Universidad Acción Pro Educación y Cultura



Decanato de Ingeniería e Informática Escuela de Ingeniería

Tesis de Grado para Optar por el Título de:

Ingeniero Eléctrico

"PROPUESTA TÉCNICA ECONÓMICA PARA OPTIMIZAR EL CONSUMO DE ELECTRICIDAD EN LA EMPRESA MATERIAS PRIMAS SRL., UBICADA EN SANTO DOMINGO DN., 2016"

Sustentantes:

Br. Félix Arialdy Pérez Ogando	2010-0739
Br. Kandy Esther Uribe Valentín	2011-0322

Asesor:

Prof. Cesar Adonis Feliz Santana, PhD

Distrito Nacional República Dominicana Agosto de 2016

DEDICATORIA

A mi familia...

Por su gran apoyo, comprensión y tolerancia, mi Madre Apolonia Ogando, mi padre Felix Perez, mi sobrino Jean Carlos, a mis hermanas Yeidy y Facelis ellas dos fueron sinónimo de apoyo y entrega incondicional para cumplir esta meta, que más que un final es el inicio de un gran camino por recorrer, con el compromiso insoslayable de servir a mi país.

AGRADECIMIENTOS

En momentos como estos son ínfimas unas simples palabras de agradecimiento, pero si estas palabras salen del sentir interior y del mirar hacia atrás y ver el camino recorrido y decir: sin ellos no hubiese sido posible este sueño, entonces es ahí donde estas cobran sentido.

Agradezco en primer lugar a Dios que siempre escucha nuestras plegarias cuando nos dedicamos a obrar dentro del bien y luego a mi familia por darme tanto.

A mis profesores por la entrega de sus conocimientos y experiencias, en especial a mi asesor y amigo Dr. Cesar Feliz Santana, y a UNAPEC en general por acogerme durante este tiempo.

A Don Mario Koenig por su ayuda económica y por la oportunidad que he tenido dentro de su empresa de desarrollar mis conocimientos al servicio de la misma.

A mis compañeros de carrera, en especial a **Kandy Uribe** mi compañera de tesis, Daniel Martich, Cristopher Liranzo, Franna, Carlos Vilorio, Edwin, Job Bencosme y Alexander Medina.

A mis compañeros de trabajo, Rafael de la Cruz, Luis E. Ruiz, Francisco Cruz, Radamez Seijas, Rolando Espino, Hipólito Montas, Edwin Rafael, José Antonio, Keila Antigua, Julián, Yeltsin, Luis Francisco, Antonio Miguel, Ángel, Rubén, José Luis, Manuela y a Eliezer.

A mi novia Yolancis, y a mis amigos, porque sin ellos el andar se hace pesado y vacío, a ellos también mil gracias...

Felix Arialdy Perez Ogando

DEDICATORIA

A ti Señor Todo Poderoso,

Eres mi fuerza.

A mi madre, Eleodora Valentin.

Le dedico este fin, que se convertirá en el inicio de nuevos objetivos.

A mi hermana, Estephanny Uribe.

Quien cuando ya mis ojos no podían más estaba ahí para alentarme a seguir, Eres mi amiga fiel, mi apoyo, eres parte de mí.

A todas esas personas que estuvieron ahí para apoyarme cuando sentía que no podía continuar, les dedico este, el resultado final de mi transcurso en el camino a convertirme en Ingeniera Eléctrica.

AGRADECIMIENTOS

Sobre todas las cosas le agradezco inmensamente a Dios, por brindarme la oportunidad

de lograr una de mis metas. Te agradezco por revestirme de tu bendición para darme la fuerza

necesaria para combatir todos los retos profesionales que has puesto en mi camino, por darme la

sabiduría de elegir los caminos que tu señalaste correctos.

A mi madre, eres mi luz sin ti no hubiera podido llegar a donde estoy, con su sinceridad,

amor, respeto Sobre todo por siempre apoyar con palabras de aliento cada uno de los nuevos

retos que puse en mi camino.

A mi padre, quien se encargó de ser el hombre que apoyo a formar la persona que soy

hoy. Por tu apoyo y por tu ejemplo has servido de ancla para lograr mis objetivos.

Entero agradecimiento al profesor Cesar feliz por su espontánea y generosa colaboración en lo

que ha sido este camino hacia la culminación de todos nuestros esfuerzos.

Félix A. Pérez mi compañero en este proyecto que a pesar de las adversidades supimos

cómo llegar al final con la frente en alto.

Gracias mil...!

Kandy Esther Uribe Valentín

5

Resumen

Los sistemas eléctricos de potencia con el pasar de los tiempos han ido experimentando avances que han colocado a estos en la cima de la eficiencia y aprovechamiento de la energía. Lo que se logrará con la presente propuesta técnico-económica basada en la mejoría del factor de potencia en el sistema eléctrico de la empresa MATERIAS PRIMAS S.R.L., no es más que eliminar armónicos (perturbaciones) en las ondas sinusoidales fruto de los reactivos de naturaleza inductiva que producen los campos magnéticos de los equipos (motores, trasformadores, actuadores, solenoides), los cuales se convierten en unos de los factores de pérdidas de energía más significativos en la empresa.

El diseño e introducción de un sistema que adicione una cantidad precisa de carga capacitiva, logra que la potencia reactiva producida por las cargas inductivas ya mencionadas, vectorialmente reduzca su magnitud y por defecto el valor de la potencia aparente, visualizado en el diagrama vectorial de las tres potencias que posee un sistema eléctrico, al extremo que si se logra que el ángulo de fase entre la potencia activa y la aparente sea cero, la potencia aparente coincide y se iguala a la potencia activa. Lograda esta condición los equipos arriba señalados trabajan más eficientemente y a su vez se consigue que la empresa no sea penalizada económicamente por la distribuidora de electricidad.

Tabla de contenido

Contenido

RESUMEN	l
Lista de tablas	10
Introducción	12
SISTEMAS DE COMPENSACIÓN DE REACTIVOS	1
1.1 GENERALIDADES DE LOS SISTEMAS DE COMPENSACIÓN DE REACTIVOS	15
1.1.1 CARGAS RESISTIVAS	17
1.1.2 CARGAS INDUCTIVAS.	19
1.1.3 CARGAS CAPACITIVAS	21
1.1.4 POTENCIA ACTIVA (P)	22
1.1.5 POTENCIA REACTIVA (Q)	23
1.1.6 POTENCIA APARENTE (S)	
1.1.7 EL TRIÁNGULO DE POTENCIA	2
1.2 EL CAPACITOR	28
1.3 ASPECTOS A CONSIDERAR PARA INSTALAR BANCOS DE CAPACITORES	30
1.3.1 PARTES PRINCIPALES DE UN CAPACITOR DE POTENCIA	30
1.3.2 CONEXIÓN DE LOS BANCOS DE CAPACITORES	33
1.3.3 CONEXIÓN ESTRELLA A TIERRA CON NEUTRO SÓLIDAMENTE CONECTADO A	
TIERRA.	
1.3.4 CONEXIÓN ESTRELLA CON NEUTRO FLOTANTE	
1.4 MÉTODOS DE COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA	
1.4.1 COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA MEDIANTE MÁQUINAS SINCRÓNICAS	
1.4.2 COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA MEDIANTE CEV'S.	
1.4.3 COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA MEDIANTE BANCOS DE CAPACITORE	
1.5.1 FACTOR DE POTENCIA	
1.5.2 PLANTEAMIENTO ANALÍTICO PARA LA CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCI	
1.6 COMPONENTES ARMÓNICAS	
1.7 EFECTO DE RESONANCIA	
1.7.1 RESONANCIA SERIE.	
I.I.& NEQUINATIVIA FARALELU	

CAPITULO II	58
LA EMPRESA: SITUACIÓN DE LAS CARGAS Y DE LA DEMANDA EN LA EMPRESA MATE PRIMAS, S.R.L.	
2.1 EMPRESA MATERIAS PRIMAS S.R.L.	59
2.1.2 ALAMBRE:	60
2.1.3 INTERIORES (PANEL DE SPRING DE ACERO):	60
2.1.5 NOG-ZAG (SPRING DE MUEBLES):	61
2.1.6 MISIÓN	61
2.1.7 VISIÓN	61
2.1.8 VALORES	61
Asegurar un trato justo a nuestros clientes y colaboradores.	61
2.2.1 MOTORES DE INDUCCIÓN	63
2.2.2 LUMINARIAS	63
2.2.3 CLIMATIZACIÓN	63
2.2.4 ELECTRO SOLDADORAS	63
2.2.5 MEDICIONES DE POTENCIA	64
2.2.6 OBSERVACIONES Y RESULTADOS DE MEDICIONES DE POTENCIA	68
2.3 ESTRUCTURA LEGAL E INSTITUCIONAL QUE ESTABLECE LA PENALIZACIÓN EN LA FACTURA ELÉCTRICA POR BAJO FACTOR DE POTENCIA EN LA REPUBLICA DOMINICANA	
2.3.1RESOLUCIÓN NO. 237 DE MINISTERIO DE INDUSTRIA Y COMERCIO	68
2.3.2 OPCIONES TARIFARIAS Y CONDICIONES DE APLICACIÓN	69
2.3.3 OPCIONES TARIFARIAS PARA CLIENTES EN BAJA TENSIÓN	69
2.3.4 OPCIONES TARIFARIAS PARA CLIENTES EN MEDIA TENSIÓN	75
2.3.5 OPCIONES TARIFARIAS PARA CLIENTES EN ALTA TENSIÓN	75
2.3.6 RECARGO POR FACTOR DE POTENCIA MEDIO MENSUAL	76
2.3.7 DEFINICIÓN DE LAS HORAS DE PUNTA	76
2.3.8 CONDICIONES GENERALES DE APLICACIÓN DE LAS TARIFAS	76
2.4 METODOLOGÍA PARA LA COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA CAPACITIVA	78
2.4.1 CÁLCULO DE LA POTENCIA REACTIVA	78
2.4.2 CÁLCULOS DE LAS INSTALACIONES INDUSTRIALES CON MEDICIÓN DE LA ENERGE	
2.4.3 CÁLCULO DE LA POTENCIA REACTIVA POR EL MÉTODO DE TABLAS	81
2.4.4 CALCULO DE POTENCIA REACTIVA A PARTIR DEL RECIBO DE LA COMPAÑÍA DE DISTRIBUCIÓN	
2.4.5 CALCULO DEL NÚMERO DE UNIDADES	
CAPITULO III	87

IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE COMPENSACIÓN DE REACTIVOS EN MA	
S.R.L. (FACTIBILIDAD TÉCNICO ECONÓMICA.)	88
3.1 CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS A CONSIDERAR PARA LA IMPLEMENTA SISTEMA DE COMPENSACIÓN.	
3.2 FACTIBILIDAD ECONÓMICA DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE C	
ANEXOS	

Lista de tablas

Tablas

Tabla I. Valores para bancos de capacitores monofásicos de baja tensión	27
Tabla II. Valores para bancos de capacitores trifásicos en baja tensión	28
Tabla III. Capacidades en kVAr para capacitores monofásicos en media tensión	29
Tabla IV. Mínimo número de unidades recomendadas en paralelo por grupo serie para limita tensión a un máximo del 10% sobre la nominal, cuando falla una unidad	
Tabla V. Valores aproximados del factor de potencia para las cargas más comunes	33
Tabla VI. Factor de tabla para el cálculo de la potencia del banco de capacitores	35
Tabla VII. Capacidades banco de capacitores trifásicos en baja tensión	59
Tabla VII: Factor K	. 60
Tabla IX: Capacitores monofásicos en MT	61
Tabla X: Resumen presupuesto de banco de capacitores	68
Tabla XI: Resumen de análisis económico del proyecto	 69
Tabla XII: Resumen valor anual neto	70
Tabla XIII: Resumen tasa interna de retorno	71

Lista de figuras

Figura 1 Elemento lineal y no lineal. Fuente: ver	16
Figura 2 . Forma de onda de corriente	16
Figura 3 Onda de tensión y corriente en fase	18
Figura 4 Diagrama fasorial de un circuito inductivo	19
Figura 5 Onda de corriente atrasada 90º con respecto a la tensión	20
Figura 6 Diagrama fasorial de un circuito capacitivo	21
Figura 7 Onda de corriente adelantada 90º con respecto a la tensión	22
Figura 8 Representa la potencia activa (P) en fase con la tensión (V)	23
Figura 9 Potencia reactiva en adelanto (QC) o atraso (QL) con respecto a la tensión	24
Figura 10 Vector resultante (S) de sumar la potencia activa y la potencia reactiva	25
Figura 11 Triángulo de potencia	26
Figura 12 Campo electroestático entre las dos placas del capacitor	28
Figura 13 Arreglo de una unidad capacitiva y detalles del capacitor interno	32
Figura 14 Conexión estrella a tierra con neutro sólidamente conectado a tierra	33
Figura 15 Conexión estrella con neutro flotante con protección en el neutro	34
Figura 16 Conexión delta para motores en baja tensión	35
Figura 17 Triángulo de potencia en un circuito trifásico	44
Figura 18 Corrección del Cos φ1 a Cos φ2, mantenido el suministro de la carga constante.	46
Figura 19 Cambio de potencia activa y reactiva con factor de potencia, mantenido la pote	ncia
aparente de la carga constante	49
Figura 20 La onda sinusoidal a la frecuencia fundamental (60 Hz) y armónicos: 2do (120 H	z);
3ro (180 Hz); 4to (240 Hz); y 5to (300 Hz)	50
Figura 21 La onda deformada compuesta por la superposición de una fundamental a 60 H	z y
armónicas menores de tercer y quinto orden	51
Figura 22 Circuito resonante serie.	54
Figura 23 Circuito resonante paralelo	55
Figura 24 Corriente armónica en un banco de capacitores de 60 kVAr, 480 Volts	57

Introducción

Una de las medidas al alcance de la industria para conocer el grado de eficiencia con el cual está utilizando dicha energía es el factor de potencia, el cual ha sido tomado muy en cuenta dentro de los programas tendentes a la mejor utilización de la electricidad.

Con este trabajo se pretende obtener datos importantes que sirvan de base para lograr una propuesta que eficientice y proyecte ahorros significativos en el e aprovechamiento de la energía, optimizando así los costos de producción y por consiguiente la competitividad de la empresa Materias Primas S.R.L.

La factura de electricidad es un costo significativo para las cuentas de las empresas. La misma impacta mucho los márgenes de ganancias y rentabilidad para cualquier empresa de procesamiento industrial.

En el caso de la empresa Materias Primas, SRL, la mayoría de todos los equipos y cargas que la componen son de naturaleza puramente inductiva, como por ejemplo, motores de inducción, trasformadores, alumbrado fluorescente, máquinas de soldar, ventiladores, lámparas de inducción, etc. Todos estos equipos mencionados, para su funcionamiento absorben una importante potencia reactiva del sistema eléctrico nacional interconectado SENI. La misma es la que se encarga de producir los campos magnéticos necesarios para la trasformación de la energía eléctrica en energía mecánica, y de forma periódica suministran nuevamente esta potencia al sistema (una vez el campo magnético disminuye su intensidad). Este flujo bidireccional y constante de potencia reactiva entre la carga y el sistema degenera en un incremento de la corriente que entregan las redes del SENI provocando así un bajo factor de potencia y como consecuencia mayores pérdidas en los conductores por efecto Joule y una mayor caída de voltaje en los mismos.

La importancia de implementación de sistemas de compensación de reactivos, es hoy en día un tema de vanguardia en cuanto a eficientización energética se refiere. Lograr que los sistemas eléctricos sean cada vez más estables es una constante tanto para los consumidores de electricidad como para los productores (centrales de generación). En la República Dominicana se realizan esfuerzos encomiables en ese sentido. He ahí el norte de la compensación de carga reactiva, contribuir con cargas reactiva de naturaleza opuesta a la ya existente para lograr que el conjunto de redes opere con un factor de potencia deseable.

Un factor de potencia óptimo es aquel que su valor es la unidad o muy próximo a ella. Contar con deficiencia o factores de potencia lejanos a la unidad, las empresas se ven sujetas a penalizaciones por parte de las distribuidoras de electricidad, generando esto cuantiosas pérdidas de recursos económicos que impactan fuertemente las ganancias de las empresas.

Es por eso que luego de haber realizado un minucioso análisis y recolección de datos preliminar es del sistema eléctrico de Materias Primas (MAPRICA), un sistema puramente fabril de manufactura que ronda los 975 KW como demanda de potencia activa, donde se ha podido constatar la existencia de un bajo factor de potencia que por mucho tiempo le ha significado perdidas económicas cuantiosas a la empresa, producto de la penalización aplicada por la Empresa Distribuidora de Electricidad del Sur (EDESUR).

En síntesis este trabajo tiene como objetivo general, diseñar un plan de optimización del factor de potencia que garantice su corrección dentro de los límites fijados por las normas vigentes de la distribuidora de electricidad, y mejorar la eficiencia y consumo de energía. Y específicamente se pretende realizar el estudio de un sistema de compensación automática de reactivos en la empresa MATERIAS PRIMAS a fin de reducir pérdidas técnicas que logren abaratar los costos de la facturación eléctrica. Para lograr este objetivo se realizaran las siguientes tareas:

- Realizar análisis cualitativo y cuantitativo de la situación actual en materia de facturación electricidad.
- Seleccionar los equipos y maquinarias para la optimización del factor de potencia.
- Cuantificar los costos actuales del funcionamiento de las maquinarias de la empresa MATERIAS PRIMAS S.R.L, para evaluar los factores para su posible mejora.

El presente trabajo consta de tres capítulos, los cuales se dividen en sub capítulos que sustentan teóricamente el tema, hay un primer capítulo donde se expone la base teórica existente que sustenta dicho trabajo, generalidades, antecedentes, conceptos y profundizando ampliamente en los capacitores y su diversos tipos de conexión en forma de arreglo para formar los famosos "bancos de capacitores", etc. Un segundo capítulo que se enfoca en analizar el problema y plasmar los datos recolectados como son, facturas de consumo de electricidad, diagrama de conexión de la subestación de la empresa MAPRICA, potencia instalada, potencia demandada, penalidad económica a la que la empresa está siendo penalizada económicamente por EDESUR por causa de su bajo factor de potencia. Y un tercer y último capítulo en el que se expresan los resultados en materia económica de la aplicación del sistema automático de compensación de reactivos. Este capítulo es el más importante, ya que en el mismo se podrá apreciar el impacto

económico que generaría la implementación de un sistema de compensación de reactivos para la empresa, pero si se mira más allá del punto vista económico, la instalación de dicho sistema tiene también un gran impacto en la calidad de la energía reduciendo significativamente las perdidas.

Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones derivadas de la propuesta, a nombre de los autores y dirigidas especialmente a las partes interesadas llámese los dueños de la empresa y al equipo técnico y administrativo de (MAPRICA).

SISTEMAS DE COMPENSACIÓN DE REACTIVOS

1.1 GENERALIDADES DE LOS SISTEMAS DE COMPENSACIÓN DE **REACTIVOS**

En este capítulo se estudia las cargar conectadas a la red eléctrica, las cuales ocasionan diferencias en la tensión y corriente dando lugar a una deficiencia en el factor de potencia sacando al mismo de los parámetros permitidos (0.9 y la unidad), lo cual de no ser así limita de condiciones óptimas el sistema y pone en disposiciones legales el incumplimiento de este rango al estar fuera de los lineamientos.

Tipos de cargas

Una carga es un elemento que consume energía eléctrica, en general existen dos tipos de cargas dentro de los sistemas eléctricos: Cargas lineales y las Cargas no lineales. Una carga es lineal cuando la tensión aplicada a sus extremos y la corriente que pasan por ella están estrechamente relacionadas¹ como se puede observar en la figura 1 a). Por el contrario, se dice que una carga es no lineal cuando la relación tensión/corriente no es constante² lo cual se representa en la figura 1 b).

¹Chavez Negrete, S. (2010). Armonicas: Casos Práticos . Obtenido de http://www.slideshare.net/fnuno/curso-de-armonicas-casos-

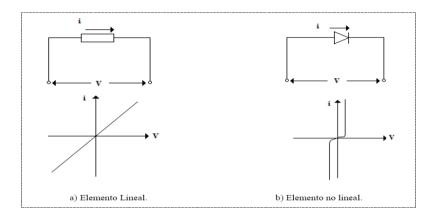


Figura 1 Elemento lineal y no lineal. Fuente: ver ³

Las cargas no lineales conectadas a la red de corriente alterna absorben corrientes que no son senoidales. Esto se observa en la figura 2.

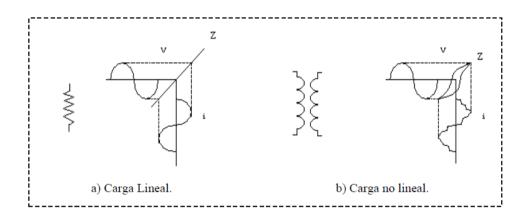


Figura 2 . Forma de onda de corriente..

Fuente: Ver4

Relación del factor de potencia y tipos de cargas en los circuitos eléctricos

términos generales pueden distinguirse tres tipos de cargas eléctricas al conectar un equipo a una red, por la cual, circula corriente eléctrica expresada en amperes (A) y tensión expresado en volts (V).

³HarperEnriquez, (2008). Instalaciones Eléctricas Residenciales e Industriales

⁴HarperEnriquez, (2008). Instalaciones Eléctricas Residenciales e Industriales.

1.1.1 CARGAS RESISTIVAS

Tales cargas son referidas como si tuvieran una resistencia eléctrica designada con la letra R y expresada en Ohm Ω (I). Las cargas resistivas pueden encontrarse en equipos como lámparas incandescentes, planchas y estufas eléctricas, en donde la energía que requieren para funcionar es transformada en energía lumínica o energía calorífica, en cuyo caso el factor de potencia toma el valor de 1.0.

En un circuito puramente resistivo, la corriente está en fase con la tensión y es función inmediata de la tensión. Por lo tanto, si la tensión y la corriente están en fase, tenemos que:

$$I = \frac{V}{R} \tag{1}$$

En donde:

I = Corriente eléctrica (A).

V = Tensión eléctrica (V).

R = Resistencia eléctrica (1).

En la Figura 3, se presenta el diagrama fasorial correspondiente a las cargas resistivas.

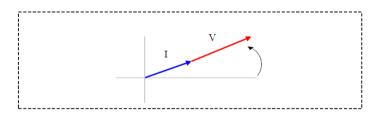


Figura 3. Diagrama fasorial de un circuito resistivo.

La resistencia eléctrica absorbe potencia en Watts igual a:

$$P = VI = RI^2 = \frac{V^2}{R}$$
 (2)

En donde:

P = Potencia activa (W).

Las cargas de tipo resistivo que se encuentran más comúnmente en los sistemas eléctricos ya sea residencial, industrial o comercial son los siguientes:

- Hornos eléctricos.
- Calefactores.
- Planchas.
- Alumbrado incandescente.

En la figura 4, se muestran las ondas senoidales de tensión y corriente eléctrica en función del tiempo y el desfasamiento que existe entre ellas, la cual es igual a cero, siempre que se trate de un circuito puramente resistivo, es decir, se encuentran en fase.

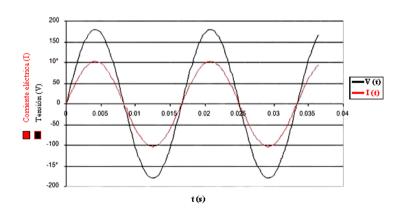


Figura 3 Onda de tensión y corriente en fase.

1.1.2 CARGAS INDUCTIVAS.

Las cargas inductivas son encontradas en cualquier lugar donde haya bobinados involucrados, por ejemplo en los equipos del tipo electromecánicos como los motores, balastros, transformadores, entre otros; además de consumir potencia activa, requieren potencia reactiva para su propio funcionamiento, por lo cual trabajan con un factor de potencia menor a 1.0. Considerándose por lo tanto que las cargas inductivas, sean el origen del bajo factor de potencia (menores a 0.9). En un circuito puramente inductivo la corriente no está en fase con la tensión ya que va atrasada 90° con respecto a la tensión⁵. En la Figura 5, se presenta el diagrama fasorial correspondiente a las cargas inductivas.

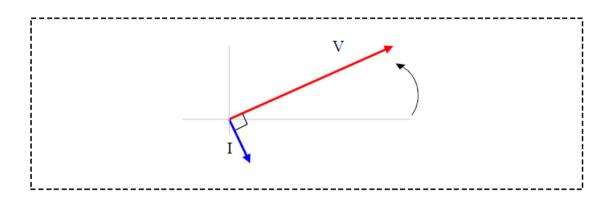


Figura 4 Diagrama fasorial de un circuito inductivo.

Fuente: Ver6

Algunos equipos de cargas del tipo inductivo son los siguientes:

- Transformadores.
- Motores de inducción.
- Alumbrado fluorescente.
- Máquinas soldadoras.

⁵ Glover Dunkan, Sarman Mulukutla, (2008). Sistemas de Potencia Análisis y Diseño.

Constructor eléctrico, (2013). Cargas en una instalación eléctrica. Obtenido de https://constructorelectrico.com/cargas-en-una-instalación-electrica/

En la figura 6, se muestran las ondas senoidales de tensión y corriente eléctrica para circuitos inductivos en función del tiempo y el desfasamiento de 90° de la corriente con respecto a la tensión. Viendo la gráfica del desplazamiento de las funciones V e I en función del tiempo, podemos decir que en el primer semi ciclo la potencia V•I es negativa (porque tenemos a V positiva y a I negativa), lo cual indica que el circuito le está entregando potencia al sistema, luego en el segundo semi ciclo sucede lo contrario, ambas variables son positivas entonces la potencia resultante es positiva, lo cual indica que se está absorbiendo energía del sistema, esto por el principio de convención de los signos¹. Esto se repite en cada uno de los ciclos V e I generando así una potencia reactiva que da como resultados un factor de potencia en atraso².

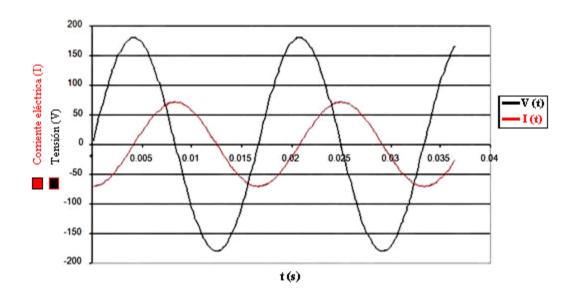


Figura 5 Onda de corriente atrasada 90 º con respecto a la tensión

Fuente: Ver 7

-

⁷Constructor eléctrico, (2013). Cargas en una instalación eléctrica. Obtenido de https://constructorelectrico.com/cargas-en-una-instalación-electrica/

1.1.3 CARGAS CAPACITIVAS

Las cargas capacitivas se presentan en los capacitores y se caracterizan porque la corriente se haya adelantada respecto de la tensión 90°. En la Figura 7, se presenta el diagrama fasorial correspondiente a las cargas capacitivas.

