

45  
Ley



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLÁN

"CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA EN LA  
EMPRESA ANSUL MEXICO, S.A. DE C.V."

**TRABAJO DE SEMINARIO**  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
**INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**  
P R E S E N T A :  
**FERNANDO MEDINA BARRERA**

ASESOR: ING. BENJAMIN CONTRERAS SANTA CRUZ

CUAUTITLÁN IZCALLÍ, EDO. DE MEX.

1999

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

274501



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 esta 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.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTÍTLAN  
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTÍTLAN

DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO  
DIRECTOR DE LA FES-CUAUTITLAN  
P R E S E N T E .

DEPARTAMENTO DE  
EXAMENES PROFESIONALES

AT'N: Q. MA. DEL CARMEN GARCIA MIJARES  
Jefe del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la FES-C.

Con base en el art. 51 del Reglamento de Exámenes Profesionales de la FES-Cuautitlán, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el Trabajo de Seminario:

Iluminación Instalaciones Eléctricas  
"Corrección del Factor de Potencia de  
la Empresa ANSUL MEXICO S.A. de C.V."

que presenta el pasante: Fernando Medina Barrera  
con número de cuenta: 8910885-5 para obtener el Título de:  
Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VISTO BUENO.

A T E N T A M E N T E .

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Edo. de México, a 10 de Diciembre de 1998

MODULO:	PROFESOR:	FIRMA:
<u>Modulo II</u>	<u>Ing. Pedro Guzman Tinajero</u>	
<u>Modulo III</u>	<u>Ing. Casildo Rodriguez Arciniega</u>	
<u>Modulo IV</u>	<u>Ing. Benjamin Contreras Santa Cruz</u>	

**A mis padres, mis hermanos  
y mi novia.**

## CONTENIDO

CAPÍTULO I	(3)
Definiciones fundamentales	
1.1 Potencia trifásico	(4)
1.1.1 Potencia activa en un sistema balanceado trifásico.	(7)
1.1.2 Potencia reactiva en un sistema balanceado trifásico .	(9)
1.1.3 Potencia aparente en un sistema balanceado trifásico.	(11)
1.2 Factor de potencia.	(13)
CAPÍTULO II	(17)
Formas de corrección del factor de potencia	
2.1 Generalidades.	(18)
2.2 Capacitores.	(19)
2.3 Aplicación de los capacitores.	(20)
2.3.1 Aplicaciones de los capacitores de alto voltaje.	(20)
2.3.2 Conexiones de los capacitores común.	(23)

2.3.3	Criterios de diseño.	(24)
2.3.4	Ruptura en la carcaza (tanque) del capacitor.	(26)
2.3.5	Ventilación de los capacitores.	(26)
2.3.6	Voltaje del sistema de capacitores.	(29)
2.3.7	Resistencias de descarga.	(29)
2.3.8	Corrientes de alta frecuencia.	(32)
2.4	Motores síncronos.	(32)
CAPÍTULO III		(35)
Estudio de cargas		
3.1	Medición de la potencia trifásica.	(36)
3.2	Características de los equipos de planta Ansul México,S.A. de C.V.	(39)
CAPÍTULO IV		(54)
Cálculos.		
4.1	Determinación del factor de potencia.	(55)
4.2	Cálculo de la potencia activa requerida.	(62)
4.3	Costo del bajo factor de potencia.	(63)
CAPÍTULO V		(67)
Conclusiones.		(68)
Bibliografía.		(72)

## CAPÍTULO I

### **DEFINICIONES FUNDAMENTALES**

## 1.1 Potencia trifásica.

La potencia activa total entregada por cualquier circuito trifásico (balanceado o desbalanceado) es igual a la suma de las componentes activas de cada una de las ramas lo que implica que:<sup>1</sup>

$$P_{3\phi} = \sum P_b \quad (1)$$

---

<sup>1</sup> Las ecuaciones 1 y 2 están referidas al ángulo de fase, que es medido del fasor de corriente al fasor de voltaje.

Donde:

$$P_{br} = V_{br} I_{br} \cos \left\{ \begin{array}{l} V_{br} \\ I_{br} \end{array} \right. \quad (2)$$

Igualmente, el total de potencia reactiva entregada por cualquier circuito trifásico resulta igual a la suma de los componentes reactivos de cada una de las ramas:

$$Q_{3\phi} = \sum Q_{rb} \quad (3)$$

$$Q_{br} = V_{br} I_{br} \sin \left\{ \begin{array}{l} V_{br} \\ I_{br} \end{array} \right. \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{br} \\ I_{br} \end{array} \right.$$

La potencia total aparente entregada por cualquier sistema trifásico (balanceado o desbalanceado) es igual a la suma total de las componentes activas y reactivas:

$$S_{3\phi} = (P_{3\phi} + jQ_{3\phi}) = S_{3\phi} \angle \theta \quad (5)$$

Donde:

$$S_{3\phi} = \sqrt{(P_{3\phi}^2 + Q_{3\phi}^2)} \quad (6)$$

El ángulo  $\theta$  tiene significado sólo en un sistema balanceado, donde este representa al ángulo entre la fase de corriente y la de voltaje. Sin embargo si el sistema es desbalanceado, el ángulo  $\theta$  no es identificable en el diagrama fasorial y el ángulo no tiene significado.

El factor de potencia de un sistema trifásico (balanceado o desbalanceado) está definido por la razón de la potencia activa (real) entre la potencia aparente del sistema.

$$\text{Fact. De Pot.} = P_{3\phi} / S_{3\phi} \quad (7)$$

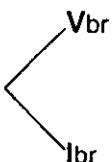
Si el sistema es balanceado, el factor de potencia del sistema es idéntico al factor de potencia de cada fase.

### 1.1.1 Potencia activa en un sistema balanceado trifásico.

Si existe una carga balanceada trifásica en un sistema, la potencia real proveída por la fuente trifásica será igual a tres veces la potencia real entregada por cada rama.

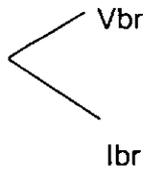
$$P_{3\phi, \text{bal}} = 3 P_{\text{br}} \quad (8)$$

Sustituyendo ec 1 en ec 4,

$$P_{3\phi, \text{bal}} = 3 V_{\text{br}} I_{\text{br}} \cos \quad (9)$$
A diagram showing two vectors, V<sub>br</sub> and I<sub>br</sub>, originating from a common point. V<sub>br</sub> is the upper vector and I<sub>br</sub> is the lower vector. The angle between them is indicated by a curved line and a small square at the vertex, representing the phase angle between voltage and current in a branch.

Donde:

V<sub>br</sub> = voltaje rms a través de la rama.  
I<sub>br</sub> = corriente rms en la misma rama.



= ángulo medido del fasor de corriente al respectivo fasor de voltaje

La ecuación 9 puede ser expresada en términos de corriente de línea y voltaje de línea haciendo las siguientes substituciones:

Para cargas balanceadas en delta

$$V_{br} = V_{línea} \quad (10)$$

$$I_{br} = I_{línea} / \sqrt{3} \quad (12)$$

Para cargas balanceadas en estrella

$$V_{br} = V_{línea} / \sqrt{3} \quad (11)$$

$$I_{br} = I_{línea} \quad (13)$$

Substituyendo la relación precedente en la ecuación 9 se obtiene:

$$P_{3\phi, bal} = \sqrt{3} V_{línea} I_{línea} \cos \theta \quad (14)$$

A diagram showing two lines originating from a common vertex. The upper line is labeled  $V_{br}$  and the lower line is labeled  $I_{br}$ . The angle between them is labeled  $\theta$ .

$$P_{3\phi, bal} = 3 V_{línea} / \sqrt{3} I_{línea} \cos \theta \quad (15)$$

A diagram showing two lines originating from a common vertex. The upper line is labeled  $V_{br}$  and the lower line is labeled  $I_{br}$ . The angle between them is labeled  $\theta$ .

Nota: el factor de potencia de una carga trifásica balanceada es igual al factor de potencia de las ramas y debe ser determinado de la forma:

$$\text{Fact. De pot.} = \cos \begin{matrix} / V_{br} \\ \backslash I_{br} \end{matrix} \quad (16)$$

Expresando la 14 en términos de factor de potencia:

$$P_{3\phi} = \sqrt{3} V_{\text{línea}} I_{\text{línea}} \text{ F.P. br} \quad (17)$$

### 1.1.2 Potencia reactiva en un sistema balanceado trifásico.

Si un sistema de cargas trifásico balanceado existe, el total de la potencia reactiva entregada por la fuente trifásica será tres veces la potencia reactiva entregada por cada una de las ramas.

$$Q_{3\phi, \text{bal}} = 3 Q_{br} \quad (18)$$

De la ecuación 2 se obtiene lo siguiente:

$$Q_{br} = V_{br} I_{br} \sin \quad \begin{array}{l} V_{br} \\ I_{br} \end{array} \quad (19)$$

Substituyendo la ecuación 19 en la ecuación 18, se obtiene:

$$Q_{3\phi, bal} = \sqrt{3} V_{br} I_{br} \sin \quad \begin{array}{l} V_{br} \\ I_{br} \end{array} \quad (20)$$

Expresando la ecuación 20 en términos de voltaje y corriente de línea:

$$Q_{3\phi, \text{ bal}} = \sqrt{3} V_{\text{línea}} I_{\text{línea}} \sin \theta \quad (21)$$

### 1.1.3 Potencia aparente en un sistema balanceado trifásico.

La potencia aparente entregada a una carga trifásica balanceada es igual a tres veces la potencia aparente entregada por una rama del sistema.

$$S_{3\phi, \text{ bal}} = 3 S_{\text{br}} \quad (22)$$

Donde:

$$S_{\text{br}} = V_{\text{br}} I_{\text{br}} \quad (23)$$

Substituyendo la ecuación 23 en la ecuación 22, y expresando el resultado en términos de voltaje y corriente de línea.

$$S_{3\phi, \text{ bal}} = 3 V_{\text{br}} I_{\text{br}} \quad (24)$$

$$S_{3\theta, \text{bal}} = \sqrt{3} \text{Vlínea I línea} \quad (25)$$

Examinando las ecuaciones, se infiere que pueden ser representadas como dos catetos de un triángulo recto en el que la hipotenusa es la ecuación 25, tal como puede observarse en la figura 1.

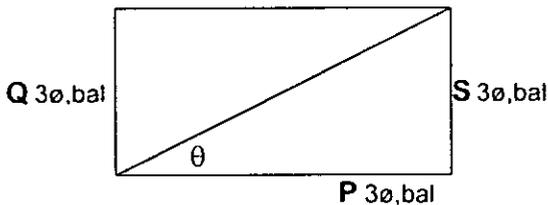
$$S_{3\theta, \text{bal}} = \sqrt{(P_{3\theta, \text{bal}}^2 + Q_{3\theta, \text{bal}}^2)} \quad (26)$$

$$\theta = \arcsin \frac{Q_{3\theta, \text{bal}}}{S_{3\theta, \text{bal}}} = \text{ángulo F.P.} \quad (27)$$

$$\text{F.P.} = \cos \theta = \frac{P_{3\theta, \text{bal}}}{S_{3\theta, \text{bal}}} \quad (28)$$

$$P_{3\theta, \text{bal}} = S_{3\theta, \text{bal}} \cos \theta = S_{3\theta, \text{bal}} \text{ F.P.} \quad (29)$$

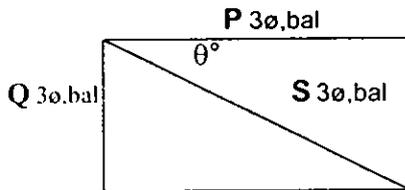
$$Q_{3\theta, \text{bal}} = S_{3\theta, \text{bal}} \sin \theta \quad (30)$$



Expresado en números complejos,

$$S_{3\phi} = P_{3\phi, \text{bal}} + jQ_{3\phi, \text{bal}} \quad (31)^2$$

$$S_{3\phi, \text{bal}} = S_{3\phi, \text{bal}} \angle \theta \quad (32)$$



## 1.2 Factor de potencia

La relación del factor de potencia disipado por un circuito para su entrada total de volts y amperes se llama factor de potencia (F.P.) del circuito; de aquí que el factor de potencia medido en las terminales es:

$$\text{F.P.} = P_T/S_T \quad (33)$$

---

Si los VARS en la ecuación 31 son mayores en el término imaginario, el ángulo en la ecuación 32 será negativo. Ver figura 2.

