULAR EL COSTO ANUAL

Esto es el resultado de :

- a).- Cuota anual de amortización.
- b).- Consumo anual de energía eléctrica.
- c).- Gasto de reposición de las lámparas.
- d).- Gasto de limpieza.

Para la cuenta anual se considera el costo del luminario pero sin la lámpara o materiales que se consideraran como de reposición.

$$Ca = C_c \times \left( \frac{i (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right) \quad (21)$$

Donde :

Ca : Cuota anual.

Cc : Costo inicial.

i : Tasa de interes.

n : Tiempo de amortización normalmente es de 10 años.

### 2.13.6 ECUACIONES PARA OBTENER EL COSTO DE ENERGIA ELECTRICA CONSUMIDA.

$$C_e = 1.U. \times 31 Kw \times P \times L / 1000 \quad (22)$$

Donde :

Ce : Costo de la energía eléctrica consumida.

T.U: Tiempo de utilización.

31 kw: Costo del kilowatthora

p : potencia consumida por lampara incluyendo las pérdidas en el balastro.

L : Número de lámparas que componen la instalación.



### 3.13.7 ECUACIONES PARA OBTENER EL COSTO DE REPOSICION

$$Cr = ( T.U. / Ve ) \times ( Cl + Acc ) \times L \quad ( 23 )$$

Donde :

Cr : Costo de reposición.

Ve : Vida útil o económica normalmente del 70% de la vida promedio.

Cl : Costo de la lámpara.

Acc : Costo de los accesorios.

### 3.12.8 ECUACIONES PARA OBTENER EL COSTO DE LA MANO DE OBRA.

$$Cm = ( T.U. / Ve ) \times ( Hh \times CHh \times Na ) \quad ( 24 )$$

Donde :

Cm : Costo de la mano de obra.

Hh : Horas-hombre necesarias por luminario.

CHh : Costo de la hora-hombre.

Na : Número de luminarios en la instalación.

### 3.12.9 ECUACIONES DEL COSTO TOTAL ANUAL

$$Ct = Ca + Ce + Cr + Cm \quad ( 25 )$$

Donde :

Ca : Cuota anual.

Ce : Costo de energía eléctrica consumida.

Cr : Costo de reposición.

Cm : Costo de la mano de obra

2.12.10 REGLAS BASICAS PARA REDUCIR EL CONSUMO DE ENERGIA ELECTRICA EN EL ALUMBRADO.

1).- No dejar encendidas las lámparas que no se utilizan.

2).- Aprovechar al máximo la iluminación natural, no obstaculizándola o poniendo objetos oscuros.

3).- Preferir colores claros en las paredes, techos y muebles, puesto que este tipo de colores reflejan mejor la luz.

4).- Establecer niveles de iluminación adecuados.

5).- Utilizar las fuentes luminosas eficientemente, las inversiones necesarias se recuperan en poco tiempo.

6).- Habilitar programas de mantenimiento preventivo, los programas periódicos de limpieza y de reemplazo son económicamente atractivos.

7).- Facilitar los ajustes de los niveles de iluminación, para el alumbrado de vigilancia y en los casos en que es necesario recluir temporalmente la iluminación.

8).- Instalar atenuadores o separar en circuitos independientes las lámparas que deben estar encendidas.

9).- Automatizar siempre que sea posible los dispositivos automáticos como las fotoceldas, interceptores de tiempo o inclusive los programas computarizados.

10).- Promover la colaboración de todos, organizando pláticas de orientación para todo el personal, cursos sobre instalaciones eléctricas.

**3.13 ENERGIA FACTURADA** Para saber cuanto se paga por los KVAR, hay que examinar los factores de energía, con preferencia los correspondientes a un periodo de varios meses, a fin de obtener el promedio anual.

**3.13.1 METODOS DE COBRO DE LA ENERGIA** Para el cobro de los KVAR se sigue normalmente uno de los métodos siguientes :

**3.13.2 COBRO DE LA ENERGIA EN BASE A LA DEMANDA ( kw ) .**

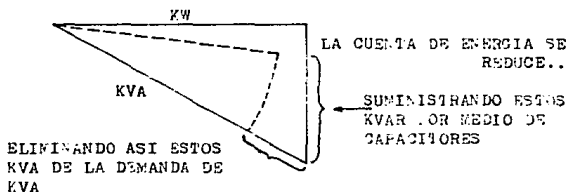
a). - Se utiliza en este caso una " demanda de facturación ", mediante la cual el factor de potencia de la carga contribuye a determinar los kw que se cargan.

b). - Normalmente se utiliza como base un factor de potencia de 0.85 ó 85 %, y la demanda en kw utilizada para la facturación se determina de la forma siguiente :

$$\text{Demanda de facturación} = \frac{0.85 \times \text{Demanda medida ( kw )}}{\text{Factor de potencia real}}$$

**3.13.3 COBRO DE LA ENERGIA EN BASE A LA DEMANDA KVAR** De acuerdo con el valor máximo de potencia aparente ( KVA ) consumida durante el mes, se hace un cargo directo por KVA.

Este cargo es afectado por los KVA pues estos aumentan el consumo de KVA, tal como lo muestra la figura 3.4



**Figura. 3.6 RELACION DE CONSUMO DE ENERGIA**

#### 3.13.4 COBRO DE LA ENERGIA POR CARGO DIRECTO.

a). - En algunos casos las compañías de electricidad hacen un cargo por separado correspondiente a los KVAR, basado en el valor máximo de los KVAR consumidos durante el mes.

b). - En estos casos es muy fácil encontrar la cantidad de capacitores necesarios para eliminar la carga reactiva, debiendo tenerse en cuenta que cada KVAR de capacitores elimina de la cuenta de energía un KVAR.

3.14 AUMENTO DE LA CAPACIDAD UTIL DE UN SISTEMA En la mayoría de las instalaciones industriales, la mayor parte de la carga está constituida por motores de inducción los cuales absorben una corriente reactiva o KVAR y bajan el factor de potencia. Los capacitores permiten aumentar la capacidad útil del sistema y de este modo permiten agregar motores, luces y otras cargas al sistema, sin sobrecargar los transformadores y otros equipos de distribución.

Dicho aumento continúa a medida que se agregan capacitores, hasta que se alcanza el factor de potencia unitario. Pero a medida que el factor de potencia aumenta, es mayor el número de capacitores necesarios para aumentar en 1 kw la capacidad útil del sistema.

Por lo tanto conviene agregar capacitores hasta el punto en el cual el costo de los capacitores necesarios para aumentar en 1 kw la capacidad útil del sistema sea igual al costo por kw. Por lo general resulta económico elevar el factor de potencia hasta 0.90 ó 0.95 .

### 3.15 SELECCION DE CAPACITORES

3.15.1 DESVENTAJAS DE UN BAJO FACTOR DE POTENCIA Un bajo factor de potencia indica una deficiencia eléctrica, lo cual es siempre costoso ya que el consumo de potencia activa es menor que la potencia aparente. Si se considera que el voltaje del sistema permanece casi constante, y si los volt-amperes exceden a los watts usados, es una indicación de que se está requiriendo corriente extra de las líneas de alimentación y que es la causa del aumento de los volt-amperes sobre los watts. A continuación se enlistan algunas causas del por qué es costoso un bajo factor de potencia.

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

b).- Un bajo factor de potencia también causa sobrecarga en los generadores, transformadores y líneas de distribución dentro de la misma planta industrial, las caídas de tensión y las pérdidas de potencia se tornan mayores de lo que deberían ser, todo esto representa pérdidas y desgaste en el equipo de una planta.

c).- Un bajo factor de potencia reduce la capacidad de carga del sistema eléctrico de la planta.

3.15.2 FORMAS DE MEJORAR EL BAJO FACTOR DE POTENCIA Los problemas que causan un bajo factor de potencia se pueden resolver agregando equipo de corrección al circuito eléctrico de la planta. Actualmente existen diversos tipos de aparatos que se han diseñado con el fin de mejorar el factor de potencia como son :

3.15.3 MOTORES SINCRONOS Estos motores ayudan a corregir hasta cierto punto el factor de potencia, sin embargo solamente nos pueden ayudar cuando operan a baja carga, ya que cuando operan sobrecargados toman potencia reactiva de las líneas de alimentación.