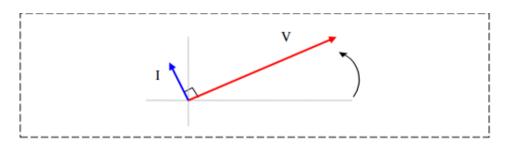


Figura 6 Diagrama fasorial de un circuito capacitivo

Fuente: Ver 8

Las cargas de tipo capacitivo en la industria son:

- Bancos de capacitores.
- Motores síncronos.

En un circuito puramente capacitivo, no existe consumo de energía aún si hay corriente circulando⁹. Las cargas capacitivas generan potencia reactiva expresada en volts amperes reactivos (VAr). En la figura 8, se muestran las ondas senoidales de tensión y corriente eléctrica en función del tiempo, para este caso la corriente se adelanta 90° con respecto a la tensión. En este tipo de circuito sucede lo mismo que en el inductivo explicado anteriormente, pero con sentido contrario. Aquí la potencia reactiva que se genera, produce un factor de potencia en adelanto¹.

⁸Constructor eléctrico, (2013). Cargas en una instalación eléctrica. Obtenido de https://constructorelectrico.com/cargas-en-una-instalacion-electrica/9 Bell, D. A. (1988). Fundamentals of Electric Circuits. (4th ed). Prentice- Hall, INC. EnglewoodCliffs, New Jersey 07632.

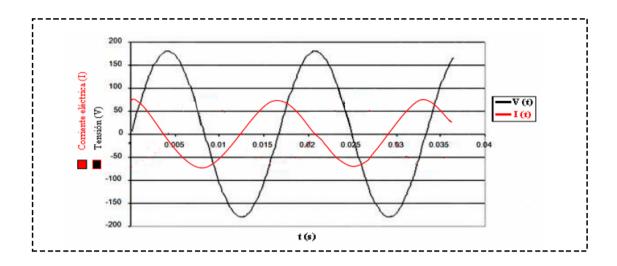


Figura 7 Onda de corriente adelantada 90 º con respecto a la tensión.

Fuente: Ver10

1.1.4 POTENCIA ACTIVA (P)

Es la potencia que representa la capacidad de un circuito para realizar un proceso de transformación de la energía eléctrica en trabajo, la origina la componente de la corriente que está en fase con la tensión. Los diferentes dispositivos eléctricos existentes convierten la energía eléctrica en otras formas de energía tales como: mecánica, lumínica, térmica, química, etc. Esta potencia es, por lo tanto, la realmente consumida por los circuitos. Cuando se habla de demanda eléctrica, es esta potencia la que se utiliza para determinar dicha demanda.

Se designa con la letra P. De acuerdo con su expresión, la ley de Ohm y el triángulo de impedancias:

$$P = I \cdot V \cdot \cos \phi = I \cdot Z \cdot I \cos \phi = I^2 \cdot Z \cdot \cos \phi = I^2 \cdot R$$
 (3)

..

¹⁰Constructor eléctrico, (2013). Cargas en una instalación eléctrica. Obtenido de https://constructorelectrico.com/cargas-en-una-instalacion-electrica/

Donde:

$Z = Impedancia (\Omega).$

Sus unidades son kW ó MW o múltiplos de estas. Resultado que indica que la potencia activa es debido a los elementos resistivos.

La potencia activa P, por originarse por la componente resistiva, es un vector a cero grados¹¹, como se puede apreciar en la figura 9.

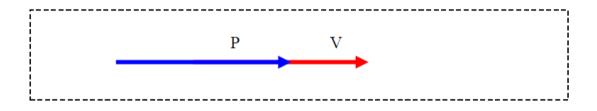


Figura 8 Representa la potencia activa (P) en fase con la tensión (V).

Fuente: Ver12

1.1.5 POTENCIA REACTIVA (Q)

Esta potencia no tiene tampoco el carácter realmente de ser consumida y sólo aparecerá cuando existan bobinas o condensadores en los circuitos que generan campos magnéticos y campos eléctricos. La origina la componente de la corriente que está a 90° con respecto a la tensión, en adelanto o en atraso. La potencia reactiva tiene un valor medio nulo, por lo que no produce trabajo útil y se designa con la letra Q.

Piotrowski, N. (2013). True Power vs. Apparent Power: Understanding the Difference. [Online]. Disponible en. http://www.aspowertechnologies.com/ resources/pdf/True%20vs.%20Apparent%20Power.pdf

¹²Constructor eléctrico, (2013). Cargas en una instalación eléctrica. Obtenido de https://constructorelectrico.com/cargas-en-una-instalacion-electrica/

A partir de su expresión,

$$Q = I \cdot V \cdot \sin \varphi = I \cdot Z \cdot I \sin \varphi = I^2 \cdot Z \cdot \sin \varphi = S \cdot \sin \varphi$$
 (4)

Donde:

S = Potencia aparente o total (kVA o MVA).

Sus unidades son kVAr o MVAr o múltiplos de estas. Lo que reafirma en que esta potencia es debida únicamente a los elementos reactivos, los cuales pueden ser del tipo inductivo QL o capacitivo QC, como se observa en la figura 10.

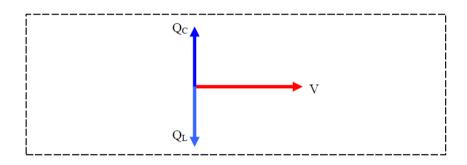


Figura 9 Potencia reactiva en adelanto (QC) o atraso (QL) con respecto a la tensión.

Fuente: ver13

1.1.6 POTENCIA APARENTE (S)

La potencia aparente (también llamada compleja) de un circuito eléctrico de corriente alterna es la suma, por ser la potencia total es el vector resultante de sumar la potencia activa y la potencia reactiva, dicho diagrama fasorial se muestra en de la figura 11. Esta potencia no es la realmente consumida o útil, salvo cuando el factor de potencia es la unidad (cos φ =1) ya que entonces la potencia activa es igual a la potencia aparente, esta potencia también es indicativa de que en la red de alimentación de un circuito no sólo ha de satisfacer la energía consumida por los

¹³ Bell, D. A. (1988). Fundamentals of Electric Circuits. (4th ed). Prentice- Hall, INC. EnglewoodCliffs, New Jersey 07632.

elementos resistivos, sino que también ha de contarse con la que van a "almacenar" bobinas y condensadores. Se la designa con la letra S.

La ecuación para calcular la potencia aparente es:

$$S = I \cdot V \tag{5}$$

Sus unidades son kVA o MVA o múltiplos de estas.

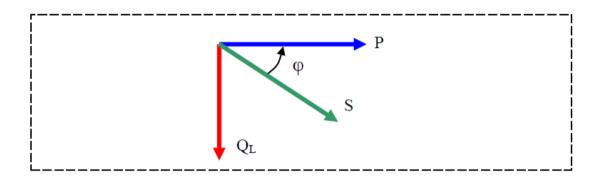


Figura 10 Vector resultante (S) de sumar la potencia activa y la potencia reactiva.

Fuente: Ver14

1.1.7 EL TRIÁNGULO DE POTENCIA

El llamado triángulo de potencias es la mejor forma de observar y comprender de forma gráfica qué es el factor de potencia ócosφ y su estrecha relación con los restantes tipos de potencia presentes en un circuito eléctrico de corriente alterna, además de observar la interacción de una potencia con respecto a las otras dos ya que al modificar una potencia repercutiría en la modificación de las otras dos potencias.

25

¹⁴ Bell, D. A. (1988). Fundamentals of Electric Circuits. (4th ed). Prentice- Hall, INC. EnglewoodCliffs, New Jersey 07632.

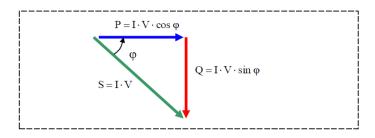


Figura 11 Triángulo de potencia.

Como se puede observar en el triángulo de la figura 12, el factor de potencia óCos prepresenta el valor del ángulo que se forma al representar gráficamente la potencia activa (P) y la potencia aparente (S), es decir, la relación existente entre la potencia real de trabajo y la potencia total consumida por la carga o el consumidor conectado a un circuito eléctrico de corriente alterna. Esta relación se puede representar también, de forma matemática, por medio de la siguiente ecuación:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \tag{6}$$

De aquí se define también que:

$$S = P + jQ \tag{7}$$

Donde:

jQ = Potencia reactiva inductiva (Varº).

El resultado de esta operación será 1 o un número fraccionario menor que 1 en dependencia del factor de potencia que le corresponde a cada equipo o dispositivo en específico. Ese número responde al valor de la función trigonométrica "coseno", equivalente a los grados del ángulo que se forma entre las potencias (P) y (S).

Si el número que se obtiene como resultado de la operación matemática es un decimal menor que 1 (como por ejemplo 0,95), dicho número representará el factor de potencia correspondiente al desfase en grados existente entre la intensidad de la corriente eléctrica y la tensión en el circuito de corriente alterna.

Lo ideal sería que el resultado fuera siempre igual a 1, pues así habría una mejor optimización y aprovechamiento del consumo de energía eléctrica, o sea, habría menos pérdida de energía no aprovechada y una mayor eficiencia de trabajo en los generadores que producen esa energía.

En los circuitos de resistencia activa, el factor de potencia siempre es 1, porque como ya antes se vio, en ese caso no existe desfase entre la intensidad de la corriente y la tensión.