El factor de potencia de un circuito, ya sea adelantado o atrasado, puede ser medido con un instrumento de medición: éste puede tener valores entre 0 y 1.

Sustituyendo las ec 23,28 en la ec 35 y simplificando:

$$\text{F.P.} = \frac{V_T I_T \cos \theta_T}{V_T I_T} \quad (34)$$

$$\text{F.P.} = \cos \theta_T \quad (35)$$

O bien

$$\theta_T = \arccos (\text{F.P.}_T) \quad (36)$$

De aquí que, como queda indicado en la ecuación 35, el factor de potencia es igual al cociente del ángulo de fase entre los fasores  $V_T$  e  $I_T$ . El ángulo  $\theta_T$  es llamado ángulo de factor de potencia.

El factor de potencia para un circuito simple en serie y uno simple en paralelo puede ser determinado del circuito de resistencia e impedancias.

Para un circuito en paralelo

$$F.P. = P_T/S_T = \frac{V_T^2/R}{V_T^2/Z_{in}}$$

$$F.P. = Z_{in}/R$$

Para un circuito en serie

$$F.P. = P_T/S_T = \frac{I_T^2 R}{I_T^2 Z_{in}}$$

$$F.P. = R / Z_{in}$$

Sin embargo, sin importar el tipo de circuito que sea el factor de potencia se puede calcular siempre de la ecuación 32 o 33.

El factor de potencia de un circuito, sistema o motor es una medida de su efectividad utilizando la potencia aparente que él extrae del generador. El factor de potencia no deberá ser confundido con la eficiencia. Por ejemplo, alguna parte de la potencia real usada por un motor eléctrico es disipada en calor por el efecto de  $I^2R$  en los conductores, la histéresis y las corrientes

de Eddy. Las últimas dos son generadas por un campo magnético alternado de los devanados del motor.

Como un resultado de éstas pérdidas internas, la potencia utilizable del motor es menor que la potencia suministrada a él.

$$P_{\text{sal}} = P_{\text{ent}} - P_{\text{perd}}$$

La eficiencia de un motor resulta proporcional a la relación entre la potencia real medida a la salida de la flecha del motor y la potencia real de entrada al motor:

$$\eta = P_{\text{sal}} / P_{\text{ent}} \quad (34)$$

La salida de potencia de un motor suele expresarse generalmente, en caballos de fuerza (HP) y deberá ser convertida en watts<sup>3</sup>.

El factor de potencia de un motor resulta de la relación de la potencia real entre la potencia aparente de el motor.

$$F.P. = P_{\text{ent}} / S_{\text{ent}} \quad (35)$$

---

<sup>3</sup> Nótese la diferencia entre las ecuaciones 34 y 35.

**CAPÍTULO II**  
**FORMAS DE CORRECCIÓN DEL FACTOR POTENCIA**

## **2.1 Generalidades.**

La eficiencia de los equipos de generación de potencia, transmisión y distribución es superada cuando se opera en niveles cercanos a un factor de potencia unitario; la forma menos costosa de alcanzar un factor de potencia unitario se obtiene con la aplicación de capacitores.

Los capacitores proveen una corriente reactiva adelantada y pueden ser instalados cerca de la carga. De aquí que la máxima eficiencia puede ser alcanzada reduciendo los requerimientos de corriente magnetizante (retrasada) a través del sistema.

Existe otro método para alcanzar un factor de potencia casi unitario, mediante el uso generalizado en el sistema de motores síncronos. Este método puede ser utilizado; sin embargo, presenta un inconveniente considerable: resulta altamente costoso, ya que se requiere del cambio de todos los motores de una planta, lo cual constituye una elevación importante de los precios. Por éste motivo, enfocaré la mayor parte del estudio a los capacitores como método de corrección del factor de potencia.

## 2.2 Capacitores.

Por lo regular, los capacitores se conectan en derivación, a través de las líneas de potencia y pueden ser energizados continuamente o interrumpidos durante los ciclos de carga.

Existen dos tipos de capacitores secundarios (bajo voltaje ), o primarios (alto voltaje), de los cuales el de tipo primario es el más común.

Los *capacitores secundarios* están disponibles regularmente en rangos de voltaje de 240 a 600 volts lo que equivale a un rango de variabilidad de 2.5 a 50 kilovars(kvar). Cuando capacitores de este tipo son conectados a líneas secundarias, usualmente se encuentran localizados cerca de las cargas reactivas de retraso. Esto reduce los requerimientos de kVA en las líneas inmediatas y

transformadores, o visto de otra manera, permite cargas más intensas de kilowatts con las mismas líneas y transformadores.

Los capacitores primarios de corrección de potencia están conectados a las líneas de alto voltaje y son generalmente disponibles para rangos de 2.4 a 21.6 Kv por arriba del rango de 50 a 400 Kvars. Los más altos rangos de voltaje y Kvars son alcanzados conectando los capacitores en serie y paralelo. El costo de capacitores de alto voltaje es más bajo por Kvar que los capacitores de bajo voltaje, debido a la diferencia básica en los materiales dieléctricos.

## **2.3 Aplicación de los capacitores.**

### *2.3.1 Aplicación de los capacitores de alto voltaje.*

La distribución por elevado de los capacitores en un sistema se realiza en bloques de 3000 a 1800 kvars, cercanos a cualquier línea primaria de voltaje superior a los 34.5 kv fase a fase.

Los capacitores de pad (acojinamiento) son usados para sistemas de distribución bajo tierra, en el mismo rango y tamaños que los anteriores. El número de capacitores y rango para elevar el factor de potencia de un valor a otro está dado en la tabla 2.3.0 siguiente.

TABLA 2.3.0

PORCENTAJE NUEVO DE FACTOR DE POTENCIA

ACTUAL PORCENTAJE DE FACTOR DE POTENCIA	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99
50	0.982	1.008	1.034	1.06	1.086	1.112	1.139	1.165	1.192	1.22	1.276	1.276	1.306	1.337	1.359	1.403	1.442	1.481	1.529	1.59
51	0.937	0.962	0.989	1.015	1.041	1.067	1.094	1.12	1.147	1.175	1.203	1.231	1.261	1.292	1.324	1.358	1.395	1.436	1.484	1.544
52	0.893	0.916	0.945	0.971	0.997	1.023	1.05	1.076	1.103	1.131	1.159	1.187	1.217	1.248	1.289	1.314	1.351	1.392	1.44	1.5
53	0.850	0.876	0.902	0.928	0.954	0.98	1.007	1.033	1.06	1.088	1.116	1.144	1.174	1.205	1.237	1.271	1.308	1.349	1.397	1.457
54	0.809	0.835	0.861	0.887	0.913	0.939	0.966	0.992	1.016	1.047	1.075	1.103	1.133	1.164	1.196	1.23	1.267	1.308	1.356	1.416
55	0.769	0.795	0.821	0.847	0.873	0.899	0.926	0.952	0.979	1.007	1.035	1.063	1.09	1.24	1.156	1.19	1.228	1.268	1.316	1.377
56	0.73	0.756	0.782	0.808	0.834	0.86	0.887	0.913	0.94	0.968	0.996	1.024	1.051	1.085	1.117	1.151	1.189	1.229	1.277	1.338
57	0.692	0.718	0.744	0.77	0.796	0.822	0.849	0.875	0.902	0.93	0.958	0.986	1.013	1.047	1.079	1.113	1.151	1.191	1.239	1.3
58	0.655	0.681	0.707	0.733	0.759	0.785	0.812	0.838	0.865	0.893	0.921	0.949	0.976	1.01	1.042	1.076	1.114	1.154	1.202	1.263
59	0.618	0.644	0.67	0.696	0.722	0.748	0.775	0.801	0.828	0.856	0.884	0.912	0.939	0.973	1.005	1.039	1.077	1.117	1.165	1.226
60	0.584	0.61	0.636	0.662	0.688	0.714	0.741	0.767	0.794	0.822	0.85	0.878	0.905	0.939	0.971	1.005	1.043	1.083	1.131	1.192
61	0.549	0.575	0.601	0.627	0.653	0.679	0.706	0.732	0.759	0.787	0.815	0.843	0.87	0.904	0.936	0.97	1.008	1.048	1.096	1.157
62	0.515	0.541	0.567	0.593	0.619	0.645	0.672	0.698	0.725	0.753	0.781	0.809	0.836	0.87	0.902	0.936	0.974	1.014	1.062	1.123
63	0.483	0.509	0.535	0.561	0.587	0.613	0.64	0.66	0.693	0.721	0.749	0.77	0.804	0.838	0.87	0.904	0.942	0.982	1.03	1.091
64	0.45	0.476	0.502	0.528	0.554	0.58	0.607	0.633	0.66	0.688	0.716	0.744	0.771	0.805	0.837	0.871	0.909	0.949	0.997	1.058
65	0.419	0.445	0.471	0.497	0.523	0.549	0.576	0.602	0.629	0.657	0.685	0.713	0.74	0.774	0.803	0.84	0.878	0.918	0.966	1.027
66	0.388	0.414	0.44	0.466	0.492	0.518	0.545	0.571	0.598	0.626	0.654	0.682	0.709	0.743	0.775	0.809	0.847	0.887	0.935	0.996
67	0.358	0.384	0.41	0.436	0.462	0.488	0.515	0.541	0.568	0.596	0.624	0.652	0.679	0.713	0.745	0.779	0.817	0.857	0.905	0.966
68	0.329	0.355	0.381	0.407	0.433	0.459	0.486	0.512	0.529	0.567	0.595	0.623	0.65	0.684	0.716	0.75	0.788	0.828	0.876	0.937
69	0.299	0.325	0.351	0.377	0.403	0.429	0.456	0.482	0.509	0.537	0.565	0.593	0.62	0.654	0.686	0.72	0.758	0.798	0.84	0.907
70	0.27	0.296	0.322	0.348	0.374	0.4	0.427	0.453	0.48	0.508	0.536	0.564	0.591	0.625	0.657	0.691	0.729	0.769	0.811	0.878
71	0.242	0.268	0.294	0.32	0.346	0.372	0.399	0.425	0.452	0.48	0.508	0.536	0.563	0.597	0.629	0.663	0.701	0.741	0.783	0.85
72	0.213	0.239	0.265	0.291	0.317	0.343	0.37	0.396	0.423	0.451	0.479	0.507	0.534	0.568	0.6	0.634	0.672	0.712	0.754	0.821
73	0.186	0.212	0.238	0.264	0.29	0.316	0.343	0.369	0.396	0.424	0.452	0.48	0.517	0.541	0.573	0.607	0.645	0.685	0.727	0.794
74	0.159	0.185	0.211	0.237	0.263	0.289	0.316	0.342	0.369	0.397	0.425	0.453	0.48	0.514	0.546	0.58	0.618	0.658	0.7	0.767
75	0.132	0.158	0.184	0.21	0.236	0.262	0.289	0.315	0.342	0.37	0.398	0.426	0.453	0.487	0.519	0.553	0.591	0.634	0.673	0.74
76	0.105	0.131	0.157	0.183	0.209	0.235	0.262	0.288	0.315	0.343	0.371	0.399	0.426	0.46	0.492	0.526	0.564	0.604	0.652	0.713
77	0.079	0.105	0.131	0.157	0.183	0.209	0.236	0.262	0.289	0.317	0.345	0.373	0.4	0.434	0.466	0.5	0.538	0.578	0.62	0.687
78	0.053	0.079	0.105	0.131	0.157	0.182	0.21	0.236	0.263	0.291	0.319	0.347	0.374	0.408	0.44	0.474	0.512	0.552	0.594	0.661
79	0.026	0.052	0.078	0.104	0.13	0.156	0.183	0.209	0.236	0.264	0.292	0.32	0.347	0.381	0.413	0.447	0.485	0.525	0.567	0.634
80	0	0.026	0.052	0.078	0.104	0.13	0.157	0.183	0.21	0.238	0.266	0.294	0.321	0.355	0.387	0.421	0.459	0.499	0.541	0.608