**3.15.4 CONDENSADORES SINCRONOS** Generalmente se usan en instalaciones de las compañías de energía eléctrica, pero son bastante grandes y costosos, estos aparatos son esencialmente motores sincrónicos que operan sobreexcitados o sin carga ( reacción de armadura ) .

**3.15.5 CAPACITORES** En plantas industriales, es el medio más práctico y económico para mejorar el factor de potencia, las mismas compañías de energía eléctrica usan capacitores en sus subestaciones, cuando no se justifica la instalación de condensadores sincrónicos que es de por sí más complicada y costosa.

Los capacitores mejoran el factor de potencia debido a que los efectos de la capacitancia son exactamente opuestos a los de la inductancia que es la característica de la mayoría de los equipos eléctricos ( motores, transformadores, etc. ). Al agregar capacitores a un circuito inductivo, esencialmente se está cancelando la inductancia de ese circuito, es esta forma, la cantidad neta de potencia reactiva se reduce y consecuentemente el factor de potencia aumenta.

**5.15.6 ALGUNAS DE LAS VENTAJAS DE LOS CAPACITORES SOBRE OTROS EQUIPOS.**

- 1). - Son más baratos.
- 2). - Se pueden cambiar fácilmente de un lugar a otro de la red de distribución eléctrica, según sean requeridos.
- 3). - Se pueden instalar económicamente en forma descentralizada y no necesitan un mantenimiento constante.
- 4). - La capacidad de corrección de un banco de capacitores puede aumentarse muy fácilmente.

**3.15.7 LOCALIZACION DE LOS CAPACITORES** Existen dos métodos para corregir el factor de potencia por medio de capacitores y son :

- 1). - Consiste en la instalación de un grupo o batería de capacitores conectados a la línea en un punto central, tal como un tablero de interruptores o un panel de distribución, generalmente este método se usa únicamente para cumplir con las regulaciones sobre factor de potencia de las compañías que suministran la energía eléctrica.

2). - Este método es el más eficiente y consiste en la instalación de capacitores individuales directamente en el punto de bajo factor de potencia, esto es, cerca de los motores. Este método goza de todas las ventajas de la instalación de capacitores en batería y además se obtienen beneficios adicionales como :

- a).- Aumento de la capacidad del sistema.
- b).- Mejoras en el nivel de tensión.
- c).- Reducción de pérdidas de potencia.

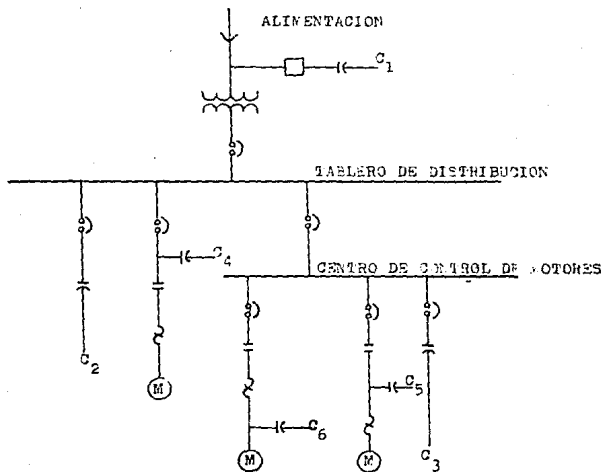


Figura. 3.7 POSIBLES UBICACIONES DE CAPACITORES.

### 3.15.8 VENTAJAS DE LA INSTALACION DE CAPACITORES EN GRUPO O BATERIA

1).- La instalación en batería mejora el factor de potencia general de la planta, reduciendo así el costo mensual de la energía eléctrica.

2).- Las baterías de capacitores tienen un costo más bajo por kilovar, que el costo del alambrado de capacitores individuales para cada motor.

3).- El costo del alambrado de una batería de capacitores es más bajo por kilovar que del costo del alambrado de capacitores individuales para cada motor.

### 3.15.9 VENTAJAS DE LA INSTALACION DE CAPACITORES INDIVIDUALES

a).- Menor caída del voltaje en el alambrado a los motores, reduciendo el calentamiento perjudicial debido a las corrientes excesivas.

b).- Los capacitores se pueden conectar y desconectar del servicio según se necesiten. En esta forma, el factor de potencia se ajusta a cualquier tipo de carga y se obtiene una mejor regulación en el voltaje.

c).- La capacidad de los capacitores requeridos para los motores individuales es fácilmente obtenida de tablas.

d).- Tanto motores como cualquier tipo de maquinaria con capacitores propios, tiene mucha flexibilidad en casos de cambio de ubicación dentro de la planta.

e).- La principal desventaja de las instalaciones de capacitores individuales para motores o equipos inductivos, es que las unidades de capacitores pequeños tienen un costo más elevado por kilovar que las unidades mayores. Cuando se trata de corregir el factor de potencia a varios motores pequeños conectados al mismo circuito, la forma más económica de hacerlo es instalando capacitores de 10 kvar a 15 kvar de capacidad nominal directamente a las líneas de alimentación de los motores, de esta forma se corrige el factor de potencia del grupo completo.

Generalmente motores mayores de 10 H.P. se corrigen con capacitores individuales y motores más pequeños se corrigen en grupo.



5.15.10 RECOMENDACIONES PARA INSTALAR LOS CAPACITORES - por lo dicho anteriormente, los capacitores deberán instalarse tan cerca de la carga como sea posible, sin embargo, de acuerdo a la fig. ( 3.5 ) los capacitores podran instalarse en diferentes ubicaciones dependiendo de :

- Tipo de carga.
- Factores económicos.

1).- Cuando la razón para instalar capacitores es unicamente la de no pagar el sobrecosto directo por bajo factor de potencia impuesto por la compañía suministradora, éstos podrían ser :  $C_1$  y  $C_2$  ( de la fig 3.5 ), dependiendo del costo del capacitor más el costo del equipo de protección, estos puntos no se tendrá la libertad de cerca al sistema o aumento en la tensión de circuitos.

2).- Cuando en un centro de carga se tienen motores pequeños o con un factor de diversidad, es más económico instalar capacitores en los puntos  $C_2$  o  $C_3$  . De la figura 3.5, en donde con un número menor de kvar se mejora el factor de potencia, teniéndose la ventaja de liberar carga o parte del sistema y evitar pérdidas en alimentadores.

3).- La ubicación más deseable de los capacitores para corregir el factor de potencia sería en los puntos  $C_4$  ,  $C_5$  y  $C_6$  ( de la fig 3.5 ), donde se prevee corregir el factor de potencia en la carga y permite conectar los capacitores con el motor al mismo tiempo y con un sólo elemento de protección.

5.15.11 EJEMPLO En el siguiente ejemplo se observará el ahorro que puede representar al mejorar el factor de potencia.

Se tiene una planta industrial con un factor de potencia del 68% ( 0.68 ), la tarifa de la compañía suministradora contiene un cargo por demanda en kilowatts de \$ 928.96, por cada kilowatt, además de los cargos por energía consumida de \$ 4.64 para cada kilowatt de acuerdo a la tarifa 8

De acuerdo con la facturación por uso de energía eléctrica, en un mes, la planta promedio una demanda de 350 kw y un consumo de 86,000 kwh, entonces sus pagos constan de :

-	Costo de demanda	=	350 X 928.96 =	\$ 325,136.00
-	Costo de energía	=	86,000 X 4.64 =	\$ 399,040.00
				<hr/>
TOTAL				\$ 724,176.00

Si la compañía suministradora penaliza por su bajo factor de potencia de acuerdo a la siguiente relación.

$$\text{Fac. c / Penalización} = \frac{\text{Importe de la fac. X 0.85}}{\text{Factor de potencia promedio}}$$

$$\text{Penalización} = ( 724,176 \times 0.85 ) / 0.68 = \$ 905,202.00$$

Ahora si el factor de potencia se corrige hasta el 85% ( 0.85 ), para el siguiente mes por medio de capacitores, la factura sería de \$ 724,176.00

Esto significa que se ha logrado una reducción de:  
\$ 184,044.00

Para saber los KVAR necesarios para mejorar el factor de potencia de 0.68 a 0.85, se logra determinar en base a la tabla ( 3.6 ), esto nos da un factor de multiplicación de 0.458, entonces :

$$350 \text{ kw} \times 0.458 = 160 \text{ kvar}$$

Asumiendo que el costo de los capacitores estáticos instalados es de \$ 10,000.00 por cada kvar, los 160 kvar en capacitores nos costaría \$ 1'600,000.00 , el tiempo en que amortiza esta inversión es de :

181,044.00 ----- 1 Mes

1'600,000.00 ----- X Mes

Despejando :

$$X = ( 1'600,000 / 181,044 ) = 8.83 \text{ Meses}$$

Después de estos primeros 9 meses, los ahorros mensuales contienen sin embargo ningún por corrección.