Pero en los circuitos inductivos, como ocurre con los motores, transformadores de tensión y la mayoría de los dispositivos o aparatos que trabajan con algún tipo de enrollado o bobina, el valor del factor de potencia se muestra con una fracción decimal menor que 1 (como por ejemplo 0,8), lo que indica el retraso o desfase que produce la carga inductiva en la senoide correspondiente a la intensidad de la corriente con respecto a la senoide de la tensión.

1.2 EL CAPACITOR

Los capacitores son equipos capaces de acumular electricidad; están constituidos básicamente por dos placas conductoras colocadas frontalmente en paralelo y separadas por un medio cualquiera aislante, que puede ser aire, papel, plástico, etc. En las caras externas de estas placas se conecta una fuente de tensión que genera un campo electrostático en el espacio comprendido entre las dos placas, como se muestra en la figura 13. El generador G podría ser una batería o un generador cualquiera de corriente continua o de corriente alterna, las placas paralelas se denominan electrodos, las líneas de flujo entre las placas paralelas son imaginarias, el material aislante colocado entre las placas paralelas se denomina dieléctrico, la energía electrostática queda acumulada entre las placas y en menor intensidad en su vecindad.

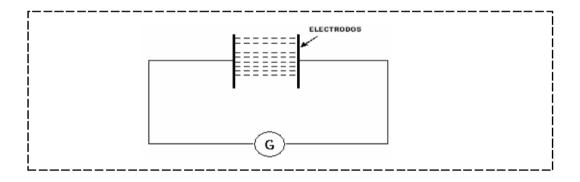


Figura 12 Campo electroestático entre las dos placas del capacitor.

Fuente: Ver¹⁵

El coulomb es una cantidad de carga eléctrica que puede ser almacenada o descargada

en forma de corriente eléctrica durante un cierto periodo de tiempo tomado como unidad. Para

mejor comprensión se puede considerar el caso de una batería de automóvil de 54Ah que puede

descargar toda la energía a razón de 1A en un tiempo de 54 horas, o bien 54A en un tiempo de

¹⁵LEYDEN, Boletín técnico (2008). El Factor de Potencia y su Compensación en Instalaciones de Baja Tensión.

1h. Un coulomb es por lo tanto el flujo de carga o descarga de una corriente de 1A en un tiempo de 1 seg., esto quiere decir que durante un tiempo de 1 seg, 6.25 x 1018 electrones son transportados de una placa a otra cuando la carga o descarga del capacitor es de 1.6 x 10-19 (C). Es bueno saber que la carga eléctrica de un electrón es de 1.6 x 10-19 C.

Si una determinada tensión V (volts) se aplica entre las placas paralelas separadas por una distancia de d (m), la intensidad del campo eléctrico se puede calcular por medio de la ecuación 8.

E=V/D (8)

Dónde: E = Intensidad del campo eléctrico (V/m).

V = Tensión (V).

d = Distancia (m).

La unidad que mide la capacidad de carga C de un capacitor es el Farad, de modo que 1 Farad es la capacidad de carga eléctrica de un capacitor cuando una carga eléctrica de 1 coulomb (6.25x1018 electrones) está almacenada en el medio eléctrico bajo una tensión aplicada de 1 v entre las terminales de placas paralelas. Los capacitores son evaluados por la cantidad de carga eléctrica que es capaz de almacenar en su campo y está dada por la ecuación 9.

$$C = \frac{Q}{V} \tag{9}$$

Dónde: C = Capacidad del capacitor (F).

V = Tensión aplicada (V).

Energía Almacenada

Cuando los electrodos de un capacitor son sometidos a una tensión entre sus terminales, circula en su interior una corriente de carga, lo que hace que una determinada cantidad de energía se acumule en su campo eléctrico. La energía media almacenada en el capacitor se puede obtener con la ecuación:

$$E = \frac{1}{2} \times C \times V_m^2$$
 (10)

Donde:

E = Energía almacenada (J).

C = Capacidad del capacitor (F).

Vm = Tensión aplicada en valor pico (V).

1.3 ASPECTOS A CONSIDERAR PARA INSTALAR BANCOS DE CAPACITORES.

Este capítulo abordara toda la información referente a los bancos de capacitores tanto sus partes principales, esquemas de conexión selección de la conexión del banco y algunos factores que afectan a dichos bancos los cuales son el efecto de resonancia y las componentes armónicas.

1.3.1 PARTES PRINCIPALES DE UN CAPACITOR DE POTENCIA

Las partes principales de un capacitor de potencia, son las que se mencionan a continuación: Caja o carcasa:

Esta caja o carcaza tiene la función de contener la parte activa del capacitor, está construida de placa de acero con un espesor adecuado al volumen del capacitor, la caja contiene las siguientes partes: a) Placa de características. En esta placa deben estar contenidos todos los datos característicos para la identificación del capacitor, como son: su potencia nominal en kVAr, la tensión nominal de operación, su capacitancia, la frecuencia a que opera, su peso o masa, el nivel básico de aislamiento, la fecha de fabricación, etc. b) Los aisladores. Corresponden a las terminales externas de las unidades capacitivas. c) Ganchos en ojales para levantamiento. Son usados para levantar la unidad capacitiva d) Soportes para fijación. Se utilizan para fijar la unidad capacitiva en su estructura de montaje. Armadura: Está constituida por hojas de aluminio enrolladas con el dieléctrico.

Actualmente existen dos tipos básicos de capacitores en cuanto a su medio dieléctrico:

- a) Capacitores del tipo autor generable. Son aquellos cuyo dieléctrico está formado por una fina capa de película de polipropileno esencial, asociada muchas veces, una capa m de espesor.
 Es necesarioµde papel dieléctrico (papel Kraft) con alrededor de 18 que los componentes dieléctricos estén constituidos de material seleccionado y de alta calidad, para no influenciar negativamente las pérdidas dieléctricas.
- b) Capacitores de tipo impregnado. Están constituidos por una sustancia impregnante que se trata a continuación:

Líquido de impregnación. Los fabricantes de capacitores usan normalmente una sustancia biodegradable con una estructura molecular constituida por carbono e hidrógeno (hidrocarbonato aromático sintético) que no es agresivo con el medio ambiente.

Resistor de descarga. Cuando se retira la tensión de las terminales de un capacitor, la carga eléctrica almacenada necesita ser dañada para que la tensión resultante sea eliminada, evitándose de esta manera situaciones peligrosas de contacto con las referidas terminales.

Para que esto sea posible, se inserta entre las terminales un resistor, con la finalidad de transformar en pérdidas Joule la energía almacenada en el dieléctrico, reduciendo a 75V el nivel de tensión en un tiempo menor a 10 minutos para capacitores en media tensión; y menor que 3 minutos para capacitores de baja tensión. Este dispositivo de descarga se puede instalar en forma interna o externa al capacitor, siendo más común la primera solución, como se muestra en la figura 14 a) y 14 b).

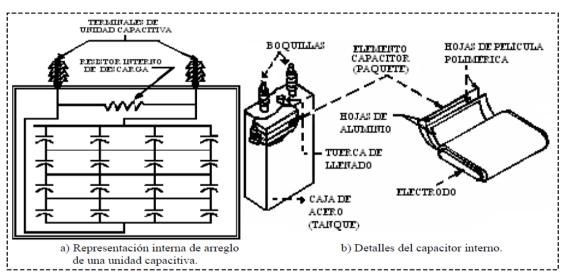


Figura 13 Arreglo de una unidad capacitiva y detalles del capacitor interno.

Fuente:Ver16

32

¹⁶LEYDEN, Boletín técnico (2008). El Factor de Potencia y su Compensación en Instalaciones de Baja Tensión.

1.3.2 CONEXIÓN DE LOS BANCOS DE CAPACITORES

Los capacitores instalados, se pueden conectar en cualquiera de las conexiones trifásicas clásicas que son: Estrella sólidamente aterrizada, estrella con neutro flotante y delta.

1.3.3 CONEXIÓN ESTRELLA A TIERRA CON NEUTRO SÓLIDAMENTE CONECTADO A TIERRA.

En esta conexión, el voltaje de las unidades capacitivas debe ser igual o mayor que el voltaje de fase a neutro del sistema al cual se van a conectar. Normalmente esta conexión se usa en sistemas de distribución, en rangos de tensiones hasta 34.5 kV. La capacidad del banco en kVAr se selecciona de manera que proporcione la potencia reactiva deseada en el sistema.

Cada fase en este tipo de conexión está formada por grupos de unidades capacitivas conectadas en serie paralelo para dar el valor de potencia deseado tal como se muestra en la figura 15 a), en este tipo de arreglos generalmente se adopta una protección por fusibles para cada unidad capacitiva, sin embargo existe también la posibilidad de proteger a las unidades capacitivas por grupo, esta opción se usa generalmente en sistemas de distribución con compensación de baja capacidad, esto se muestra en la figura 15 b).

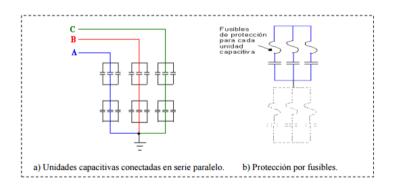


Figura 14 Conexión estrella a tierra con neutro sólidamente conectado a tierra.

Fuente: Ver17

33

¹⁷LEYDEN, Boletín técnico (2008). El Factor de Potencia y su Compensación en Instalaciones de Baja Tensión.