TABLA 2.30

PORCENTAJE NDEVO DE FACTOR DE POTENCIA

ACTUAL PORCENTAJE DE FACTOR DE POTENCIA	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99
81	0	0.026	0.052	0.078	0.104	0.131	0.157	0.184	0.212	0.24	0.268	0.295	0.329	0.361	0.385	0.413	0.473	0.515	0.562	
82	0	0.026	0.052	0.078	0.105	0.131	0.158	0.186	0.214	0.245	0.269	0.303	0.335	0.369	0.407	0.447	0.489	0.556		
83	0	0.026	0.052	0.079	0.105	0.132	0.16	0.188	0.216	0.243	0.277	0.309	0.343	0.381	0.421	0.463	0.53			
84	0	0.026	0.053	0.079	0.106	0.134	0.162	0.19	0.217	0.251	0.283	0.317	0.355	0.295	0.437	0.504				
85	0	0.027	0.053	0.08	0.108	0.136	0.164	0.191	0.225	0.257	0.291	0.329	0.369	0.417	0.478					
86	0	0.026	0.053	0.081	0.109	0.137	0.167	0.198	0.23	0.265	0.301	0.343	0.39	0.451						
87	0	0.027	0.055	0.082	0.111	0.14	0.172	0.204	0.238	0.275	0.317	0.364	0.425							
88	0	0.028	0.056	0.084	0.115	0.145	0.177	0.211	0.248	0.29	0.337	0.398								
89	0	0.028	0.056	0.086	0.117	0.149	0.183	0.22	0.262	0.309	0.37									
90	0	0.028	0.058	0.089	0.121	0.155	0.192	0.234	0.281	0.342										
91	0	0.03	0.061	0.093	0.127	0.164	0.206	0.253	0.314											
92	0	0.031	0.063	0.097	0.134	0.176	0.223	0.284												
93	0	0.032	0.066	0.103	0.145	0.192	0.253													
94	0	0.034	0.071	0.113	0.16	0.221														
95	0	0.037	0.079	0.126	0.187															
96	0	0.042	0.089	0.15																
97	0	0.047	0.108																	
98	0	0.061																		

### 2.3.2 Conexión de capacitores común.

La siguiente figura muestra cuatro de las más comunes conexiones de capacitores:

- estrella trifásica aterrizada,
- estrella trifásica sin tierra,
- delta trifásica,
- monofásica.

Con tierra o sin tierra, las conexiones en estrella son hechas usualmente en los circuitos primarios, y las conexiones en delta y monofásicas son hechas en los circuitos de bajo voltaje .

Las conexiones en estrella proveen una rápida operación de los fusibles en caso de falla en el capacitor. Los capacitores aterrizados pueden funcionar como escape (by-pass) de corriente; de ahí que, generalmente, tengan uso como autoprotectidos.

Cuando los capacitores se conectan en estrella aterrizados, la máxima corriente de falla deberá ser limitada por tres veces la corriente de línea. Si existiera exceso de corriente disponible (esto es, en términos generales, por arriba de 5000A), el uso de fusibles se deberá considerar.

### 2.3.3 Criterios de diseño.

Existen criterios que es conveniente seguir en la instalación de capacitores para la corrección del factor de potencia. Fundamentalmente debe procurarse la protección de todo el personal que labore en áreas cercanas. Para tal efecto, las medidas de precaución se describen a continuación:

1. El fusible deberá ser de 135% de la capacidad de corriente del capacitor.

2. El fusible deberá tener suficiente capacidad interruptiva para resistir antes de la ruptura de su tanque.

3. El fusible deberá soportar la corriente sin ningún daño durante la energización y desenergización.

4. Para arreglos en estrella sin tierra, la máxima corriente usualmente limitada corresponde a tres veces la corriente de línea.

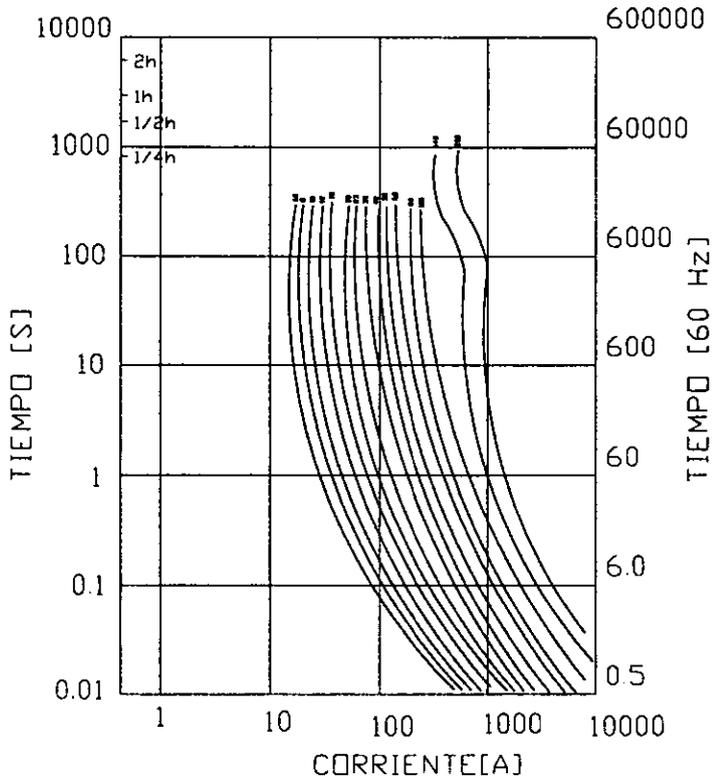
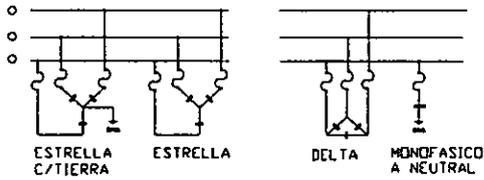
5. La máxima corriente rms asimétrica no debe exceder el valor de corriente de ruptura del tanque del capacitor (time current characteristic= TCC).

6. La curva TCC de el fusible deberá ser coordinada con la del capacitor.<sup>4</sup>

---

<sup>4</sup>Con la tabla 2.3.3 se entenderá mas el concepto.

tabla 2.3.3



#### *2.3.4 Ruptura de la carcaza(tanque)del capacitor.*

La ruptura de la carcaza del capacitor ocurrirá cuando el total de la energía aplicada al capacitor bajo condiciones de falla sea mayor que la habilidad de la carcaza del capacitor para soportar dicha energía. Esta energía se puede liberar bajo un amplio número de condiciones de corriente y tiempo: desde corrientes moderadas durante largos periodos de tiempo hasta muy altas corrientes en un muy corto tiempo.

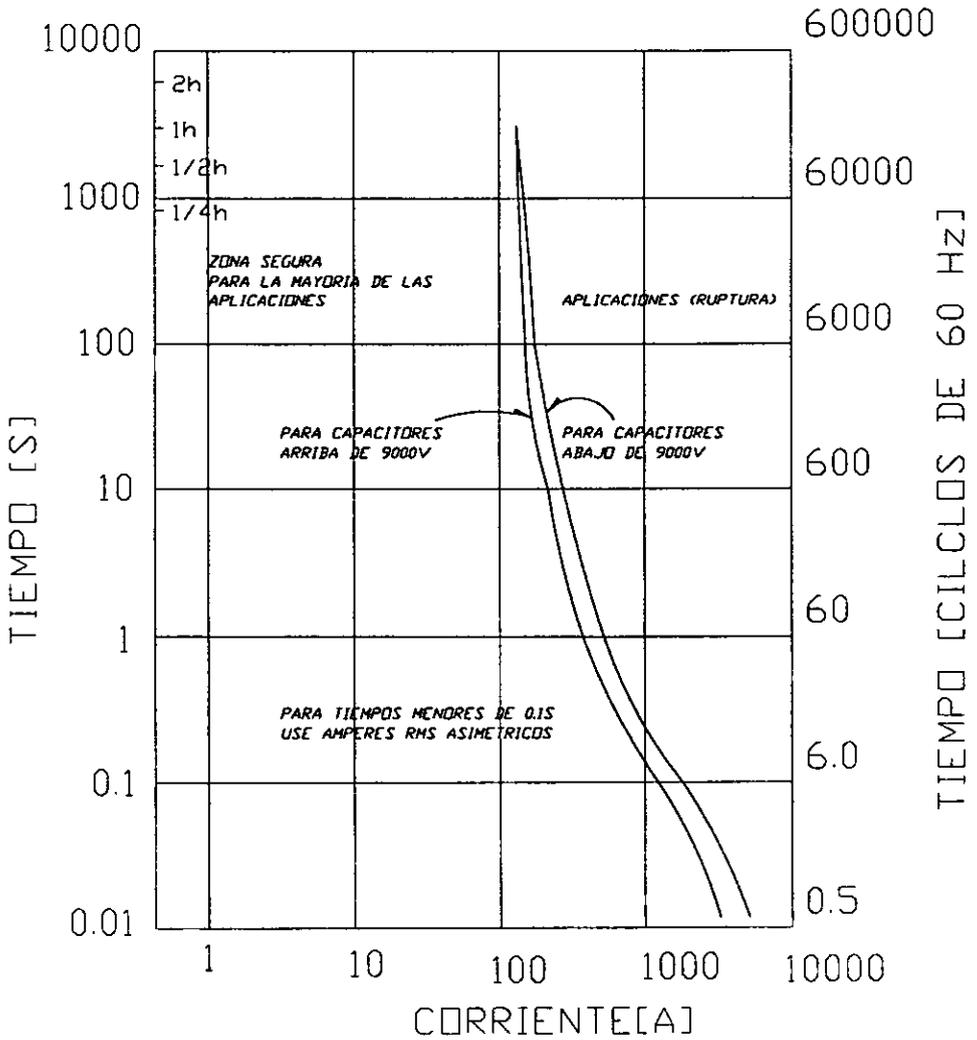
Las principales causas de la ruptura de la carcaza tienen origen en el incremento interno de la presión dada por un aumento de temperatura, o bien, por un "arqueo" dentro del capacitor.

Las tablas siguientes 2.3.4, 5, 6 muestran la energía requerida para la ruptura de la carcaza a corrientes de 1600 a 12000A; esta relación constante de energía normalmente sucede bajo condiciones de corrientes altas.

#### *2.3.5 Ventilacion del capacitor.*

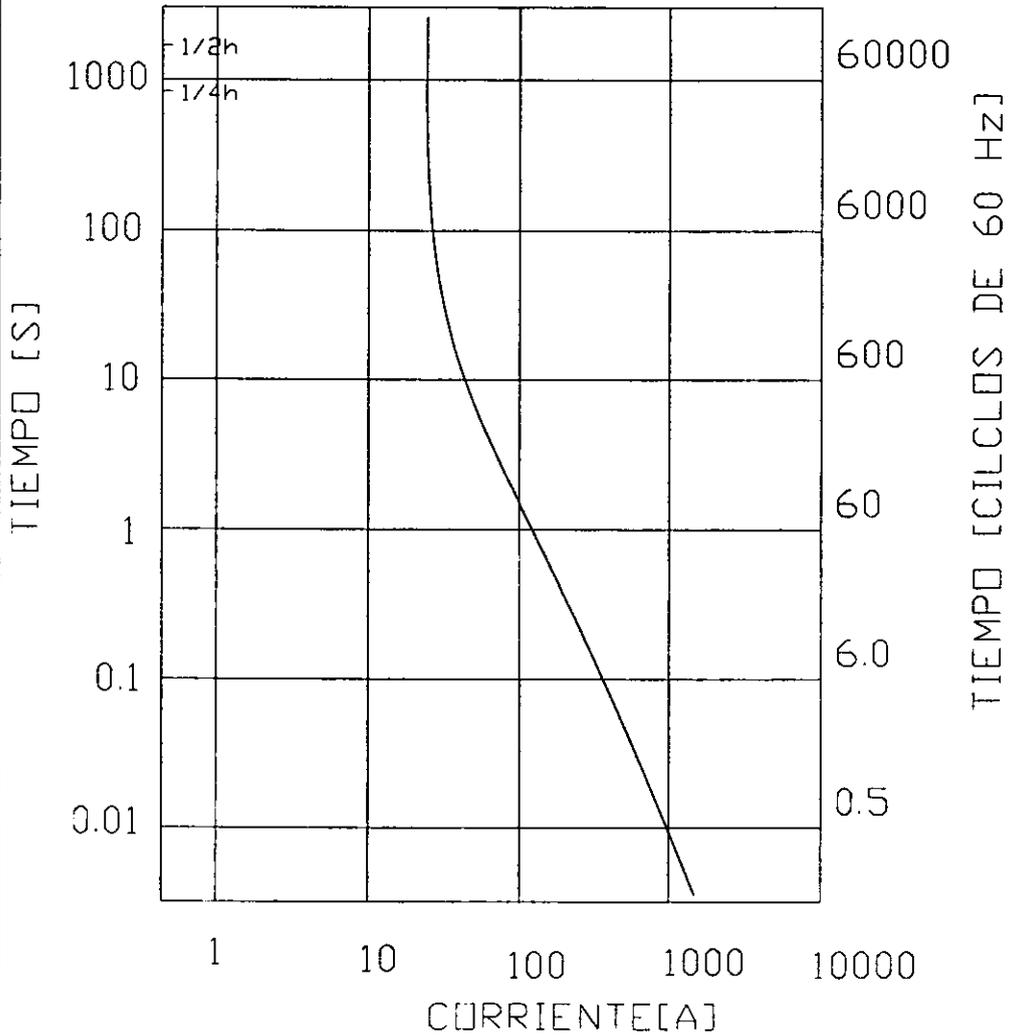
Aunque tienen características de alta eficiencia, los capacitores de potencia consumen potencia y generan calor. Éste calor deberá ser adecuadamente ventilado cuando el capacitor se encuentra en una zona encerrada o expuesto a una temperatura