## CAPITULO IV

### INTRODUCCION

Uno de los objetivos de este capítulo es el de presentar los términos y conceptos que son fundamentales para un entendimiento adecuado del equipo de control para motores y sus aplicaciones.

El objetivo principal será el de establecer lineamientos para la selección de equipo de control de los motores, principalmente los métodos de arranque a tensión plena y a tensión reducida.

En virtud de que el 90 % de la totalidad de los motores utilizados son de corriente alterna ( C.A. ), los motores de corriente directa ( C.D. ), los de rotor devanado y los de conmutación de C.A. , que solo tienen aplicaciones limitadas no serán incluidos en este trabajo. El uso de altos voltajes ( 2,400 , 4,800 y mayores ), introduce requerimientos que son adicionales a los equipos para 600 volts y aunque los principios básicos no varían, estos requerimientos adicionales no se incluyen en este capítulo.

4.1 GENERALIDADES Se define a un controlador como ;  
" cualquier interruptor o dispositivo que se use normalmente  
para arrancar o parar un motor " , ( NTIE 403.56 ).

"Cada controlador debe ser capaz de arrancar y parar al  
motor que controla y en el caso de un motor de corriente al-  
terna, debe poder interrumpir la corriente a rotor  
bloqueado" , ( NTIE 403.57.a ).

Un controlador cubrirá algunas o todas de las siguien-  
tes funciones:

- 1).- Arranque.
- 2).- Paro.
- 3).- Protección de sobrecarga.
- 4).- Protección de sobrecorrientes.
- 5).- Movimientos reversibles.
- 6).- Cambios de velocidad.
- 7).- Pulsaciones.
- 8).- Inversión rápida.
- 9).- Control de secuencia.

4.2 CONDICIONES DE OPERACION DE LOS MOTORES Un motor  
por lo general está sujeto a un trabajo más severo en su a-  
rranque y durante el período de aceleración. En este tiempo  
tienden a circular normalmente corrientes bastante altas, a  
menos que se tomen medidas para limitarlas a valores menores  
El valor de corriente de arranque únicamente depende de las  
características de diseño del motor ( impedancia equivalente  
a rotor bloqueado ) y de la tensión de suministro, la carga  
aplicada determina el tiempo de aceleración.

Debe cuidarse que la corriente de arranque se limite,  
para que la caída de tensión no afecte la operación de otros  
equipos. Cuando un motor de C.A. arranque a tensión plena,  
requiere una corriente de arranque de 5 a 7 veces la corri-  
ente nominal a plena carga. Este aumento de corriente en la  
línea de alimentación, produce un incremento de la caída de  
tensión en el conductor que alimenta al motor.

Por lo anterior en el caso de motores trifásicos relativamente grandes ( del orden del 20 % o más de la capacidad de un transformador o de un generador conectado a el ), se tendrá que analizar esa perturbación.

**4.2.1 ARRANQUE DE MOTORES** El arranque de un motor a tensión plena, proporciona el máximo par de arranque aunque produce también el máximo aumento de la carga del sistema. Esta carga es igual a los KVA de arranque del motor a plena tensión.

La corriente de arranque es reactiva, con un factor de potencia entre 0.30 y 0.15 aproximadamente, para las potencias entre 125 y 1000 H.P. respectivamente. Al ir aumentando la velocidad, la corriente se va acercando a su valor nominal de plena carga y el factor de potencia se eleva a 0.85 o más.

**4.3 CAIDA MAXIMA DE TENSION** La caída máxima de tensión aceptable es del 20 % de la tensión nominal en las barras del tablero.

Y la cual estará limitada por :

a).- La caída máxima de tensión permitida, debido al equipo energizado ( contactos, equipo de control, alumbrado, etc. ).

b).- Par de arranque mínimo requerido por la carga.

La caída de tensión puede reducirse :

a).- Instalando relevadores para tener una secuencia de arranque en los motores.

b).- Instalando capacitores para mejorar el factor de potencia, reduciendo la reactancia del sistema o disminuyendo la corriente de arranque cuando es posible una selección apropiada del arrancador.

**4.4 METODOS DE ARRANQUE** Existen dos métodos que se pueden usar, para arrancar motores de jaula de ardilla con base en la tensión aplicada durante este período :

- 1).- Arranque a tensión plena.
- 2).- Arranque a tensión reducida.

Los métodos de arranque por devanado bipartido y por conexión estrella-delta están incluidos en el método de tensión reducida según la norma NOM-j-328-1977.

**4.4.1 ARRANQUE A TENSION PLENA** Como su nombre lo indica, un arrancador a tensión plena o a través de la línea, conecta directamente el motor a las líneas. Un motor conectado en esta forma, demanda una corriente alta transitoria de arranque y desarrolla un máximo par de arranque que acelera la carga a plena velocidad en el tiempo más corto posible.

- a).- Arrancador manual.
- b).- Arrancador magnético.

**4.4.2 ARRANCADOR MANUAL** Un arrancador manual es un controlador de un motor cuyo mecanismo de contacto es operado por un entrelace mecánico. Los arrancadores manuales no proveen protección por bajo voltaje o disparo por bajo voltaje.

Los arrancadores manuales pueden ser del tipo :

- a).- HP fraccionados.
- b).- HP integral.

1).- Arrancador manual para potencia fraccionaria. Estos arrancadores controlan y dan protección por sobrecarga a los motores de 1 H.P. o menores, en 115 o 230 volts, monofásicos, y pueden ser de uno o dos polos y se operan por medio de una palanca.

2).- Arrancador manual para potencia integral ( HPI ) Este arrancador viene en dos versiones de dos o tres polos, para controlar motores monofásicos hasta de 5 H.P. y motores polifásicos hasta de 10 H.P. respectivamente, y tienen dos o tres relevadores de sobrecarga respectivamente.



4.4.3 ARRANCADOR MAGNETICO El arrancador magnético se distingue del arrancador manual, en el uso de un electroimán, el cual permite que se tenzan los circuitos abiertos o cerrados a través de contactos y no de palancas como es en el caso de los arrancadores de tipo manual.

La principal ventaja de los contactores magnéticos es que se pueden maniobrar desde uno o varios puntos lejanos de el motor y en especial cuando son de alto voltaje. Algunos de los arrancadores del tipo magnético son :

1).- Arrancador reversible el cual se emplea cuando se requiere invertir el sentido de rotación de un motor de inducción jaula de ardilla, esto se logra intercambiando la conexión de dos fases cualesquiera que éstas sean. El intercambio de la fases se hace usando dos juegos de contactores, uno para rotación " hacia adelante " del motor y otro para rotación " hacia atras " del motor.

2).- Arrancador de velocidad múltiple se usa cuando una carga requiere de un motor dos o más velocidades. El arrancador consiste de un grupo de contactores contenidos en una misma cubierta, cada contactor opera al motor en una determinada velocidad, éstos arrancadores se pueden obtener para dos, tres, o cuatro velocidades.

4.5 ARRANQUE A TENSION REDUCIDA Este método es usado cuando es necesario reducir la corriente de arranque de un motor por necesidades del sistema.

Dependiendo de las características de operación y su aplicación un arrancador a tensión reducida, puede ser alguno de los siguientes :

- a).- Arrancador de resistencias o reactor primario.
- b).- Arrancador de autotransformador.
- c).- Arrancador para devanado bipartido.
- d).- Arrancador para conexión estrella-delta.

4.5.1 ARRANCADOR DE RESISTENCIA PRIMARIA El arrancador de resistencia primaria contiene resistencias que se conectan en serie con cada fase del devanado del motor dividiendo la tensión de la línea entre la resistencia y los devanados. Cuando el motor ha alcanzado una cierta velocidad se desconectan las resistencias quedando los devanados con la tensión de la línea. La conexión de las resistencias durante el arranque puede efectuarse en forma manual o automática.