La conexión estrella con neutro sólidamente aterrizado, tiene la ventaja de permitir un balanceo de fases más fácil que en otras conexiones, sin embargo en estos arreglos, se presenta el problema de que la falla en una unidad capacitiva presenta una sobretensión en el resto de las unidades del arreglo, sometiéndolas a mayores esfuerzos dieléctricos.

1.3.4 CONEXIÓN ESTRELLA CON NEUTRO FLOTANTE.

Este tipo de conexión se usa es sistemas de media tensión o mayores, presenta la ventaja de evitar en forma importante la presencia de transitorios de sobretensión y permite también una mejor protección contra sobrecorriente; en cambio, tiene el problema de desbalance de voltaje, que hace que aparezcan tensiones al neutro, por lo que es necesario incorporar una protección contra sobretensiones al neutro. En la figura 16, se muestra la protección para este tipo de arreglo.

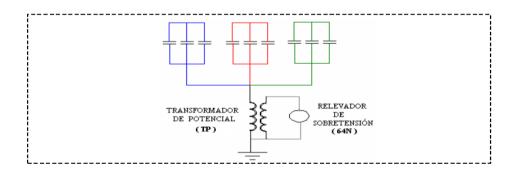


Figura 15 Conexión estrella con neutro flotante con protección en el neutro.

Fuente: Ver¹⁸

1.3.5 CONEXIÓN DELTA.

-

¹⁸LEYDEN, Boletín técnico (2008). El Factor de Potencia y su Compensación en Instalaciones de Baja Tensión.

En esta conexión se usa generalmente en baja tensión (600 Volts o menos) en motores eléctricos ó cargas de valor similar, tiene la ventaja sobre las conexiones en estrella de que no presenta problemas de desbalance y también aísla las corrientes armónicas.

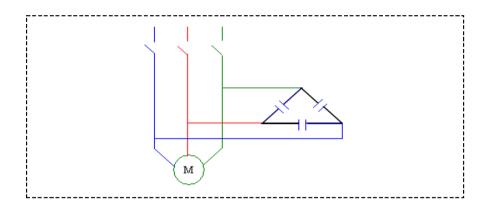


Figura 16 Conexión delta para motores en baja tensión

1.3.6 ESTANDARES DE SELECCIÓN DE LOS CAPACITORES

Para realizar la selección de un banco de capacitores se deben elegir los capacitores en los rangos existentes normalizados. En las tablas 1 y 2 se presentan una lista de los valores de los bancos de capacitores más comunes existentes en el mercado de acuerdo a su tensión, cabe resaltar que en relación a las tensiones y tamaños de los capacitores, las diferentes fábricas producen equipos para tensiones normalizados más utilizados por las empresas de electricidad, aunque también los fabrican para tensiones y tamaños especiales bajo especificación del cliente.

Sin embargo, los tamaños existentes en el mercado son muy numerosos y generalmente se fabrican tanto condensadores monofásicos como trifásico en incrementos de 5 kVAr hasta 50 kVAr, de 10 kVAr hasta 100 kVAr y en saldos de 50 kVAr hasta 300 kVAr. Tamaños mayores requieren pedidos especiales, en todo caso es importante destacar que la frecuencia de operación de los condensadores debe ser 60 Hz.

Tabla I. Valores para bancos de capacitores monofásicos de baja tensión.

Tensión de línea (V)	Potencia (kVAr)		Capacitancia nominal (µF)		e nominal A)	Fusible NH ó Dz (A)	Conductor de conexión mm²		
\	50 Hz	60 Hz	\ /	50 Hz	60 Hz	/			
	2.1	2.5	137.0	9.5	11.4	20.0	2.5		
	2.5	3.0	165.0	11.4	13.6	25.0	2.5		
	4.2	5.0	274.0	19.1	22.7	32.0	6.0		
	5.0	6.0	329.0	22.7	27.3	50.0	10.0		
220	6.3	7.5	411.0	28.6	34.1	63.0	10.0		
	8.3	10.0	548.0	37.7	45.5	80.0	16.0		
	10.0	12.0	657.0	45.5	54.5	100.0	25.0		
	12.5	15.0	822.0	56.8	68.2	125.0	35.0		
	16.6	20.0	1096.0	75.5	90.1	160.0	70.0		
	2.1	2.5	46.0	5.5	6.6	10.0	2.5		
	2.5	3.0	55.0	6.6	7.9	16.0	2.5		
	4.2	5.0	92.0	11.1	13.2	25.0	2.5		
	5.0	6.0	110.0	13.2	15.8	32.0	4.0		
	6.3	10.0	184.0	21.8	26.3	50.0	10.0		
380	8.3	12.0	220.0	26.3	31.6	50.0	10.0		
300	10.0	15.0	276.0	32.9	39.5	63.0	16.0		
	12.5	18.0	330.0	39.5	47.4	80.0	25.0		
	16.6	20.0	367.0	43.7	52.6	100.0	25.0		
	20.0	24.0	440.0	52.6	63.2	100.0	35.0		
	20.8	25.0	460.0	54.7	65.8	125.0	35.0		
	25.0	30.0	551.0	65.8	78.9	160.0	50.0		
	4.2	5.0	68.0	9.5	11.4	20.0	2.5		
	5.0	6.0	82.0	11.4	13.6	25.0	2.5		
	8.3	10.0	137.0	18.9	22.7	32.0	6.0		
	10.0	12.0	164.0	22.7	27.3	50.0	10.0		
440	12.5	15.0	206.0	28.4	34.1	63.0	10.0		
	16.6	20.0	274.0	37.7	45.5	80.0	16.0		
		25.0		47.3	56.8	100.0	25.0		
	20.8	30.0	343.0 411.0	56.8	68.2	125.0	35.0		
	4.2	5.0	58.0	8.7	10.4	20.0	2.5		
	5.0	6.0	69.0	10.4	12.5	20.0	2.5		
	8.3	10.0	115.0	17.3	20.8	32.0	6.0		
480	10.0	12.0	138.0	20.8	25.0	50.0	6.0		
100	12.5	15.0	173.0	26.0	31.3	50.0	10.0		
	16.6	20.0	230.0	34.6	41.7	80.0	16.0		
	20.8	25.0	288.0	43.3	52.1	100.0	25.0		
	25.0	30.0	345.0	52.1	62.5	100.0	36.0		

Fuente: Ver¹⁹

¹⁹ Constructor eléctrico, (2013). Cargas en una instalación eléctrica. Obtenido de https://constructorelectrico.com/cargas-en-una-instalacion-electrica/

Tabla II. Valores para bancos de capacitores trifásicos en baja tensión

Tensión de línea (V)	Potencia	a (kVAr)	Capacitancia nominal (μF)		e nominal A)	Fusible NH ó Dz (A)	Conductor de conexión mm²		
	50 Hz	60 Hz		50 Hz	60 Hz				
	2.1	2.5	137.01	5.5	6.6	10.0	2.5		
	4.2	5.0	274.03	10.9	13.1	25.0	2.5		
	6.3	7.5	411.04	16.4	19.7	32.0	6.0		
	8.3	10.0	548.05	21.8	26.2	50.0	10.0		
220	10.4	12.5	685.07	27.3	32.8	63.0	16.0		
	12.5	15.0	822.08	32.8	39.4	63.0	16.0		
	14.6	17.5	959.09	38.2	45.9	80.0	25.0		
	16.6	20.0	1096.12	43.7	52.5	100.0	25.0		
	18.7	22.5	1233.12	49.1	59.0	100.0	35.0 35.0		
	20.8	25.0	1370.14	54.6	65.6	125.0	35.0		
	2.1	2.5	45.92	3.2	3.8	10.0	2.5		
	4.2	5.0	91.85	6.3	7.6	16.0	2.5		
	6.3	7.5	137.77	9.5	11.4	20.0	2.5		
	8.3	10.0	183.7	12.7	15.2	25.0	4.0		
	10.4	12.5	229.62	15.8	19.0	32.0	6.0		
	12.5	15.0	275.55	19.6	22.8	32.0	6.0		
	14.6	17.5	321.47	22.2	26.6	50.0	10.0		
380	16.6	20.0	367.39	25.3	30.4	50.0	10.0		
	18.7	22.5	413.32	28.5	34.2	63.0	16.0		
	20.8	25.0	458.24	31.7	38.0	63.0	16.0		
	25.0	30.0	551.09	38.0	45.6	80.0	25.0		
	29.2	35.0	642.94	44.3	53.2	100.0	25.0		
	33.3	40.0	734.79	50.6	60.8	100.0	35.0		
	37.5	45.0	826.64	57.0	68.4	125.0	50.0		
	41.6	50.0	918.48	63.3	76.0	125.0	50.0		
	2.1	2.5	34.25	2.7	3.3	6.0	2.5		
	4.2	5.0	68.51	5.5	6.6	10.0	2.5		
	6.3	7.5	102.76	8.2	9.8	16.0	2.5		
440	8.3	10.0	137.01	10.9	13.1	25.0	2.5		
****	10.4	12.5	171.26	11.7	16.4	32.0	4.0		
	12.5	15.0	205.52	16.4	19.7	32.0	6.0		
	14.6	17.5	239.77	19.2	23.0	50.0	6.0		
	16.6	20.0	274.003	21.8	26.2	50.0	10.0		
	18.7	22.5	308.28	24.6	29.5	50.0	10.0		
	20.8	25.0	342.53	27.3	32.8	63.0	16.0		
	25.0	30.0	411.04	32.8	39.4	63.0	16.0		
	29.2 33.3	35.0 40.0	479.54 548.05	38.2 41.7	45.9 52.5	80.0 100.0	25.0 25.0		
	37.5	45.0	616.56	41.7	59.0	100.0	35.0		
	41.6	50.0	685.07	54.6	65.6	125.0	35.0		
	4.2	5.0	57.56	5.1	6.0	10.0	2.5		
	8.3	10.0	115.13	10.0	12.0	20.0	2.5		
	12.5	15.0	172.69	15.0	18.0	32.0	4.0		
	16.6	20.0	230.26	20.1	24.1	50.0	6.0		
480	20.8	25.0	287.82	25.1	30.1	50.0	10.0		
	25.0	30.0	346.39	30.1	36.1	63.0	16.0		
	29.2	35.0	402.95	35.1	42.1	80.0	16.0		
	33.3	40.0	460.52	40.1	48.1	80.0	25.0		
	37.5	45.0	518.08	45.1	54.1	100.0	25.0		
	41.6	50.0	575.65	50.1	60.1	100.0	35.0		