tabla 234



CUERVA DE TIEMPO-CORRIENTE DE RUPTURA DEL TANQUE 100KVAR

tabla 2.35



CURVA DE TIEMPO-CORRIENTE DE RUPTURA DEL TANQUE 100KVAR

mayor que la ambiental. La temperatura ideal en que los capacitores deberán trabajar oscila entre los  $-40^{\circ}$  y  $50^{\circ}\text{C}$ .

### 2.3.6 Voltaje del sistema de capacitores.

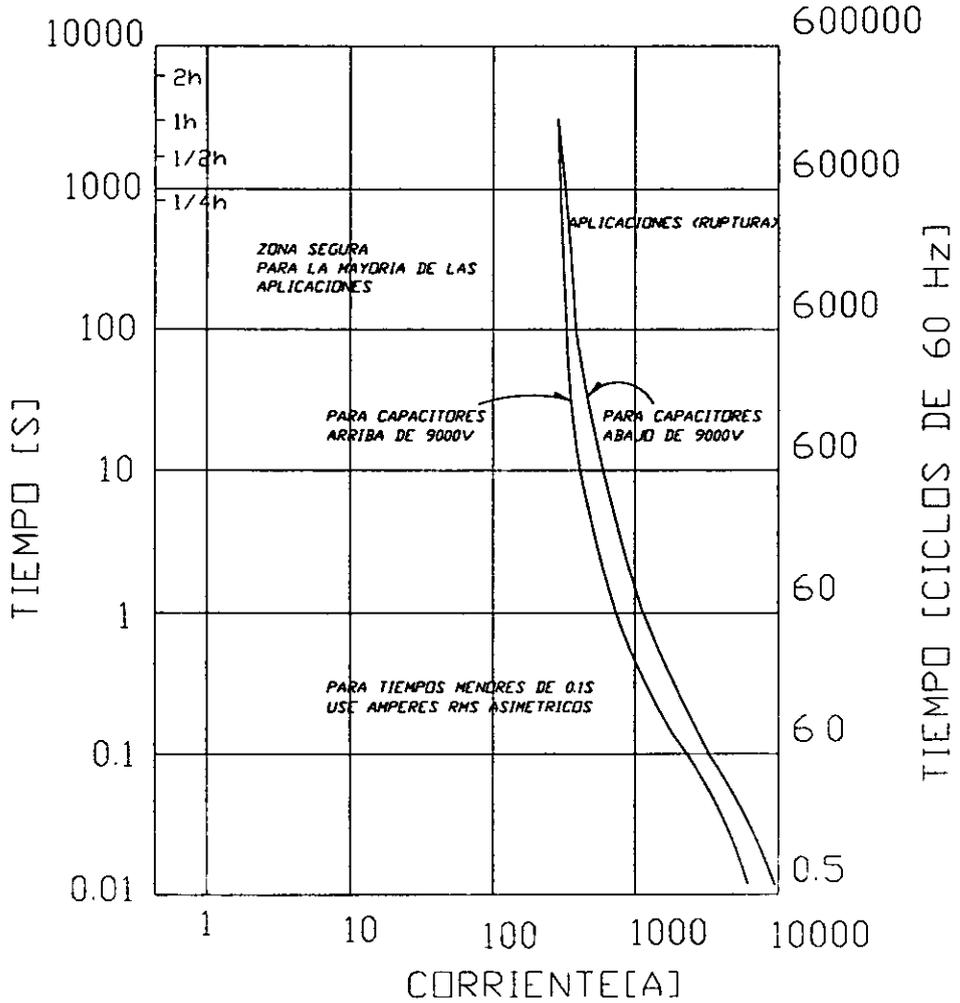
Estos capacitores están diseñados para operación a 60-Hz en líneas de potencia senoidales a un voltaje específico, el cual se encuentra en la placa de datos. Sin embargo, están diseñados para trabajar con sobrevoltajes de 10% sin daño al capacitor. Los Kvar de salida del capacitor se incrementan con el cuadrado del voltaje aplicado:

$$Kvar_{E2} = Kvar_{E1} (E2)^2 / (E1)^2$$

### 2.3.7 Resistencias de descarga.

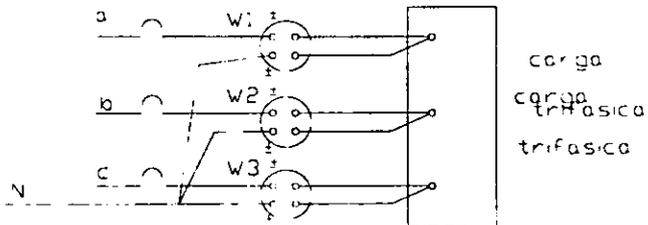
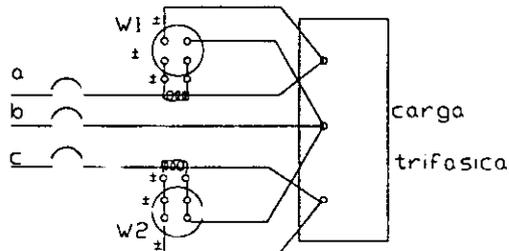
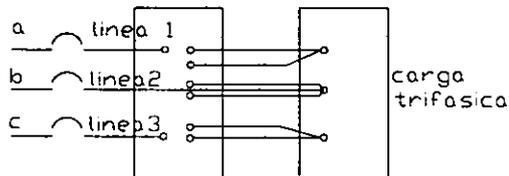
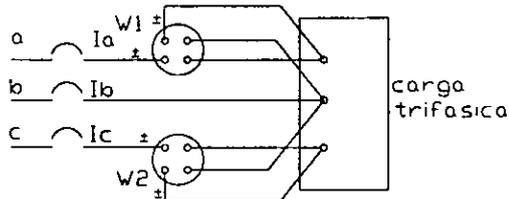
Cuando el voltaje de línea se retira de un capacitor, existirá un peligro de descarga aun días después; bajo algunas condiciones, la unidad retendrá un carga fuertemente alta. Ésta característica de los capacitores de retención de carga está dada por su gran eficiencia y su baja pérdida de energía. Para eliminar este peligro todos los capacitores tienen una resistencia interna

tabla 2.36



CUERVA DE TIEMPO-CORRIENTE DE RUPTURA DEL TANQUE 150,200 Y 300KVAR

tabla 237



que les permite desenergizarse; para capacitores de 1200V ac de línea tardará 5 minutos, y un minuto para capacitores de menor voltaje.

#### **2.3.8 Corrientes de alta frecuencia.**

En la instalación de un banco, deberá ser considerada la cercanía de unos capacitores con otros. Las cargas a una corriente de alta frecuencia podrían dar como resultado la fusión de los elementos protectores (fusibles). En ocasiones, el uso de reactores en serie es requerido para reducir esas corrientes a niveles aceptables.

#### **2.4 Motores síncronos.**

Cuando la fuente entrega potencia a la carga y ésta no es puramente resistiva, la corriente y el voltaje estarán fuera de fase uno del otro. En el caso de motores, tanto como en el de cargas, la corriente estará atrasada con respecto al voltaje, debido a la naturaleza inductiva de la máquina. Esto se origina en que los KVA entregados por la fuente son mayores que los KW consumidos por la carga.

El factor de potencia puede ser explicado en la medida que los kVAR reactivos se hacen más grandes con respecto a los kW de un circuito. Es decir más kVA deberán ser entregados para la fuerza magnetizante del inductor. Esta condición es conocida como un pobre factor de potencia. Como el ángulo se torna más grande se aproxima a  $90^\circ$ , de tal manera que el factor de potencia se hace más pequeño y se aproxima a cero. En este punto el circuito actuará totalmente inductivo y no se consumirá potencia real; el coseno de  $90$  es igual a cero.

Mientras los kVAR se reducen, el ángulo se hace pequeño. El factor de potencia se incrementa hasta llegar a la unidad, es decir, 100%. En este punto el circuito es totalmente resistivo; la potencia real consumida será igual a los kVA.

Los motores que operan a menos de su máxima capacidad de carga causan un bajo factor de potencia dentro de la planta. Típicamente, estos son motores que actúan sobre sierras, prensas, tornos, y por eso no tienen una carga constante de trabajo; esto, en altas corrientes magnetizantes y cargas a bajo factor de potencia en el rango de 30 - 50%.

Una de las soluciones sería tener los motores uniformemente cargados todo el tiempo. Esto no es práctico en la mayoría de las industrias. Por ejemplo, en las industrias plásticas, metalmecánicas y fundiciones el ciclo intermitente es requerido.

Los rotores de los motores síncronos polifásicos convencionales son de construcción de polos salientes. El motor síncrono es particularmente económico desde el punto de vista de costo y eficacia para las aplicaciones de velocidad lenta. Algunos motores síncronos tienen valores nominales de factor de potencia de 0.80, corriente adelantada que significa que con una carga nominal el motor proporciona potencia reactiva aproximada a cerca de tres cuartos de su potencia mecánica nominal. Otros motores síncronos están nominados para obtener un factor de potencia unitario. Desde que el par es una función de dos voltajes terminales y de voltaje generado, el motor de factor de potencia 80 tiene mayor par de entrada y de salida que el motor de factor de potencia unitario del mismo valor nominal de Hp, y es por eso capaz de encontrar mayores cargas pico que son características de aparatos tales como molinos de bolas y trituradoras.

Los motores síncronos son principalmente accesibles para velocidades inferiores a 500 rpm para cargas de conexión directa (sin reductores de velocidad mecánicos), tales como compresores, moledores, mezcladores, especialmente los de valores de 100 rpm o más.

**CAPÍTULO III**  
**ESTUDIO DE CARGAS**

### **3.1 Medicion de la potencia activa trifásica.**

La potencia activa demandada por cualquier sistema trifásico puede medirse con dos wattmetros tal como se muestra en la figura, o por un wattmetro polifásico si el wattmetro polifásico cuyas conexiones corresponden a las que se muestran en la figura 2.3.7. Si el wattmetro es de tipo electromecánico tendrá dos elementos de medida y un solo compartimiento; en él, la aguja común indicará la potencia trifásica total. Si el mencionado instrumento es de tipo digital, la lectura corresponderá a la potencia trifásica total.

En aquellas aplicaciones en que la corriente de línea es mucho mayor que la corriente nominal de wattmetro, se usan transformadores de corriente (c-t) para reducir la corriente por el instrumento. Esto también se muestra en la siguiente figura.