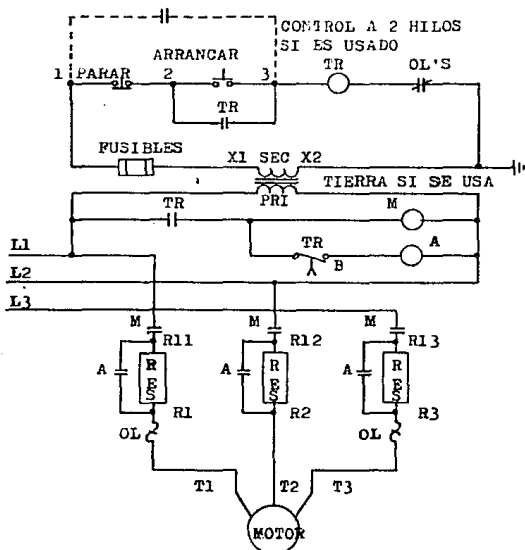


Figura. 4.1 DIAGRAMA ELEMENTAL TIPO RESISTENCIA PRIMARIA

En lugar de resistencias pueden utilizarse reactores, teniéndose el mismo efecto.

4.5.2 ARRANCADOR DE AUTOTRANSFORMADOR El arrancador de autotransformador puede ser de dos o tres devanados conectados en delta abierta o en estrella respectivamente, cada devanado contiene una o más derivaciones ( comúnmente de 50, 65 y 80 % de la tensión de la línea ) a los cuales se conecta el motor durante el arranque, una vez que el motor alcanza una cierta velocidad el autotransformador se desconecta del motor. La conexión y desconexión del autotransformador puede efectuarse en forma manual o automática.

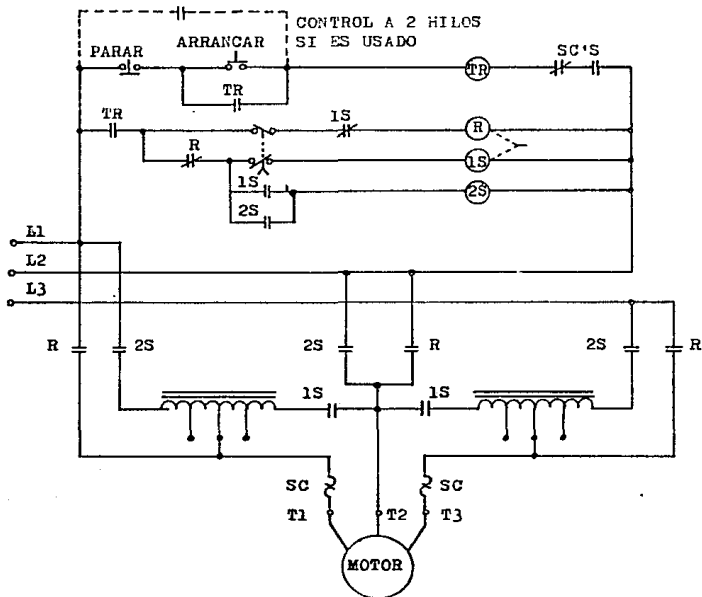


Figura. 4.2 DIAGRAMA ELEMENTAL TIPO AUTOTRANSFORMADOR.

4.5.3 ARRANCADORES PARA DEVANADO BIPARTIDO Los arrancadores para devanado bipartido se usan en motores de inducción jaula de ardilla que tienen devanados en paralelo, este consiste de dos contactos magnéticos una a cada devanado del motor y su capacidad es de la mitad de la potencia total del motor. Un contactor conecta a la tensión de línea uno de los devanados del motor para su arranque después de un tiempo, el otro contactor accionado por un relevador con retardo de tiempo conecta también a la tensión de línea el segundo devanado del motor en paralelo con el primero.

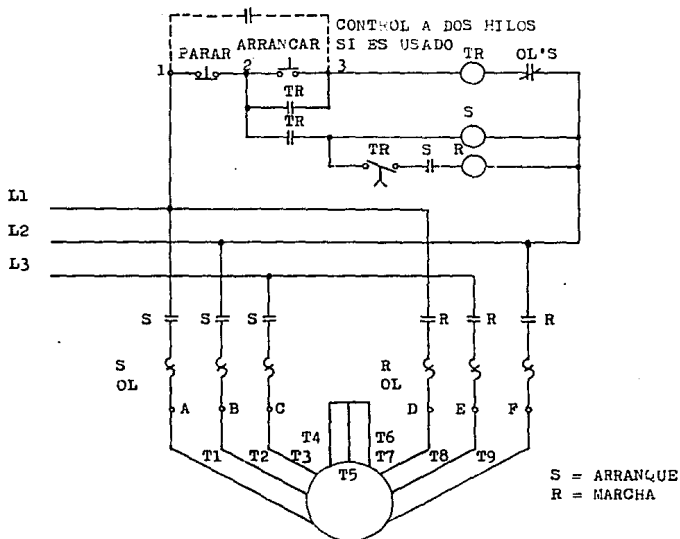


Figura. 4.3 DIAGRAMA ELEMENTAL TIPO DEVANADO BIPARTIDO.

4.5.4 ARRANCADORES PARA CONEXION ESTRELLA-DELTA Los arrancadores para conexión estrella-delta consisten de contactores magnéticos que se conectan en estrella a los devanados del motor durante el arranque, una vez que el motor alcanza una cierta velocidad, los conecta en delta para su operación normal. CONTROL A 2 HILOS SI

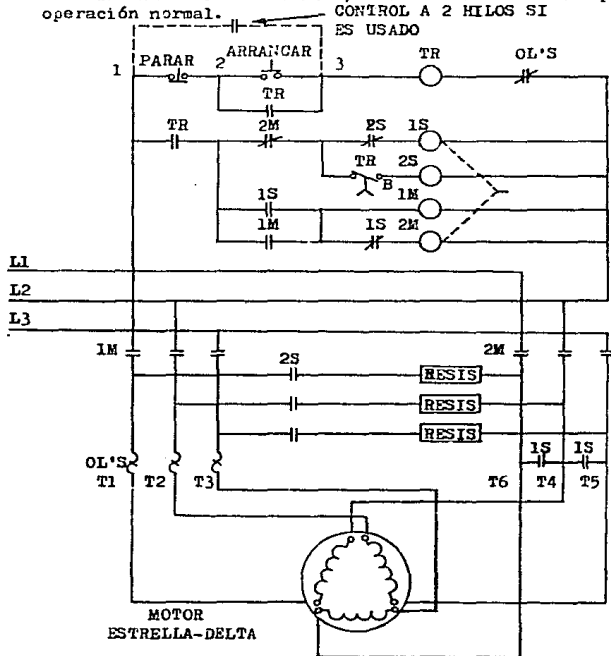


Figura. 4.4 DIAGRAMA ELEMENTAL TIPO CONEXION ESTRELLA-DELTA.

**4.5.5 DISPOSITIVOS DE PROTECCION.** La protección contra sobrecarga (sobrecalentamiento) de los motores debido a una sobrecorriente puede ser provista por una de las dos familias básicas de dispositivo de protección.

1).- Protectores de motor por monitoreo por temperatura. Estos brindan la mejor protección por que monitorean la temperatura real del motor, en algunos sistemas se incluyen los sensores en el embobinado del motor, éstos accionan una alarma o disparo externos y remotos, este tipo de protección es la mas eficaz pero no la más económica.

2).- La mejor protección para el motor por peso invertido se logra con el uso de dispositivos sensores de corriente, los más simples y baratos son los fusibles con características de tiempo definido, los relevadores de sobrecarga de amortiguador magnético y los relevadores térmicos de sobrecarga. El más eficaz de éstos es el relevador sensor de corriente de sobrecarga tipo térmico.

**4.5.6 ARRANCADOR COMBINADO** Cuando el controlador y el medio de desconexión ocupan una misma cubierta se le llama " arrancador combinado " y puede ser con :

1).- Desconectador sin fusible. Se usa cuando se tiene protección externa contra corto-circuito, este medio de desconexión puede abrir con carga y bloquearse en la posición de abierto.