Fuente: Ver²⁰

²⁰Constructor eléctrico, (2013). Cargas en una instalación eléctrica. Obtenido de https://constructorelectrico.com/cargas-en-una-instalacion-electrica/

En la tabla 3, se presentan las capacidades en potencia reactiva para capacitores monofásicos en tensiones medias, de acuerdo a su tensión de operación.

Tabla III. Capacidades en kVAr para capacitores monofásicos en media tensión.

Capacidades en kVAr para capacitores monofásicos en media tensión									
Tensión	kVAr								
2400	50								
2770	100								
4160	150								
4800	200								
6640	250								
7200	300								
7620	350								
8320	400								
9540	450								
9960	500								
11400									
12470									
13280									
13800									
14400									
15125									
19920									
20800									
21600									
22130									
22800									
23800									
24940									

De acuerdo con el tipo de conexión y con los valores conocidos para las unidades capacitivas, los fabricantes de capacitores recomiendan la formación de grupos de serie, de acuerdo a la tabla 4.

Tabla IV. Mínimo número de unidades recomendadas en paralelo por grupo serie para limitar la tensión a un máximo del 10% sobre la nominal, cuando falla una unidad.

Númerode grupos en		ella con neutro ante	Conexión delta o estrella aterrizada			
serie	Mínimo número de unidades por grupo	Mínimo número de unidades por banco trifásico	Mínimo número de unidades por grupo	Mínimo número de unidades por banco trifásico		
1	4	12	1	3		
2	8	48	6	36		
3	9	81	8	72		
4	9	108	9	108		
5	10	150	9	135		
6	10	180	9	162		
7	10	10 210		210		
8	10	240	10	240		
9	11	297	11	297		
10	11	330	11	330		
11	11	303	11	363 396		
12	11	396	11			
13	11	429	11	429		
14	11	462	11	462		
15	11	495	11	495		

Fuente: Ver²¹

²¹Constructor eléctrico, (2013). Cargas en una instalación eléctrica. Obtenido de https://constructorelectrico.com/cargas-en-una-instalacion-

1.4 MÉTODOS DE COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA

En la operación de los sistemas eléctricos de potencia de alta tensión se presentan, de vez en cuando, situaciones tales como una demanda anormal de reactivos, esto es, que dicha demanda sobrepasa la aportación que de ellos hacen algunos elementos de la red, obligando a los generadores a bajar su factor de potencia para suministrar los reactivos complementarios. El objetivo de la compensación reactiva es que la potencia aparente sea lo más parecida posible a la potencia activa.

El costo de generar, transmitir y transformar los reactivos, en el camino a su consumo, invita a realizar algunas consideraciones con respecto a los elementos que consumen estos reactivos, imponiendo la necesidad de localizar, operar y proyectar los equipos compensadores, de tal forma que estos no alteren el funcionamiento normal del sistema al cual se conecta. Los mecanismos de compensación más empleados son:

1.4.1 COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA MEDIANTE MÁQUINAS SINCRÓNICAS.

Las máquinas sincrónicas pueden funcionar como aportadores de potencia reactiva funcionando en vacío, siendo en este caso conocidos como capacitores sincrónicos. La generación de potencia reactiva depende de la excitación, necesitando ser sobreexcitados para poder satisfacer sus propias necesidades de energía reactiva y entregar a su vez energía reactiva al sistema, es decir un motor síncrono diseñado para trabajar en vacío y con un amplio rango de regulación, estas máquinas síncronas son susceptibles de trabajar con potencia reactiva inductiva o capacitiva según el grado de excitación del campo. Si están sobre excitadas se comportan como condensadores. Por el contrario si están sub-excitadas se comportan como inductancias.

La potencia de un condensador sincrónico en condiciones de sobre-excitación esta limitada por la temperatura, en condiciones de sub-excitación, la potencia queda limitada por la estabilidad de la máquina. Este tipo de compensación no es muy utilizada, se utiliza sólo en el caso de que existan en la instalación motores sincrónicos de gran potencia (mayores a 200 HP) que funcionan por largos períodos de tiempo.

1.4.2 COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA MEDIANTE CEV'S.

Un compensador estático de VAr (CEV'S), se emplea para compensar potencia reactiva usando un control de la magnitud de tensión en un bus particular de un sistema eléctrico de potencia. Estos dispositivos comprenden el banco de capacitores fijo o conmutado (controlado) o un banco fijo y un banco de reactores conmutados en paralelo, se emplean principalmente en alta tensión debido a la conmutación para controlar la compensación.

1.4.3 COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA MEDIANTE BANCOS DE CAPACITORES

Este método es el que se utiliza en la actualidad en la mayoría de las instalaciones industriales dado que es más económico y permite una mayor flexibilidad. Se pueden fabricar en configuraciones distintas. Sin embargo son muy sensibles a las armónicas presentes en la red, los bancos de capacitores elevan el factor de potencia, con lo cual aumenta la potencia transmitida por la línea porque no necesita conducir la potencia reactiva.

1.5 CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

La finalidad de corregir el factor de potencia es reducir o aún eliminar el costo de energía reactiva en la factura de electricidad.

1.5.1 FACTOR DE POTENCIA

Es la relación de la potencia activa P con la potencia aparente S, es decir la proporción de potencia que se transforma en trabajo útil (P) de la potencia total (S) requerida por la carga. Bajo condiciones de tensiones y corrientes senoidales el factor de potencia es igual al Cos (φ), tal y como se mostró en el análisis del Triángulo de Potencia, de la cual se obtuvo la ecuación 6.

En un circuito trifásico equilibrado la potencia activa (P), reactiva (Q) y aparente (S) se expresan como:

$$P = 3 \text{ VI } Cos \varphi \tag{11}$$

$$Q=3 \text{ VISen} \varphi$$
 (12)

$$S=3VI=\sqrt{P^2+Q^2} \tag{13}$$

A continuación en la figura 17 se presenta el diagrama vectorial de potencias, para una carga inductiva:

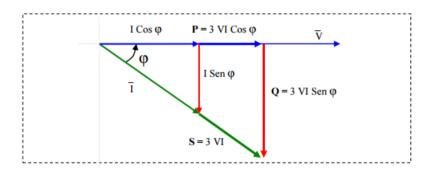


Figura 17 Triángulo de potencia en un circuito trifásico

Donde:

V = Tensión fase-neutro (V).

I = Corriente de fase (A).

En este diagrama vectorial se puede apreciar que, para una potencia activa (P) dada, la corriente (I) y la potencia aparente (S) son mínimas cuando el ángulo de desfase es igual a 0° (ϕ = 0°) ó lo que es equivalente cuando el cos ϕ =1. A continuación se presenta en la tabla 5 los valores aproximados del factor de potencia para las cargas más comunes:

Tabla V. Valores aproximados del factor de potencia para las cargas más comunes.

Aparato	Carga	Cos ø			
	0%	0,17			
	25%	0,55			
Motor asíncrono	50%	0,73			
	75%	0,8			
	100%	0,85			
Lámparas incandescentes		1			
Lámparas fluorescentes		0,5			
Lámparas de descarga		0,4 a 0,6			
Homos de resistencia		1			
Homos de inducción		0,85			
Máquinas de soldar por resistencia		0,8 a 0,9			
Soldadora de arco monofásica		0,5			
Soldadora de arco con transformador-rectificador		0,7 a 0,9			
Homos de arco		0,8			

Fuente: Ver 22

1.5.2 PLANTEAMIENTO ANALÍTICO PARA LA CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA.

La aplicación de los bancos de capacitores en las instalaciones industriales y en las redes de distribución, es la corrección del factor de potencia, esto se hace por dos razones fundamentalmente:

 a) Para estar dentro de los límites mínimos fijados por las compañías suministradoras y evitar penalización por bajo factor de potencia.