La línea corta y gruesa representa el primario y la doble malla representa el secundario. Cuando se usa C-T, cada wattmetro deberá multiplicarse por la transformación asociada.

Con objeto de obtener lecturas correctas, los dos terminales deberán presentar la misma polaridad instantánea.

En la figura 2.3.7 cada wattmetro indica el producto del voltaje de línea en rms a través de su bobina de potencial, por la corriente de línea rms a través de sus terminales de corriente y por el coseno del ángulo entre los respectivos fasores de voltaje de línea y corriente de línea. *Este ángulo no es el correspondiente al factor de potencia. El ángulo del factor de potencia es el ángulo entre un voltaje de rama y su corriente asociada.*

El wattmetro WM1 leerá un valor igual a

$$WM1 = E_{ab} I_a \cos$$


El wattmetro WM2 leerá un valor igual a

$$WM2 = E_{ab} I_c \cos \theta$$

La potencia activa total entregada a la carga trifásica, equilibrada o desequilibrada, es igual a la suma algebraica de las lecturas de los dos wattmetros; por tanto:

$$P_{3\phi} = WM1 + WM2.$$

O bien

$$P_{3\phi} = E_{ab} I_a \cos \theta + E_{cb} I_c \cos \theta$$

Donde:

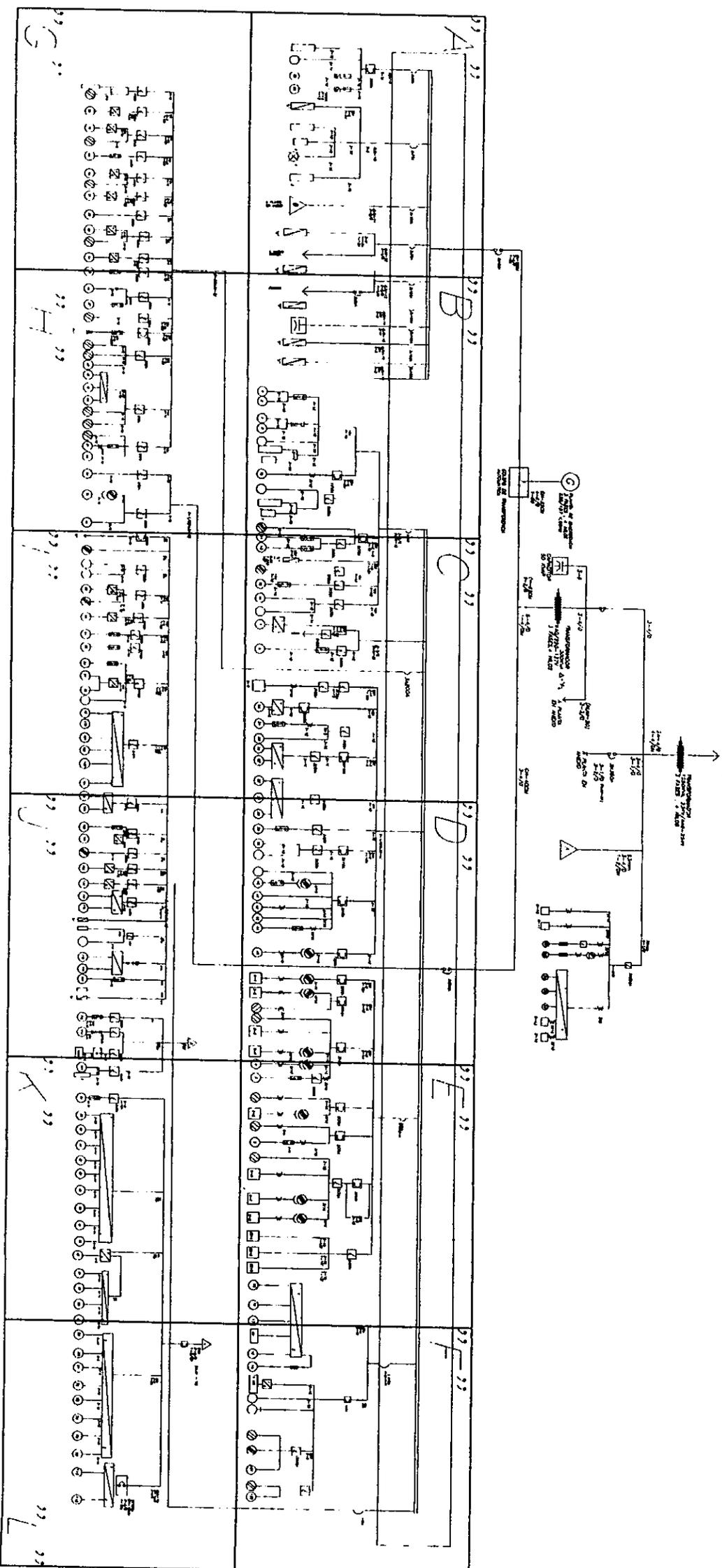
- $E_{ab}$  = voltaje rms entre las líneas a y b
- $E_{cb}$  = voltaje rms entre las líneas b y c
- $I_a$  = corriente rms en la línea a
- $I_c$  = corriente rms en la línea c.

### **3.2 Características de los equipos de planta (Ansul México, S. A. de C. V.)**

El siguiente es un cuadro (4.1.0) que muestra los motores en uso dentro de planta, con un número que aparecerá en los planos identificando cada motor y será de uso frecuente dentro de éste análisis; en esta tabla se incluye las rpm, corriente, voltaje, potencia activa, fases y marca.

A continuación se muestra también el diagrama unifilar de la planta, el cual será de gran utilidad para el análisis.