2).- Interruptor con fusible. Se usa cuando la capacidad interruptiva de los interruptores termomagnéticos no alcanza a cubrir la del sistema y se requiere proteger contra fallas al motor y su circuito desde el arrancador. Un inconveniente es que si se opera un fusible permite la operación monofásica del motor.

3).- Interruptor sin fusible. Se usa como alternativa del anterior.

4).- Interruptor termomagnético. Se usa cuando se requiere proteger contra cualquier tipo de falla entre el arrancador y el motor, abre las tres fases evitando el funcionamiento monofásico del motor.

5).- Interruptor magnético. Es similar al termomagnético pero sin la unidad térmica, por lo que únicamente dispara debido a la acción de corrientes de corto-circuito que es la única que se requiere cuando se usa un arrancador combinado.

4.6 SELECCION DE ARRANCADORES. Para determinar una selección adecuada de un arrancador deben de tomarse en cuenta algunos factores, los cuales pueden ser :

- 1).- Características del sistema.
- 2).- Características del motor.
- 3).- Características de la carga.
- 4).- Medio ambiente.
- 5).- Normas y reglamentos.
- 6).- Costo del equipo.

4.6.1 ARRANCADORES A TENSION PLENA La selección de un arrancador a tensión plena ( T.P. ), se hará siempre y cuando se cumplan con los requisitos siguientes :

- 1).- Requisitos y recomendaciones de las NTIE.
- 2).- Cuando el suministro de energía es a través de la subestación propiedad del usuario se usará un arrancador a tensión plena ( se puede no usar, si la capacidad del motor es del 20 % de la tensión nominal ).
- 3).- Se elegirá un arrancador a T.P. ,si la carga mecánica acoplada al motor requiere de un alto par de arranque.
- 4).- La naturaleza de la carga acoplada al motor, nos determinará el tipo de función que el arrancador a T.P. debe proporcionar a su motor asociado.
- 5).- La función que un motor deberá desempeñar y su potencia dependerá específicamente del tipo de proceso a que este sometido.
- 6).- Si se determina que el motor será de una sola velocidad, reversible o no reversible, el tamaño de su arrancador se seleccionará de acuerdo a su potencia nominal y de su corriente a rotor bloqueado ( tablas de la norma NEMA ICS ).
- 7).- Cuando un equipo requiera un par de arranque alto que no nos permita el uso del arrancador a tensión reducida, siendo la potencia del motor suficiente para causar disturbios en el sistema eléctrico, deberá cambiarse la tensión de alimentación a un valor más alto.

8).- Si se especifica que el motor es de velocidad múltiple, se deberá conocer el número de velocidades, el arreglo y el número de devanados del motor. Igualmente deberán determinarse las características del par y de la potencia que el motor proporcionará a su carga.

9).- En los arrancadores para motores de velocidad múltiple debe tenerse en cuenta el tipo de motor seleccionado y la conexión de sus devanados. Básicamente se tienen los siguientes tipos de arrancadores :

- 1).- Para motores de un devanado:
  - a).- Tipo potencia constante.
  - b).- Tipo par constante o par variable.
- 2).- Para motores de dos devanados:
  - a).- Tipo conexión estrella-delta.
  - b).- Tipo conexión dos deltas abiertas.

10).- El tamaño del arrancador se seleccionará de las normas NEMA ICS. , de acuerdo a la máxima potencia que desarrollará el motor en el caso de un par constante, o variable o de su potencia nominal en el caso de par constante, de la corriente a rotor bloqueado y del ciclo de trabajo del motor en ambos casos.

4.6.2 ARRANCADORES A TENSION REDUCIDA Se usará este tipo de arrancadores cuando se cumplan los puntos siguientes

1).- Cuando no se cumplen cualquiera de los requisitos mencionados en los incisos 1, 2 y 3 ( ver 4.6.1 incisos del 1 al 3 ), del parrafo anterior, será necesario el uso de arrancadores a tensión reducida.

2).- De acuerdo a las características que la carga requiera para su arranque, de lo anterior dependerá el tipo de arrancador que se deba usar, aunque influye también el arreglo de los devanados del motor en el caso de arranque del tipo bipartido o estrella-delta.



3).- Es necesario tambien conocer las características de par-velocidad la cual deberá permitir desarrollar a su motor asociado, dentro de las cuales podemos señalar:

1).- Par a velocidad nominal del motor ( T ).

2).- Par de arranque a tensión plena ( Tt ).

3).- Par resistente de la carga ( Tc ).

4).- El par de arranque, es el par a rotor bloqueado del motor establecido en la norma NEMA MG1-12.37 y depende de la letra de diseño del motor y de la tensión aplicada al mismo.

El par de arranque a tensión reducida ( Tr ), o par resultante de la aceleración en función del par de arranque a tensión plena ( Tt ) está dada por :

$$Tr = Tt \left( \frac{V}{100} \right)^2 \quad ( 4.1 )$$

El par neto de aceleración ( Tn ), para llevar la carga de una velocidad  $N_1$  a una velocidad  $N_2$ , es la diferencia del par resistente de la carga y del par del motor en un intervalo de velocidad ( N ).

$$Tn = Tr - Tc \quad ( 4.2 )$$

Para cualquier tipo de arrancador a tensión reducida, siempre deberá cumplirse, que para todos los intervalos de velocidad, el par resultante de aceleración sea mayor al par resistente de la carga (  $Tr > Tc$  ). El par de operación del motor a velocidad nominal puede determinarse de la siguiente manera :

$$T = \left( \frac{HP \times 746}{RPM} \right) \text{ Kg}\cdot\text{m} \quad ( 4.3 )$$

5).- Además de las características de par-velocidad que el arrancador debe permitir desarrollar a su motor, deberá tenerse cuidado de que el tiempo de aceleración no sea demasiado grande, tal que el motor pueda sufrir sobrecalentamiento excesivo que dañe a su aislamiento. El tiempo para acelerar al motor y a su carga de una velocidad  $N_1$  a una velocidad  $N_2$  se determina con la siguiente fórmula:

$$t = ( G \times D^2 \times ( N_2 - N_1 ) ) / 94 \times T_n \quad ( 4.4 )$$

Donde

$T_n$  en Kg-m

$N_2 - N_1$  : Incremento de velocidad en RPM.

$G \times D^2$  : Momento volante total (del motor y de la carga referida al motor en Kg-m<sup>2</sup>).

El tiempo total de aceleración desde el reposo hasta la velocidad nominal es :

$$T_1 = \frac{GD^2}{94} \sum_{i=1}^m \frac{AN_i}{T_n i} \quad [seg]$$

En cualquier caso, el tiempo de aceleración no debe de exceder de 30 segundos ( NORMA NEMA ICS - 2.321.41 ).

5.5.3 Resumen de las características de cada uno de los métodos de arranque.

1).- TENSION PLENA. Proporciona el par de arranque y la eficiencia más alta, es decir, el mayor par ( KVA ) de arranque y se usará cuando :

- a).- Se causen disturbios en el suministro.
- b).- Se requieran incrementos de par durante el arranque.

2).- DEVANADO BIPARTIDO : Reduce la corriente de arranque, se tiene un arranque con transición cerrada conectando los devanados seccionados en dos o más pasos.

3).- REACTOR O RESISTENCIAS : Reduce la corriente de arranque, se tiene transición cerrada, arranque insertando una impedancia ( reactor ), o resistencia en el circuito del motor durante el arranque. El par KVA es menor que con el método de autotransformador.

4).- AUTOTRANSFORMADOR CON TRANSICION CERRADA : Reduce el arranque, se tiene una mejor eficiencia que con otros métodos de arranque.

5).- ESTRELLA-DELTA CON TRANSICION CERRADA : Reduce la corriente de arranque, cuando los devanados están conectados en estrella, la tensión que reciben es del 58 % de la tensión nominal.

## 5.7 PRINCIPIO DE OPERACION DE LAS MAQUINAS ELECTRICAS.

5.7.1 Un motor es una máquina que transforma la energía eléctrica en energía mecánica.

5.7.2 Los motores de corriente directa, son aquellos que para funcionar emplean corriente directa y de acuerdo a su conexión se clasifican en :

a).- Motor serie, tiene como característica principal un alto par de arranque y es propicio para el movimiento o transporte de cargas muy pesadas, solo debe tenerse cuidado de no dejarlo sin carga, puesto que puede debocarse.

Para el arranque así como para el control de la velocidad de éstos motores es necesario emplear una resistencia en serie con el inducido.