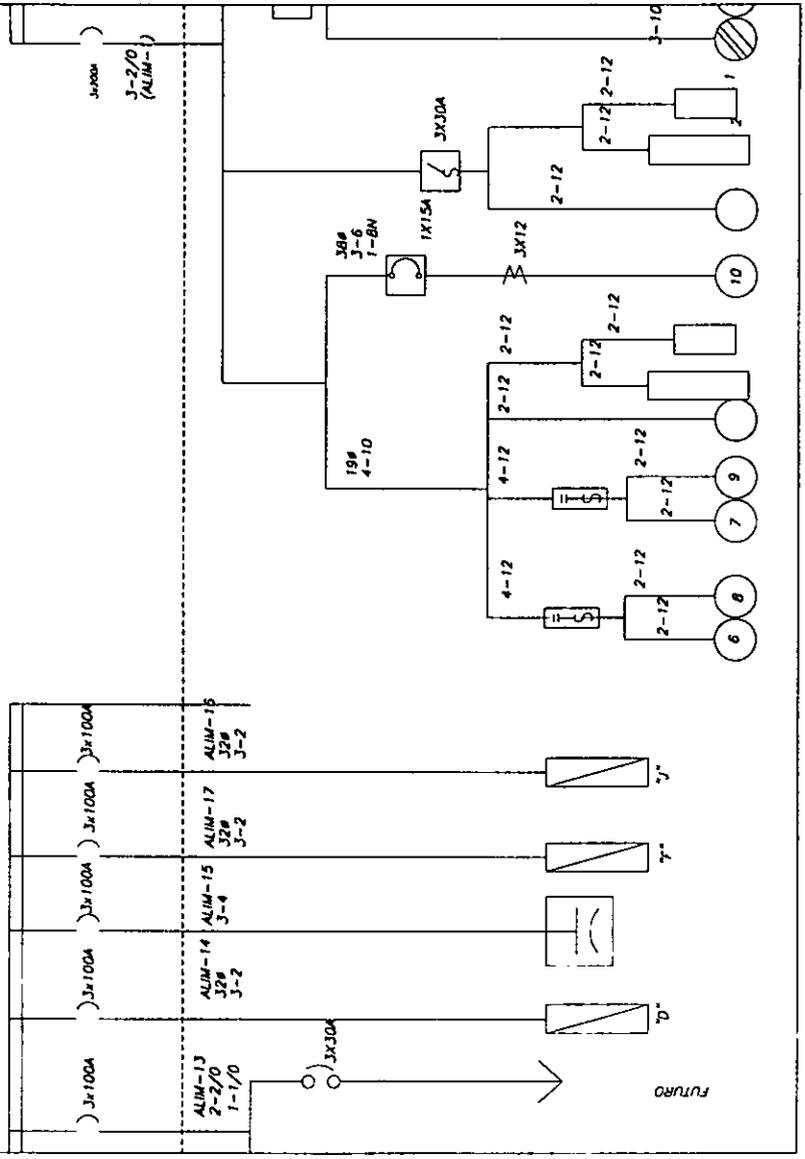
# DIAGRAMA UNIFILAR POR ZONAS



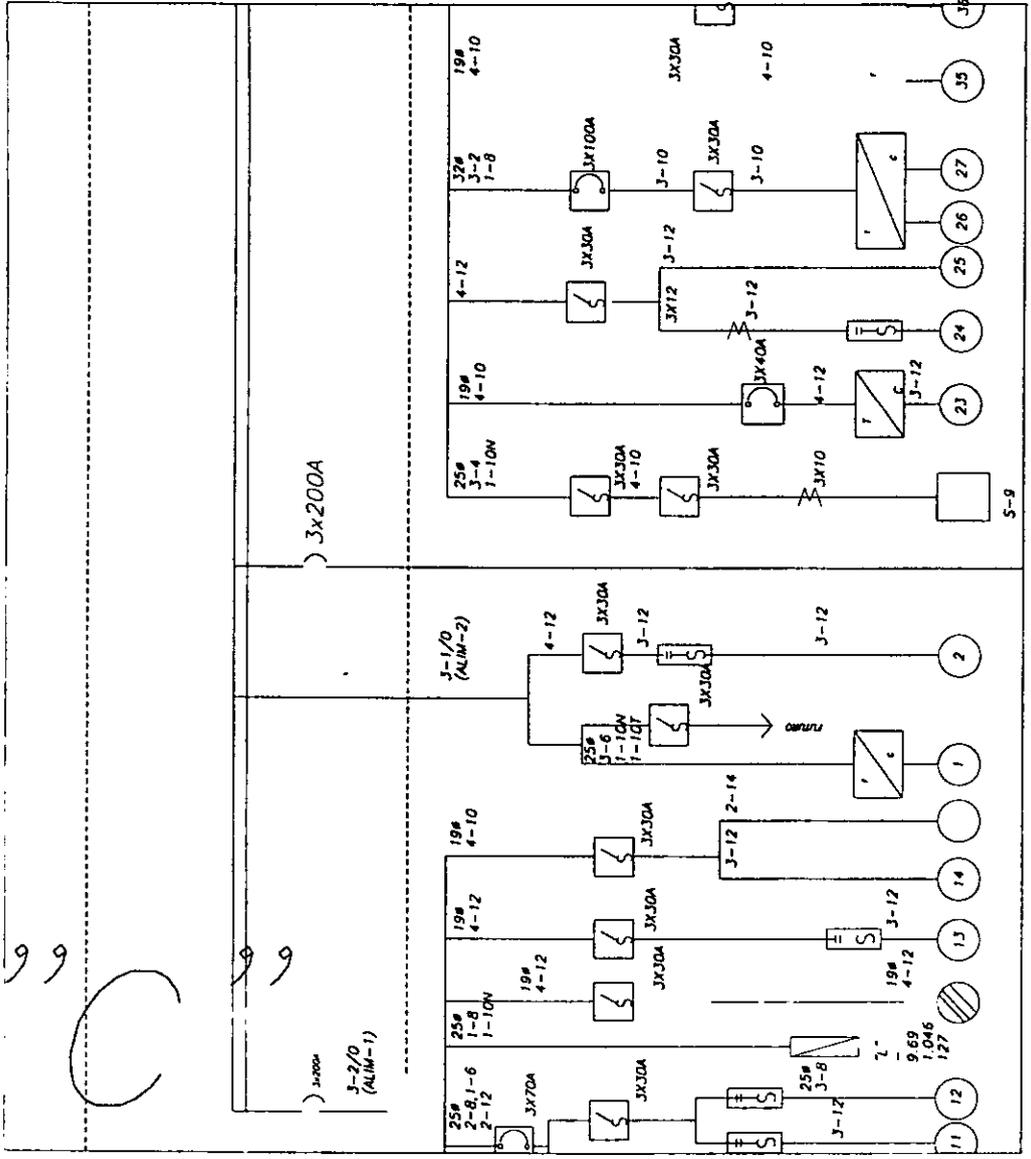




99 B 99

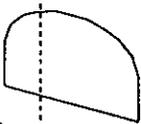


FUTURO



99

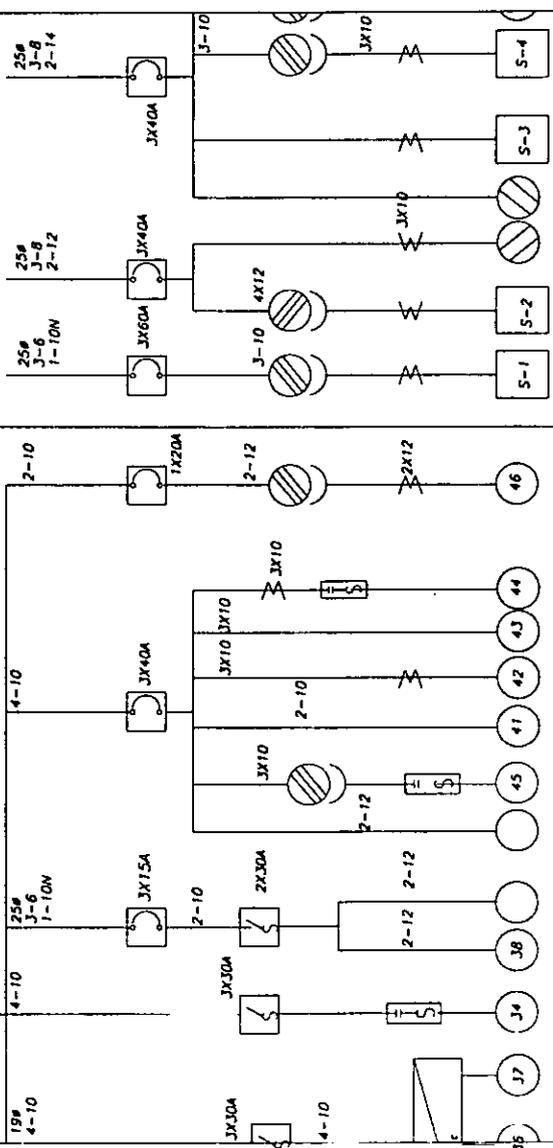
99



JX300A

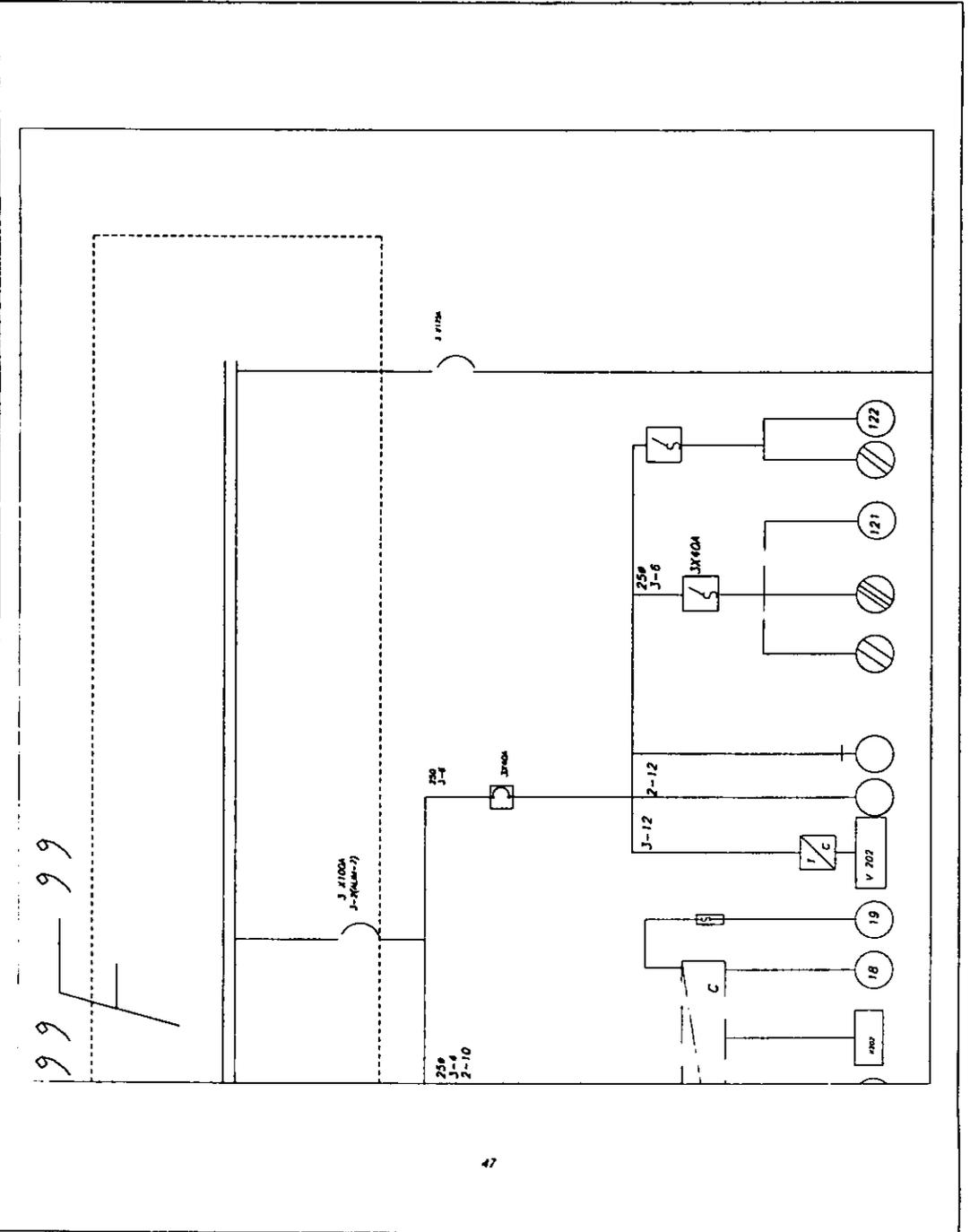


3-1/0(ALIM-4)





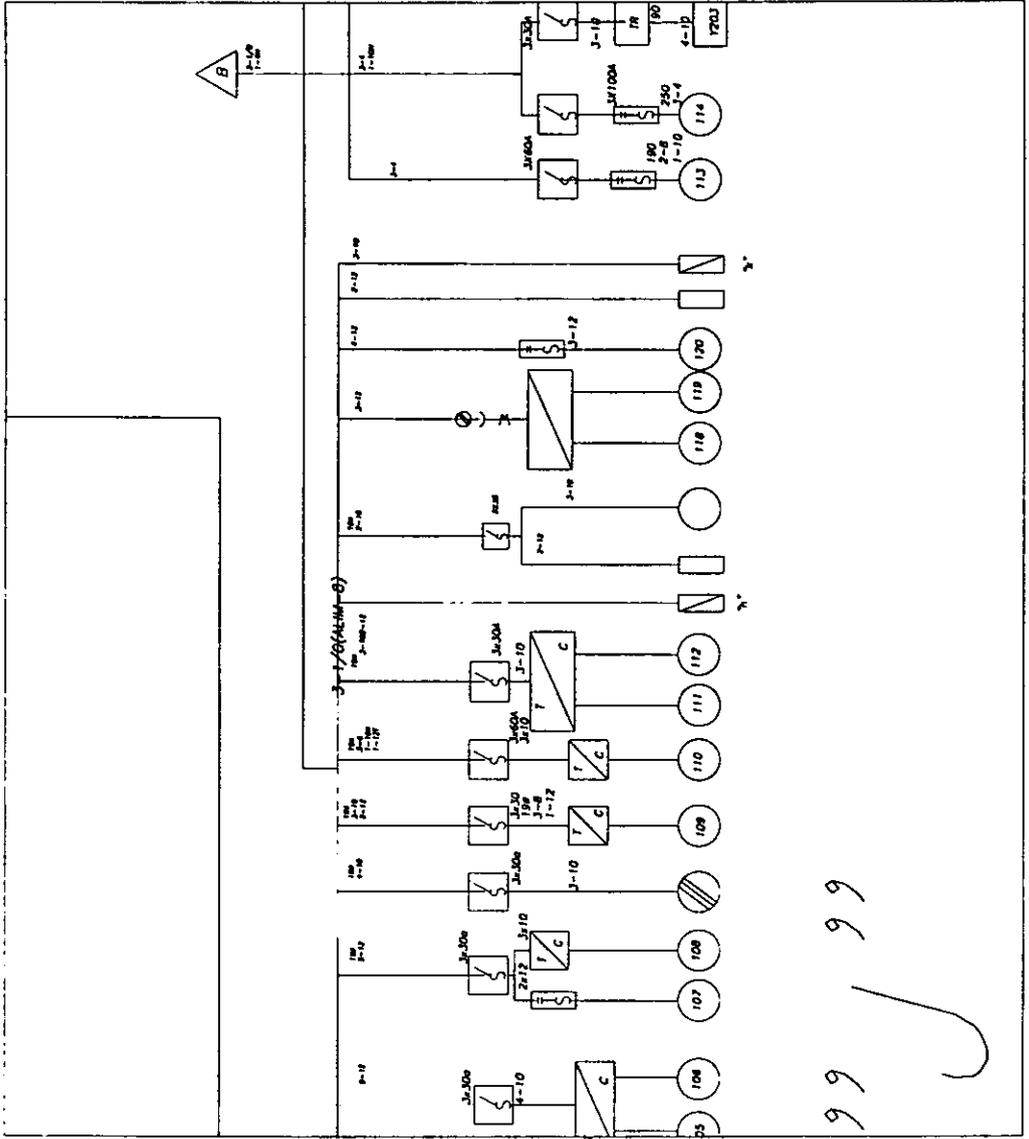
99  
F



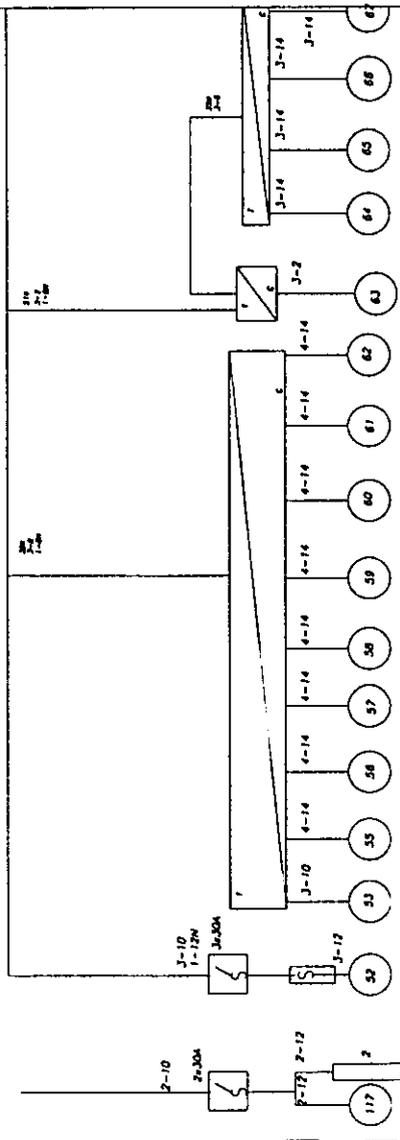




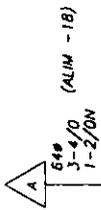




99 99



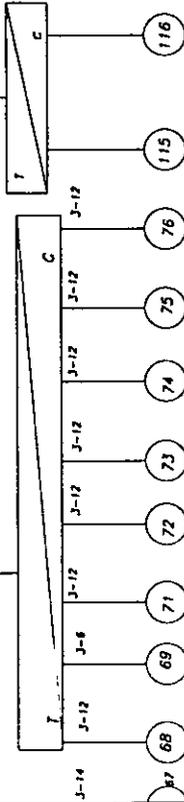
99 K 99



50#  
J-2  
1-2N

(ALUM-18)  
3-2/0cm  
J-2/0

3X150A  
CH-15cm  
J-2/0  
1-100



99 / 99

CAPÍTULO IV  
CÁLCULOS

#### 4.1 Determinación del factor de potencia.

De la ecuación 25 se calcula S para el motor no. 1 como ejemplo de los cálculos a realizar durante este análisis

$$S_{3\phi, \text{bal}} = \sqrt{3} V_{\text{línea}} I_{\text{línea}} \quad (25)$$

$$S_{3\phi, \text{bal}} = \sqrt{3} (220)(44) = 16766.25 \text{ VA}$$

Y tomando el valor de la potencia real medida de los motores de planta se tiene:

De la ecuación (28).

$$F.P. = \cos \theta = P_{3\phi, \text{bal}} / S_{3\phi, \text{bal}}$$

$$F.P. = \cos \theta = 12860 / 16766.25 = 0.767$$

Despejando  $\theta$  se tiene:

$$\theta = \cos^{-1}(0.767) = 39.9132^\circ$$

Para el cálculo de la potencia reactiva del motor de la ecuación 26, se tiene:

$$S_{3\phi, \text{bal}} = \sqrt{(P_{3\phi, \text{bal}}^2 + Q_{3\phi, \text{bal}}^2)} \quad (26)$$

Despejando de la ecuación 26 la potencia reactiva:

$$(S_{3\phi, \text{bal}})^2 = (P_{3\phi, \text{bal}}^2 + Q_{3\phi, \text{bal}}^2)$$

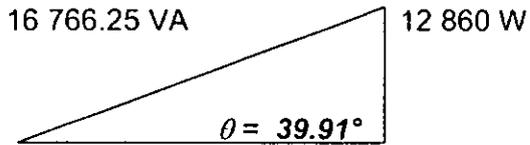
$$Q_{3\phi, \text{bal}}^2 = S_{3\phi, \text{bal}}^2 - P_{3\phi, \text{bal}}^2$$

Sustituyendo los valores:

$$Q_{3\phi, \text{bal}} = \sqrt{((16766.25)^2 - (12860)^2)}$$

$$Q_{3\phi, \text{bal}} = 10\,757.28 \text{ VARS.}$$

Con lo cual se puede construir el triángulo de potencias para el motor número 1.



10 757.28 vars

El mismo procedimiento se realizará para todos los motores mediante una hoja de cálculo y es el que se muestra en la siguiente tabla 4.1.0.

Para el cálculo del factor de potencia del sistema se sumarán todas las potencias de la tabla 4.1.0 con el siguiente procedimiento.

$$S_{3\phi, \text{bal}} = 583.5413675 \text{ kVA}$$

tabla 4.1.0

F.P.

P(KW)	NO	VOLTS(v)	IPC(amps)	S(KVA)	Q(kvar)	P/S	THETA
12.86	1	220	44	16.76625182	10.75767633	0.76701699	39.9132323
0.75	2	220	3.5	1.333679122	1.102814581	0.56235416	55.7812397
0.457	3	220	1.8	0.68589212	0.511467497	0.66628554	48.2189759
0.507	4	220	2.1	0.800207473	0.619098538	0.63358569	50.6848339
0.953	5	220	3.8	1.447994475	1.090173839	0.65815168	48.8409385
0.501	6	127	3.2	0.703905448	0.49445109	0.71174332	44.6230658
0.56	7	127	3.5	0.769896584	0.528337723	0.72737042	43.3336025
1.844	8	230	5.8	2.310555777	1.392239922	0.79807638	37.0531988
1.5	9	127	10.23	2.25029773	1.677450408	0.66657846	48.1964651
1.46	10	127	10.038	2.208063403	1.656485433	0.6612129	48.607559
2.726	11	220	9.1	3.467565717	2.143113623	0.78614227	38.1735515
6.577	12	220	21	8.002074731	4.558099494	0.82191184	34.7233628
0.74	13	220	3	1.143153533	0.871320836	0.64733212	49.6592441
0.4	14	220	1.46	0.556334719	0.386663057	0.71899162	44.0287108
0.293	15	115	1.68	0.334632216	0.161646899	0.87558814	28.8853415
6.8	16	380	14	9.214510296	6.218295586	0.73796651	42.4415197
6.8	17	380	14	9.214510296	6.218295586	0.73796651	42.4415197
0.25	18	220	0.98	0.373430154	0.277398774	0.66946924	47.9738866
0.75	19	220	3.4	1.295574004	1.056414691	0.57889399	54.6272109
1.844	20	220	6.9	2.629253126	1.874202764	0.70133985	45.4654003
6.577	21	220	23	8.764177086	5.792570328	0.75044125	41.3713853
1.4187	22	230	5.2	2.071532766	1.509482796	0.68485521	46.775779
2.726	23	220	12	4.572614132	3.671201983	0.59615789	53.4047803
1.844	24	220	6.6	2.514937773	1.710139176	0.73321894	42.8430679
0.264	25	220	1.036	0.39476902	0.293507375	0.66874549	48.0296855
1.418	26	220	5	1.905255888	1.27250776	0.74425698	41.9046809
0.264	27	220	2.1	0.800207473	0.755404527	0.32991444	70.7364176
0.74	28	220	3	1.143153533	0.871320836	0.64733212	49.6592441
0.9878	29	220	4	1.524204711	1.16079764	0.64807568	49.6033272
2.726	30	230	8	3.186973486	1.650976681	0.85535697	31.2008058
0.264	32	220	0.968	0.36885754	0.257604124	0.71572347	44.2974781
0.045	33	127	0.2168	0.047689594	0.015789154	0.94360208	19.3344462
2.726	34	220	10	3.810511777	2.662503333	0.71538947	44.3248733
2.2	35	220	5.9	2.248201948	0.463046434	0.97855978	11.8858784
2.2	36	220	5.9	2.248201948	0.463046434	0.97855978	11.8858784
1.1	37	220	4.3	1.638520064	1.214392029	0.67133752	47.8296205
0.293	38	127	1.563	0.343813817	0.179885911	0.85220542	31.5476401
0.953	39	115	6.4	1.274789394	0.846687073	0.74757447	41.6192948
1.5	40	190	5.632	1.853432928	1.088675167	0.80930903	35.9715237

0.527	41	127	3.21	0.706105153	0.469952643	0.74634776	41.7250076
1.844	42	220	7.1	2.705463361	1.979695936	0.6815838	47.0324689
0.264	43	220	0.86	0.327704013	0.194149221	0.80560503	36.3312735
1.844	44	220	7.1	2.705463361	1.979695936	0.6815838	47.0324689
0.953	45	220	3.4	1.295574004	0.877669072	0.73558129	42.6436426
1.46	46	127	7	1.539793168	0.489247381	0.94817929	18.5260495
1.527	47	115	9.38	1.868363206	1.076592806	0.81729291	35.1852855
4.49	48	220	13.2	5.029875545	2.267057123	0.89266622	26.7897808
1.844	49	220	5.5	2.095781477	0.995973895	0.87986272	28.3741916
1.293	50	115	7.667	1.527157857	0.81262668	0.84667082	32.1486049
1.844	51	220	5.4	2.057676359	0.913069548	0.89615648	26.3426357
0.507	52	220	2.1	0.800207473	0.619098538	0.63358569	50.6848339
12.86	53	220	44	16.76625182	10.75767633	0.76701699	39.9132323
0.49	54	115	3.1	0.617476113	0.375734946	0.79355296	37.4812076
2.01	55	220	5.4	2.057676359	0.440377111	0.97683	12.3578459
1.704	56	380	2.8	1.842902059	0.701905977	0.92462863	22.3875785
1.844	57	220	7	2.667358244	1.927294477	0.69132071	46.2652542
1.18	58	220	3.8	1.447994475	0.839218684	0.81492024	35.4205242
1.751	59	220	6.03	2.297738601	1.487817758	0.76205361	40.3544242
2.2	60	220	9.4	3.58188107	2.826636163	0.61420241	52.1060109
1.5	61	220	6.1	2.324412184	1.775638477	0.64532444	49.8099945
1.602	62	220	6.22	2.370138325	1.746754614	0.67590992	47.4751495
48	63	230	148	58.95900949	34.23689238	0.81412494	35.4990705
8.674	64	230	24.4	9.720269132	4.386952929	0.89236212	26.8284124
8.674	65	230	24.4	9.720269132	4.386952929	0.89236212	26.8284124
8.674	66	230	24.4	9.720269132	4.386952929	0.89236212	26.8284124
8.674	67	230	24.4	9.720269132	4.386952929	0.89236212	26.8284124
2.726	68	380	5.3	3.488350326	2.176582643	0.78145821	38.6057177
18.5	69	380	35.5	23.36536539	14.27201107	0.7917702	37.6487516
0.953	70	220	3.8	1.447994475	1.090173839	0.65815168	48.8409385
1.1	71	220	4.55	1.733782858	1.340150365	0.63445085	50.6207334
0.953	72	220	3.8	1.447994475	1.090173839	0.65815168	48.8409385
2.726	73	220	9.2	3.505670835	2.204235015	0.77759725	38.9588947
1.256	74	220	3.3	1.257468886	0.06076183	0.99883187	2.76965312
0.507	75	220	2.1	0.800207473	0.619098538	0.63358569	50.6848339
0.75	76	220	2.12	0.807828497	0.300144765	0.92841488	21.8109427
10	77	220	39.6	15.08962664	11.3003023	0.66270692	48.4933538
4.49	78	220	15.9	6.058713725	4.067912487	0.74108139	42.1763848
4.49	79	220	15.8	6.020608607	4.010938544	0.74577178	41.7745681
1.264	80	220	4.02	1.531825734	0.865328885	0.82515914	34.3953714
6.577	81	220	23	8.764177086	5.792570328	0.75044125	41.3713853
0.75	82	220	3.1	1.181258651	0.912618212	0.63491599	50.5862465
3.502	83	220	12.7	4.839349956	3.339955688	0.72365091	43.6432651
4.4	84	380	9.6	6.318521346	4.534722924	0.69636546	45.8638735
0.953	85	220	3.2	1.219363769	0.760683246	0.78155512	38.5968177

1.1	86	220	4.3	1.638520064	1.214392029	0.67133752	47.8296205
0.74	87	220	3	1.143153533	0.871320836	0.64733212	49.6592441
2.726	88	220	8.4	3.200829892	1.677568478	0.85165413	31.6079599
4.49	89	220	14.2	5.410926723	3.019607259	0.8298024	33.9215546
2.726	90	220	8.4	3.200829892	1.677568478	0.85165413	31.6079599
2.726	91	220	8.4	3.200829892	1.677568478	0.85165413	31.6079599
4.49	92	220	18	6.858921198	5.185045805	0.6546219	49.1090137
12.86	93	220	46	17.52835417	11.9106507	0.73366843	42.8051808
0.7	94	380	1.3	0.855633099	0.492044713	0.81810767	35.1041897
1.418	95	220	4.5	1.714730299	0.964145217	0.8269522	34.2130832
6.57	96	220	21.5	8.19260032	4.894261946	0.80194319	36.6839344
2.726	97	220	9.5	3.619986188	2.38185306	0.75304155	41.1454625
0.21	98	220	0.66	0.251493777	0.138380345	0.83501072	33.3830456
0.455	99	380	1.05	0.691088272	0.520171126	0.65838189	48.8234173
5.5	100	220	22	8.383125909	6.326673692	0.65607985	48.9984192
4.2	101	220	16	6.096818843	4.419411726	0.68888384	46.4581797
4.6	102	220	17.02	6.485491044	4.571826121	0.70927551	44.8240002
0.35	103	380	0.74	0.487052687	0.338703882	0.71860809	44.0603192
1.35	104	380	2.85	1.875811025	1.302369763	0.7196887	43.971215
0.2	105	220	0.53	0.201957124	0.028047816	0.99030921	7.98304499
1.14	106	220	4.038	1.538684655	1.03341689	0.74089255	42.1924972
2.48	107	115	19.2	3.824368183	2.911252651	0.64847313	49.573419
4.49	108	220	15.9	6.058713725	4.067912487	0.74108139	42.1763848
2.99	109	220	10.4	3.962932248	2.600909841	0.75449183	41.0190133
2.726	110	220	9.5	3.619986188	2.38185306	0.75304155	41.1454625
1.125	111	380	2.3	1.513812406	1.012918062	0.74315681	41.9989737
4.49	112	220	15.9	6.058713725	4.067912487	0.74108139	42.1763848
12.86	113	220	42	16.00414946	9.526447397	0.80354161	36.5303555
16.953	114	220	56	21.33886595	12.95928204	0.79446584	37.3951683
60	115	440	100	76.21023553	46.9893605	0.78729582	38.0664849
4.49	116	440	7.9	6.020608607	4.010938544	0.74577178	41.7745681
1.5	117	127	7.5	1.649778394	0.686854242	0.90921302	24.6031774
0.527	118	90	4.7	0.732657492	0.508977406	0.71929927	44.0033427
0.527	119	90	4.7	0.732657492	0.508977406	0.71929927	44.0033427
0.953	120	220	3.8	1.447994475	1.090173839	0.65815168	48.8409385