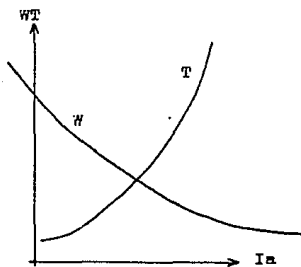
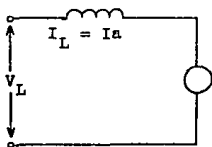


Figura. 4.5 CURVA Y DIAGRAMA DE UN MOTOR SERIE DE C.D.

b).- Motor paralelo, tiene como principal característica que mantiene una velocidad casi constante aunque la carga del motor esté variando.

Para el arranque es necesario colocar una resistencia en serie con el inducido de manera que no sea excesiva la corriente de arranque y además le sirve para el control de su velocidad.

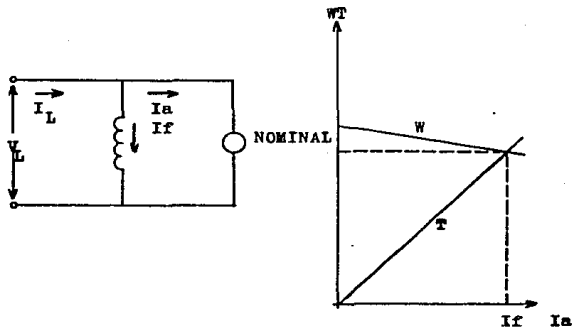


Figura. 4.6 CURVA Y DIAGRAMA DE UN MOTOR EN PARALELO DE C.D.

c).- El motor compuesto tiene una conexión como se muestra a continuación :

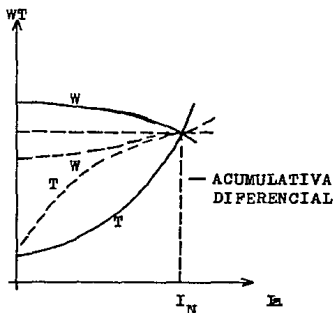
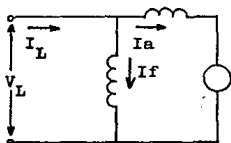


Figura. 4.7 CURVA Y DIAGRAMA DE UN MOTOR COMPUESTO DE C.D.

Se clasifica como un motor serie estabilizado cuando el campo en derivación es muy pequeño pero suficiente para garantizar el control de su velocidad y se le llama motor en derivación estabilizado cuando a los motores de demasiada potencia se les agrega un campo serie para garantizar una absorción de potencia constante.

d).- Curvas características de comportamiento de los motores de corriente directa :

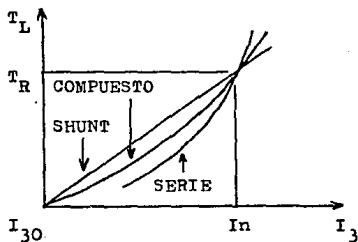
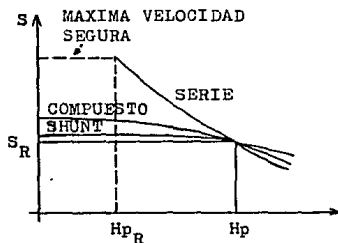


Figura. 4.8 CURVAS DE LOS DIFERENTES TIPOS DE MOTORES DE C.D.

5.7.3 Motores de corriente alterna, son aquellos que para su funcionamiento emplean corriente alterna y se pueden clasificar de la manera siguiente :

a).- Motores de inducción, en este tipo de motor, la conversión de energía mecánica se realiza en la parte giratoria de la máquina ( rotor ).

Este es el tipo más común de motor de corriente alterna, la energía se conduce al rotor en forma inductiva, de la misma manera como lo recibe el secundario de un transformador.

Los motores de inducción jaula de ardilla, son de un costo/HP relativamente bajo, tienen un buen par de arranque y cierta capacidad de sobresarga. Su eficiencia es muy alta y ocasionalmente tiene problemas.

En general son motores de velocidad constante, en el sentido que el cambio en la carga no afecta la velocidad en más de un 5 % .

Este tipo de motor tiene desventajas cuando se requiere un control de velocidad, cuando el control de velocidad es imprescindible, se utiliza un motor devanado y así el control de velocidad se resuelve conectando resistencias de control, al rotor o empleando un sistema de velocidad ajustable.

Los motores de rotor devanado difieren de los de jaula de ardilla, solamente por la construcción del rotor. El estator de ambas es similar, además de controlar la velocidad el motor de rotor devanado también desarrolla un par de arranque mucho mayor. Esto hace que tenga una baja eficiencia a carga plena y una variación muy grande de velocidad al presentarse cargas variables ( que no se presentan en el caso del motor jaula de ardilla ).

b).- Motores sincrónicos polifásicos, estos motores se construyen con un estator devanado muy similar al usado en los motores de inducción ( jaula de ardilla o rotor devanado ), pero con un rotor de polos que se excitan con corriente directa desde un pequeño generador en derivación auto excitado, montado sobre una extensión de la flecha. La corriente directa alimenta el campo del rotor a través de los escobillos y los anillos deslizantes o por medio de un alternador y un puente de rectificadores montados en la misma flecha.



Los motores sincrónicos como tales no tienen par de arranque por lo que es necesario emplear alguno de los métodos para llevarlos cerca del sincronismo, el método más usado consiste en proveer los polos del rotor con una jaula de ardilla.

Este motor puede entonces arrancarse de la misma manera que un motor de inducción, cuando está próximo a alcanzar su velocidad sincrónica el campo de corriente directa del rotor se aplica, el motor continua su marcha hasta su velocidad sincrónica.

Este tipo de motor opera a una velocidad promedio constante y absoluta sin ser afectado por la carga, dentro de cierto límite, la velocidad varía instantánea y exclusivamente durante los cambios de carga.

En el caso del motor de inducción el factor de potencia es siempre atrasado y varía dentro de una gama fija por la magnitud de la carga. En cambio en el motor sincrónico es VARIABLE Y CONTROLABLE, esto último se logra haciendo cambios en la excitación de corriente directa.

Cuando el factor de potencia del motor es unitario se dice que la excitación está normal, una sobreexcitación causará que el motor opere con un factor de potencia atrasado.

A continuación se muestran algunas ventajas del motor sincrónico ;

- a).- Son menos costosos a cierta potencia y velocidad.
- b).- Se construyen con entrehierros amplios ( V.E. ).
- c).- Tienen una eficiencia alta, ( a velocidades bajas y con un factor de potencia unitario ).
- d).- Velocidad constante y absoluta.
- e).- Ajuste del factor de potencia del motor a cualquier valor.

Los motores sincrónicos se emplean en ;

- a).- Donde no existan arranques frecuentes y se requiera velocidad constante.
- b).- Donde la carga sea substancialmente constante.
- c).- Donde se requiera un alto factor de potencia o corriente de este.

CAPITULO V

5 ANALISIS ECONOMICO. Debido a los altos costos de energía eléctrica, y que continuamente se siguen incrementando, es necesario optimizarse. De acuerdo a la publicación del DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACION, el cual indica las cuotas aplicables mensualmente a los consumidores de energía eléctrica, en la tabla 5.1 se muestran las cuotas para usuarios en las tarifas 8 y 12 ( que son las que se aplican a la industria ).

CONCEPTO	COSTO ( ENERO DE 1984 )	
	TARIFA 8	TARIFA 12
CARGA POR DEMANDA MAXIMA POR CADA KILOWATT DE DEMANDA MAXIMA MEDIDA	\$ 600.00	\$ 620.00
CARGO POR CADA KILOWATT HORA CONSUMIDO	\$ 3.00	\$ 2.50

Tabla. 5.1 Cuotas aplicables a usuarios de las tarifas 8 y 12 .

5.1 DETERMINACION DE LA DEMANDA MAXIMA La demanda máxima medida la determina la compañía suministradora de energía por medio de unos instrumentos de medición los cuales indican la demanda media en kilowatts, durante cualquier intervalo de 15 minutos, en el cual el consumo de energía eléctrica sea mayor que en cualquier intervalo de 15 min, en el período de facturación.

La tarifa 8 se aplica a los usuarios que reciben energía en alta tensión ( menor de 66 Kv ) y con una demanda inicial de 20 Kw o más.