450.3375

583.5413675

363.5209357

Y tomando el valor de la potencia real medida de los motores de planta se tiene:

$$P_{3\phi, \text{bal}} = 450.3375 \text{ kW}$$

De la ecuación (28).

$$\text{F.P.} = \cos \theta = P_{3\phi, \text{bal}} / S_{3\phi, \text{bal}}$$

$$\text{F.P.} = \cos \theta = 450.3375 / 583.5413 = 0.7717$$

Despejando  $\theta$  se tiene:

$$\theta = \cos^{-1}(0.7717) = 39.49032^\circ$$

Para el cálculo de la potencia reactiva del motor de la ecuación 26 se tiene:

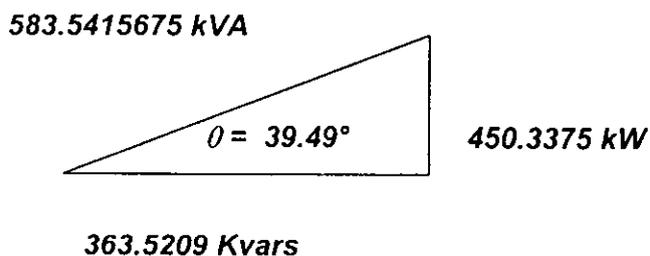
$$S_{3\phi, \text{bal}} = \sqrt{(P^2_{3\phi, \text{bal}} + Q^2_{3\phi, \text{bal}})} \quad (26)$$

Despejando de la ecuación 26 la potencia reactiva:

$$(S_{3\phi, \text{bal}})^2 = (P^2_{3\phi, \text{bal}} + Q^2_{3\phi, \text{bal}})$$

$$Q_{3\phi, \text{bal}} = 363.5209 \text{ KVARs}$$

Con lo cual se puede construir el triángulo de potencias para el sistema completo



#### 4.2 Cálculo de la potencia reactiva requerida.

Después de conocer las potencias del sistema mediante la tabla 2.3.0, en la cual, con un valor de F. de P. de 0.7717 ó 77.17%, se tiene:

Para un valor de factor de potencia futuro de 90%.

0.345

y si el valor de nuestra potencia real es de 450.3375 kW entonces:

$$0.345 \times 450.3375 \text{ kW} = 155.366437 \text{ kvars.}$$

Cuando la corrección del factor sea para 90% final, serán requeridos 155.366437 kvars, lo que implica el uso de 3 capacitores o capacitores primarios de 50 kvar más un capacitor de 25 kVAR con voltaje 2.4 a 21.6 KV. Localizados en las cercanías de las cargas reactivas según el arreglo del diagrama siguiente:

#### **4.3 COSTO DE BAJO FACTOR DE POTENCIA EN PLANTA.**

El bajo factor de potencia equivale a baja eficiencia y baja eficiencia se transforma en un más alto costo. El distribuidor de energía eléctrica penaliza al consumidor que tenga un bajo factor de potencia. Y más allá de esto, la compañía distribuidora de energía tiene la capacidad de entregar una cantidad completa de kVA; por lo tanto, penaliza la cantidad de kVA no consumidos en vez de los kW.

Desde este punto de vista, en los Estados Unidos de Norteamérica las compañías de energía eléctrica cobran por kVA entregado a planta .Por ejemplo si la compañía cobra \$ 5.15 por kVA y el usuario tiene una demanda de 1000kVA a 480 v, tres fases, con un factor de potencia de 80%, entonces la cuenta eléctrica será.

$$\$5.15 / \text{kVA} \times 1000 \text{ kVA} = \$5150$$

pero si el consumidor solamente usa 800 kW de potencia real.

$$800\text{kW} = 1000 \text{ kVA} \times 0.80$$

Si el factor de potencia fuera corregido a 100%, entonces solamente se pagarían 800 kVA, por que solamente 800 kVA son requeridos por la planta. En esas condiciones la cuenta sería de:

$$\$5.15 / \text{kVA} \times 800 \text{ kVA} = \$4120$$

En este ejemplo, la corrección del factor de potencia dejaria como resultado un ahorro de \$1030, originado en la corrección de un 20% de adelanto.

Otra forma de cobrar el bajo factor de potencia corresponde al pago de los kW usados, más un ajuste por bajo factor; por

ejemplo: la compañía suministradora no cobrará por un factor atrasado de 90%, pero si el factor cae por abajo de este valor un factor es aplicado a los kW dependiendo de qué tanto por abajo se encuentre el factor de potencia.

Usando el ejemplo anterior donde la planta consume 800 kW a \$5.15 por kVA con un factor de potencia de 80%, el total del cargo a la planta será multiplicado por el factor:

Factor por bajo **F de P** = **F de P permitido / F. de P. actual**

$$1.125 = 90\%/80\%$$

De aquí la cuenta se calcula como sigue:

Costo Total de Potencia = Costo/kW X Kw X Factor por bajo **F de P**

$$\$4635 = \$5.15/ \text{ kW} \times 800\text{kW} \times 1.125$$

Un ahorro de \$515 podría darse si se lleva el factor de potencia a 90%.

La Compañía de Luz y Fuerza del Centro aplica una tarifa y fórmulas diferentes en el cobro del factor de potencia atrasado. Son las siguientes:

Fórmula de recargo:

$$\text{Porcentaje de recargo} = 3 / 5 ( (90/F.deP.) - 1 ) \times 100$$

Fórmula de bonificación:

$$\text{Porcentaje de bonificación} = \frac{1}{4} ( 1-(90 / F de P.) ) \times 100$$

Los valores resultantes de la aplicación de estas fórmulas se redondearán a un solo decimal por defecto o por exceso, según sea o no menor que 5 (cinco) el segundo decimal. En ningún caso se aplicarán porcentajes de recargo superiores a 120% ni porcentajes de bonificación superiores a 2.5%.

Para nuestro estudio el factor de potencia total de la planta es de 77.17% y se tiene:

$$\text{Porcentaje de recargo} = 3 / 5 ((90/77.17) - 1 ) \times 100$$

$$\text{Porcentaje de recargo} = 0.099753=9.97537\%$$

En esa circunstancia, el recargo por bajo factor de potencia en un mes será de casi el 10% sobre la demanda contratada.

CAPÍTULO V  
CONCLUSIONES

## **5.1 Conclusiones.**

Mediante el cálculo de las potencias trifásicas y voltajes y corrientes de cada uno de los motores, se llega a conocer el factor de potencia en cada uno de los motores; por ende, se conocen las potencias de todo los motores del sistema. Con ellas se puede determinar el factor de potencia global, sin otra finalidad que la de saber cuánta potencia reactiva, es decir, cuántos kvars son requeridos en forma de capacitores; de esta manera se pueden evitar los cargos por bajo factor de potencia, puesto que estos cargos en el factor de potencia (como ya lo explicamos) pueden llegar a ser hasta de un 25% o más. La compra e instalación de

capacitores para regresar el factor de potencia, por lo menos a un 90%, se justifica y se asimila en aproximadamente cinco meses de pago de bajo factor de potencia.

Lo anterior, aunado a importantes ventajas que representa tener un factor de potencia de excelente rendimiento, lo cual contribuye al incremento de capacidad de la planta; además de las siguientes:

1. Pueden ser incluidas cargas adicionales en el sistema.
2. Las condiciones de voltaje mejorarán.
3. Las pérdidas de potencia son reducidas.

Como un ejemplo, supongamos una planta con 1000 kVA, 3% de impedancia y un transformador operando cerca de su máxima capacidad. La planta utiliza 960 kVA, a 480 V, tres fases y el factor de potencia es de 70% .El verdadero valor de la potencia usada en la planta es:

$$\begin{aligned} \text{KW} &= \text{kVA} \times 0.70 \\ &= 960 \text{ kVA} \times 0.70 \\ &= 672 \text{ kW} \end{aligned}$$

La planta desea incrementar su producción en 30%; esto podrá lograr un incremento adicional de 201.6 kW, cargado en el sistema

eléctrico. Asumiendo un factor de potencia unitario para la carga adicional, el sistema eléctrico tendrá que entregar 1161.6 kVA, rango que se encuentra por arriba de la capacidad del sistema.

Una opción sería la adquisición de un nuevo transformador para el sistema. Si el factor de potencia permanece en 70%, el factor sería de:

$$\begin{aligned} &=(672 \text{ kW} + 201.6\text{kW})/0.70 \\ &= 1248 \end{aligned}$$

El siguiente tamaño estándar de transformadores sería 1500kVA. Además de que esta medida significaría paralelamente tener que cambiar el tamaño de los conductores y los protectores contra sobrecorrientes, el alto costo de la medida resulta evidente sin necesidad de hacer cálculos.

Pero, en cambio, si se corrige el factor de potencia a la unidad, habría 328 kw de capacidad disponible en lugar de 40 kW a un 70% de factor de potencia.

Para el caso de ANSUL MEXICO, S.A. DE C.V., el costo de la demanda contratada oscila por los \$40,000.00. Si a esto, como queda dicho anteriormente, se le agrega el 10% de recargos por

bajo factor de potencia la suma ascendería a \$44,600.00, con la consecuente diferencia en contra de \$4,600.00 mensuales.

Para corregir el factor de potencia se requieren 3 capacitores de 50 kVAR trifásicos y uno de 25 kVAR trifásico con un costo de \$660 USD Y \$565 USD ó \$6732.00mn y \$5763.00 M.N., respectivamente, lo que nos daría un costo de:

\$20,196.00M.N. x 3piezas.(50kVAR)

\$5,763.00M.N. x1pieza (25 kVAR)

\$25,959.00 M.N.

+ \$3,500.00M.N. (protecciones )

\$29,459.00 M.N.

Y si el pago por bajo factor de potencia mensual oscila entre los \$4,600.00, son necesarios (6.40 meses) 7 meses para recuperar la inversión. Con estas cifras resulta obvia la justificación del estudio y la instalación de capacitores para la corrección del factor de potencia.

Y se tendrá un beneficio anual de \$55,200.00.

## BIBLIOGRAFÍA

BEEMAN Donald. *Industrial power systems handbook*, 1a. edición.  
Editorial Mc.Graw Hill 1955, pp. 457, 458, 453, 458, 459,  
460.

BRENNER ,Egon y MANSOUR David. *Analysis of electric circuits*, 2a.  
edición. Editorial Mc. Graw Hill, 1967, pp. 284, 285, 286,  
312-321, 314, 315, 316, 532, 317, 575-577.

CROFT, TERRRELL, SUMMERS, WILFORD. *American electronic's  
handbook*, 11a. edición. Editorial Mc. Graw Hill, 1887, pp 7 -  
136, 4-135, 1-137.

Editorial John Wiley & Sons, p. 183.

FINK Donald g., CHRISTIANSEN Donald; *Electronics engineers'  
handbook*, 3a. edición. México, Editorial Mc Graw Hill, 1989,  
pp.7 -8 y 29 - 45.

FITZGERALD A.E; KINGSLEY JR Charles, UMANS Stephen. *Electric machinery*, 5a edición. Editorial Mc Graw Hill, 1990, pp. 235, 276, 155-156.

HUBERT Charles I. *Electric circuits AC/DC an integrated approach*, 1a. edición. Editorial Mc. Graw Hill, 1982, pp. 292, 293, 294, 290, 613, 303, 297-303, 616-618.

WEEDY, B.M., BIRROW Mathew. *Electric power systems*, 3a. edición.