La tarifa 12 se aplica a los usuarios que reciben energía en alta tensión en 66 Kv o más. En la tabla anterior ( tabla 5.1 ), se mostraron en particular los cargos para el mes de ENERO de 1984, las cuales deberán ser incrementados mensualmente en forma acumulativa ( 2.5 % ), lo cual se mostrará en la tabla 5.2 .

COSTO ( EN PESOS )				
	TARIFA 8		TARIFA 12	
	POR KILOWATT DEMANDA MAXIMA	POR KILOWATT HORAS CONSUMIDAS	POR KILOWATT DEMANDA MAXIMA	POR KILOWATT HORAS CONSUMIDAS
ENERO	600.00	3.00	620.00	2.50
FEBRERO	615.00	3.07	638.30	2.56
MARZO	630.39	3.15	651.39	2.62
ABRIL	646.13	3.23	667.69	2.69
MAYO	662.28	3.31	684.36	2.76
JUNIO	678.84	3.39	701.47	2.83
JULIO	698.81	3.48	719.00	2.90
AGOSTO	713.21	3.56	736.98	2.97
SEP.	731.04	3.65	755.41	3.04
OCT.	749.31	3.94	774.29	3.12
NOV.	768.25	3.84	793.65	3.20
DIC.	787.25	3.93	813.49	3.28

Tabla 5.2 Muestra los cargos incrementados en un 25% para el año de 1984

5.1.2 CONTROL DE LA DEMANDA MAXIMA. Para cualquier planta industrial es muy importante controlar la demanda máxima, ya que el tener una demanda máxima elevada respecto a la demanda promedio de la planta representa tener sobrecostos considerables, que se tendrán que pagar de acuerdo a los costos mostrados en la tabla anterior para cada kilowatt de demanda máxima medida.

5.2 CONCEPTOS DE DISTRIBUCION DE ELECTRICIDAD EN LAS PLANTAS DE CEMENTO. Para las necesidades de energía eléctrica y para potencia de abastecimiento por vía seca, pueden indicarse las siguientes ordenes de magnitud :

1).- Energía para la producción de una tonelada de cemento ( 100 KWH ), para una potencia a suministrar ( para 100 toneladas de cemento por día ), de 1 M VA.

2).- Para una fábrica de cemento mediana ( de una capacidad de producción de 3,000 toneladas por día ) 30 M VA.

3).- Para fábricas de cemento mayores, hasta de 150 M VA.

4).- Distribución de la potencia de suministro entre grupos receptores de energía :

a).- Del 60 % , para motores con potencia mayor de 250 Kw a baja tensión.

b).- Del 30 % , para motores menores de 250 Kw a baja tensión.

c).- Del 10 % , para desempolvado ( electrofiltros ), iluminación y servicios auxiliares.

5.2.1 ESQUEMA DE LA INSTALACION DE DISTRIBUCION. El diagrama de la figura 5.1 representa una configuración para una fabrica de cemento, comprendiendo dos lineas de hornos.

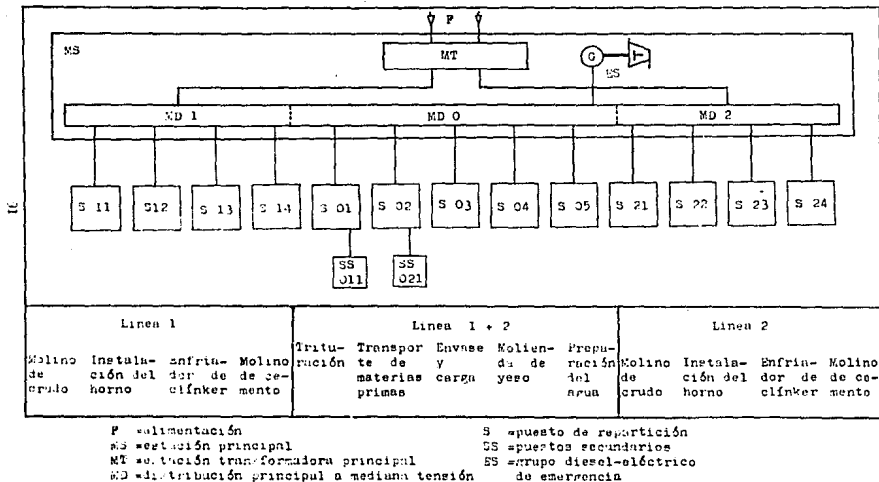


Figura. 5.1 ESQUEMA DE LA DISTRIBUCION DE ELECTRICIDAD.

En el diagrama anterior, las secciones D.M.T<sub>1</sub> y D.M.T<sub>2</sub> alimentan a cada una de ellas, una línea del horno con la parte que les corresponde de las instalaciones de molienda de crudo y de cemento, mientras que la sección D.M.To asegura la alimentación de una parte del proceso común a las dos líneas.

Si se diseña la subestación eléctrica de acuerdo al proceso de la planta, ( como se mencionó en el capítulo II ) donde se pudiera jugar con la carga y los transformadores, los transformadores operarían en paralelo cuando la demanda de la planta fuese máxima y trabajar solamente con un transformador cuando la demanda fuese mínima, ( ver fig. 5.2 ).

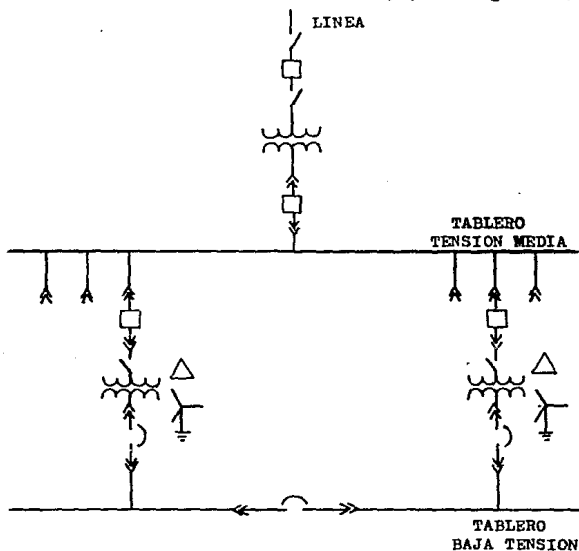
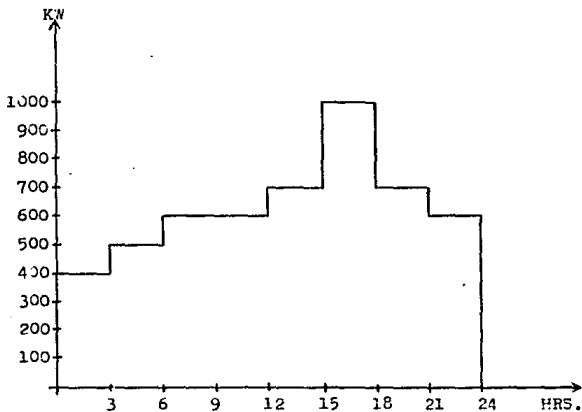


Figura. 5.2 DIAGRAMA UNIFILAR

5.3 EJEMPLO DEL CONTROL DE LA DEMANDA MAXIMA A continuación se verá un ejemplo del ahorro que se puede obtener controlando la demanda máxima.

Considerando que una plant industrial trabaja un turno de 24 horas diarias, 26 días al mes, y que tiene un costo de energía eléctrica diario en la tarifa No 8, de acuerdo a la gráfica 5.1



Gráfica 5.1 En la cual se muestra el consumo de energía eléctrica diario de una fábrica en la tarifa No 8 .

De la gráfica 5.1 se tiene lo siguiente :

- 1).- Demanda máxima de 1,000 K WH.
- 2).- Consumo diario de 5,000 K WH.
- 3).- Consumo mensual de 130,000 K WH.

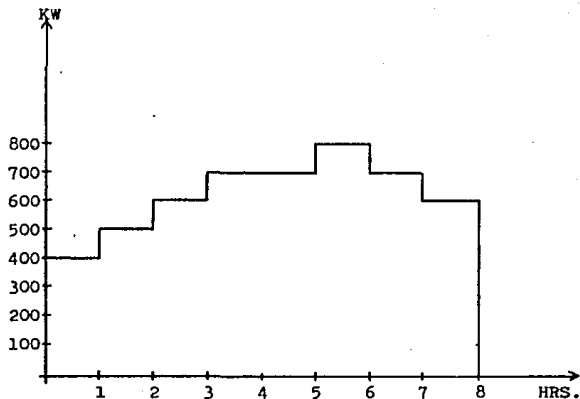
Durante el año de 1984, se tendrán que pagar las siguientes cantidades, como se muestra en la tabla 5.3

COSTO EN PESOS			
MES	DEMANDA MAXIMA	CONSUMO	TOTAL MENSUAL
ENERO	600,000	390,000	990,000
FEBRERO	615,000	399,750	1'014,750
MARZO	630,000	409,743	1'040,118
ABRIL	646,134	419,987	1'066,121
MAYO	662,134	430,487	1'092,774
JUNIO	678,844	441,249	1'120,093
JULIO	695,816	452,280	1'148,096
AGOSTO	713,211	463,587	1'176,798
SEPT.	731,041	475,177	1'206,628
OCT.	749,317	487,056	1'236,628
NOV.	768,050	499,232	1'267,373
DIC.	787,251	511,713	1'298,964
TOTAL ANUAL	8'277,326	5'380,261	13'657,587

Tabla 5.3 Muestra las cantidades mensuales a pagar de acuerdo a la gráfica 5.2



Si a la misma planta mediante un estudio del sistema de operación se logra modificar la grafica de la demanda, manteniendo el mismo consumo de KWH, como se muestra en la gráfica 5.2



La gráfica 5.2 Muestra una demanda máxima modificada, manteniendo el mismo consumo que en la gráfica 5.5

De la gráfica 5.2 se tiene como resultado :

- 1).- Demanda máxima de 800 K W.
- 2).- Consumo diario de 5,000 K WH.
- 3).- Consumo mensual de 130,000 K WH.

Durante el mismo año de 1984, con los mismos costos de energía, se tendrían que pagar las cantidades que se muestran en la tabla 5.4

COSTO EN PESOS			
	DEMANDA MAX.	CONSUMO	TOTAL
ENERO	480,000	390,000	870,000
FEBRERO	442,000	399,750	891,750
MARZO	504,000	409,743	914,043
ABRIL	516,907	419,983	936,894
MAYO	529,830	430,487	960,317
JUNIO	543,076	441,249	984,325
JULIO	556,653	452,280	1'008,933
AGOSTO	570,569	463,587	1'034,156
SEP.	584,833	476,177	1'061,010
OCT.	599,454	487,056	1'086,510
NOV.	614,440	499,232	1'113,672
DIC.	629,801	511,713	1'141,514
<b>TOTALES</b>	<b>6'371,563</b>	<b>5'381,257</b>	<b>12'003,124</b>

Tabla 5.4 Indica las cantidades mensuales a pagar, mejorando la gráfica de la demanda máxima.

Manteniendo el mismo consumo de energía eléctrica en la planta, pero modificando la demanda máxima se tiene que :

1).- En lugar de pagar durante el año de 1984, la cantidad de \$ 13'657,587.00 se tendría que pagar :  
 \$ 12'003,124.00 , lo cual nos da una diferencia de :  
 \$ 1'654,463.00 , que equivale a un ahorro del 12.12 % por concepto de pago de energía modificando la demanda máxima.

2).- Esto nos da una idea de la importancia que tiene el controlar la demanda máxima en una planta industrial.

#### 5.4 CONCEPTOS QUE SE DEBEN TOMAR EN CUENTA PARA LOGRAR UN AHORRO CONSIDERABLE.

1).- Demanda máxima - Para cualquier planta industrial es importante controlar este parámetro, ya que tener una demanda máxima muy elevada con respecto a la demanda promedio de la planta, representa un sobrecosto considerable ( que se tiene que pagar de acuerdo a la tabla 5.3 ), por cada kilowatt de demanda máxima medida.

Considerando que una planta obtiene un mejor control de la demanda máxima, ya sea por la modificación en sus procesos de fabricación o por reducir sus pérdidas eléctricas se tendrá como resultado un ahorro, ( durante el año de 1984 por cada kilowatt de demanda máxima que disminuya ), de aproximadamente \$ 8,277.30

2) Factor de potencia - Independientemente de las penalizaciones que tiene el usuario de energía eléctrica cuando el período de facturación resulta con un factor de potencia promedio del 58 % ( 0.58 ) el trabajar en estas condiciones tiene como consecuencia :

a).- La capacidad de uso en los transformadores sea menor.

b).- La capacidad de manejo de carga en los conductores se vea menguada.

c).- Se tiene mayores pérdidas en los cables y equipo.

3) Regulación de tensión - En general el contar en un sistema eléctrico con un buen nivel de tensión, de acuerdo a los valores nominales de los diferentes equipos, de la instalación y dentro de las variaciones permitidas por las normas, asegura una operación en forma eficiente a los equipos y tener un nivel adecuado de pérdidas de energía eléctrica.

a).- El funcionamiento de motores con altas caídas de tensión representa mayores pérdidas tanto propias como en el conductor que los alimenta, debido a que se incrementa la corriente para mantener la potencia constante.

b).- El tener el mismo problema en un circuito de alumbrado representa una menor eficiencia en los luminarios para obtener un buen nivel lumínico adecuado a las características de cada local.

c).- Ahorro de energía en sistemas de alumbrado - Se puede bajar el consumo de energía para sistemas de alumbrado mediante el uso de luminarios más eficientes de acuerdo a las características del local.

## CONCLUSIONES

Para lograr una optimización del uso de la energía eléctrica así como un ahorro económico es indispensable para cada planta en particular realizar una serie de estudios técnicos de acuerdo a lo visto anteriormente para lograr disminuir la demanda máxima principalmente de las formas siguientes :

1).- Mediante un estudio de proceso y mediciones del consumo de energía, obtener la curva de consumo diario para determinar las cargas que no son indispensables y las cuales operan en los picos de consumo, desplazandolas para que operen en momentos en que la planta tenga un menor consumo de energía.

2).- Tratar en lo posible, ( de acuerdo a las necesidades del proceso ) que los motores vayan arrancando secuencialmente de mayor a menor capacidad.

3).- Tener un buen control del factor de potencia y, mediante un estudio tanto técnico como económico tratar de mejorarlo mediante el uso de capacitores y motores sincros, lo cual ayuda a disminuir las pérdidas eléctricas y mejorar el nivel de tensión en el sistema.

4).- Contar con los niveles de tensiones adecuados, de acuerdo a las características técnicas de los equipos que operan en el sistema, lo cual trae como consecuencia en forma general la disminución de las pérdidas, y una mejor utilización de los equipos esto se puede lograr principalmente utilizando las derivaciones adecuadas en los transformadores de potencia y de distribución, mejorando el factor de potencia, el calibre de los conductores sea el adecuado, y en casos extremos estudiar la posibilidad de incluir un cambiador de derivaciones bajo carga en el transformador principal.

5).- Tratar de emplear los equipos y materiales que sean los más adecuados y eficientes como es el caso de las luminarias, que como se observó anteriormente, hay lamparas que tiene una emisión lumínica mayor que otras de la misma potencia, con lo cual se puede lograr un ahorro de energía.

## BIBLIOGRAFIA

1. CEMENTO PORTLAND, FABRICACION, PROPIEDADES Y EMPLEO  
AUSENCIO AGUILAR CALDERON, INVESTIGADOR DEL IMCYC
2. REVISTA DEL IMCYC, No. 200, VOL. XXV, ENERO 1988
3. MAQUINAS ELECTRICAS, TRANSFORMADORES Y CONTROLES  
HAROLD W. GINGRINCH, PRENTICE HALL
4. INDUSTRIAL POWER SYSTEMS HANDBOOK  
DONALD BEEMAN, Mc GRAW-HILL
5. MODO DE PROYECTAR UN BUEN SISTEMA DE DISTRIBUCION EN  
UNA INDUSTRIA  
GENERAL ELECTRIC COMPANY-Mc GRAW-HILL
6. DIAGRAMAS DE ALAMBRADO  
SQUARE'D MEXICO, S.A.
7. INTRODUCCION A LOS SISTEMAS ELECTRICOS DE DISTRIBUCION  
ING. P. ESPINOZA LARA, D.E.P.F.E. 1985