²²Constructor eléctrico, (2013). Cargas en una instalación eléctrica. Obtenido de https://constructorelectrico.com/cargas-en-una-instalacion-electrica/

- b) Cuando el Cos φ es mayor que el especificado por la compañía suministradora (0.9), entonces se penaliza, es decir, se impone una sanción económica o cargo por bajo factor de potencia en el recibo de consumo de energía.
- c) Para mejorar las condiciones operativas (voltajes y pérdidas) y tener una mejor economía de operación.

Considerando la figura 18, si el valor mínimo especificado es cos φ2, entonces es necesario pasar de cos φ1 a cos φ2, mantenido el suministro de la carga constante, por lo tanto para pasar del valor actual de consumos de potencia reactiva Q1, al valor deseado, para obtener el ángulo φ2, es decir a Q2, se requiere restar a Q1 una cantidad Qc, que corresponde a la potencia reactiva del banco de capacitores.

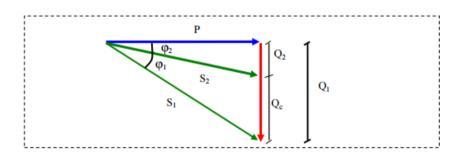


Figura 18 Corrección del Cos φ 1 a Cos φ 2, mantenido el suministro de la carga constante.

Fuente: ver 23

Para realizar el cálculo de QC se utiliza la ecuación 14, sin embargo se puede utilizar la ecuación 12 la cual se obtiene a través de la figura 18, donde en el primer caso el factor K se obtiene por medio de la tabla 6, donde se muestra el factor inicial el cual es el factor en el que

²³ Constructor eléctrico, (2013). Cargas en una instalación eléctrica. Obtenido de https://constructorelectrico.com/cargas-en-una-instalacionelectrica/

nuestro sistema está en operación y el factor de potencia deseado, para encontrar el valor del factor K se toma el valor en el cual estos dos factores se intersectan, dichas ecuaciones se muestran a continuación:

$$Q_C = P \times (Tan \varphi_1 - Tan \varphi_2)$$
 (14)

$$Q_C = P X Factor K$$
 (15)

Tabla VI. Factor de tabla para el cálculo de la potencia del banco de capacitores.

Factor	Factor K														
de]	Factor d	le poten	cia dese	ado					
potencia															
inicial	0.86	0.87	0.88	0.89	0.9	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	1
0.66	0.545	0.572	0.599	0.626	0.654	0.683	0.712	0.743	0.775	0.81	0.847	0.888	0.935	0.996	1.138
0.67	0.515	0.541	0.568	0.596	0.624	0.652	0.682	0.713	0.745	0.779	0.816	0.857	0.905	0.966	1.108
0.68	0.485	0.512	0.539	0.566	0.594	0.623	0.652	0.683	0.715	0.75	0.787	0.828	0.875	0.936	1.078
0.69	0.456	0.482	0.509	0.537	0.565	0.593	0.623	0.654	0.686	0.72	0.757	0.798	0.846	0.907	1.049
0.7	0.427	0.453	0.48	0.508	0.536	0.565	0.594	0.625	0.657	0.692	0.729	0.77	0.817	0.878	1.02
0.71	0.398	0.425	0.452	0.48	0.508	0.536	0.566	0.597	0.629	0.663	0.7	0.741	0.789	0.849	0.992
0.72	0.37	0.397	0.424	0.452	0.48	0.508	0.538	0.569	0.601	0.635	0.672	0.713	0.761	0.821	0.964
0.73	0.343	0.37	0.396	0.424	0.452	0.481	0.51	0.541	0.573	0.608	0.645	0.686	0.733	0.794	0.936
0.74	0.316	0.342	0.369	0.397	0.425	0.453	0.483	0.514	0.546	0.58	0.617	0.658	0.706	0.766	0.909
0.75	0.289	0.315	0.342	0.37	0.398	0.426	0.456	0.487	0.519	0.553	0.59	0.631	0.679	0.739	0.882
0.76	0.262	0.288	0.315	0.343	0.371	0.4	0.429	0.46	0.492	0.526	0.563	0.605	0.652	0.713	0.855
0.77	0.235	0.262	0.289	0.316	0.344	0.373	0.403	0.433	0.466	0.5	0.537	0.578	0.626	0.686	0.829
0.78	0.209	0.236	0.263	0.29	0.318	0.347	0.376	0.407	0.439	0.474	0.511	0.552	0.599	0.66	0.802
0.79	0.183	0.209	0.236	0.264	0.292	0.32	0.35	0.381	0.413	0.447	0.484	0.525	0.573	0.634	0.776
0.8	0.157	0.183	0.21	0.238	0.266	0.294	0.324	0.355	0.387	0.421	0.458	0.499	0.547	0.608	0.75
0.81	0.131	0.157	0.184	0.212	0.24	0.268	0.298	0.329	0.361	0.395	0.432	0.473	0.521	0.581	0.724
0.82	0.105	0.131	0.158	0.186	0.214	0.242	0.272	0.303	0.335	0.369	0.406	0.447	0.495	0.556	0.698
0.83	0.079	0.105	0.132	0.16	0.188	0.216	0.246	0.277	0.309	0.343	0.38	0.421	0.469	0.53	0.672
0.84	0.053	0.079	0.106	0.134	0.162	0.19	0.22	0.251	0.283	0.317	0.354	0.395	0.443	0.503	0.646
0.85	0.026	0.053	0.08	0.107	0.135	0.164	0.194	0.225	0.257	0.291	0.328	0.369	0.417	0.477	0.62
0.86		0.027	0.054	0.081	0.109	0.138	0.167	0.198	0.23	0.265	0.302	0.343	0.39	0.451	0.593
0.87			0.027	0.054	0.082	0.111	0.141	0.172	0.204	0.238	0.275	0.316	0.364	0.424	0.567
0.88				0.027	0.055	0.084	0.114	0.145	0.177	0.211	0.248	0.289	0.337	0.397	0.54
0.89					0.028	0.057	0.086	0.117	0.149	0.184	0.221	0.262	0.309	0.37	0.512
0.9						0.029	0.058	0.089	0.121	0.156	0.193	0.234	0.281	0.342	0.484
0.91							0.03	0.06	0.093	0.127	0.164	0.205	0.253	0.313	0.456
0.92								0.031	0.063	0.097	0.134	0.175	0.223	0.284	0.426
0.93									0.032	0.067	0.104	0.145	0.192	0.253	0.395
0.94										0.034	0.071	0.112	0.16	0.22	0.363
0.95											0.037	0.078	0.126	0.186	0.329
0.96												0.041	0.089	0.149	0.292
0.97													0.048	0.108	0.251
0.98														0.061	0.203
0.99															0.142

Fuente: Ver²⁴

En la figura 19, se puede observar el cambio que existe en las potencias activa y reactiva cuando el factor de potencia varia de 0.6 hasta la unidad, manteniendo la potencia aparente de la carga constante.

²⁴Constructor eléctrico, (2013). Cargas en una instalación eléctrica. Obtenido de https://constructorelectrico.com/cargas-en-una-instalacion-

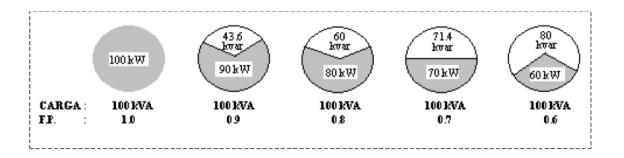


Figura 19 Cambio de potencia activa y reactiva con factor de potencia, mantenido la potencia aparente de la carga constante.

1.6 COMPONENTES ARMÓNICAS.

Las corrientes armónicas son aquellas que se manifiestan dentro de los sistemas eléctricos a una frecuencia múltiplo de la fundamental 60 Hz , por ejemplo, la 3a. [180 Hz], 5a [300 Hz], 7a. armónica [420 Hz], etc.

La distorsión de la onda senoidal fundamental, generalmente ocurre en múltiplos de la frecuencia fundamental. Así sobre un sistema de potencia de 60 Hz, la onda armónica tiene una frecuencia expresada por la ecuación 16.

farmónicas= n x 60 Hz (16)

Donde: n = 1, 2, 3, 4....,etc.

La figura 21. Ilustrala onda sinodal a la frecuencia fundamental (60 Hz) y su 2do, 3ro, 4to, y 5to armónico.

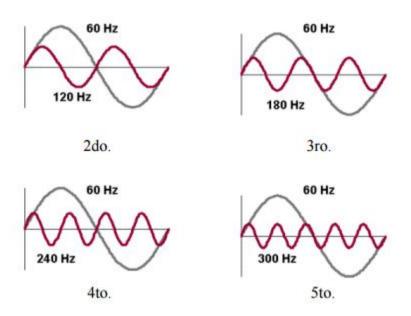


Figura 20 La onda sinusoidal a la frecuencia fundamental (60 Hz) y armónicos: 2do (120 Hz); 3ro (180 Hz); 4to (240 Hz); y 5to (300 Hz).

Fuente: Ver²⁵

La Figura 21, muestra como una onda deformada puede ser descompuesta en sus componentes armónicas. La onda deformada se compone de la fundamental combinada con las componentes armónicas de 3er y 5to orden.

²⁵ Glover Dunkan, Sarman Mulukutla, (2008). Sistemas de Potencia Análisis y Diseño. J. Dunkan Glover, Mulukutla S. Sarman. Sistemas de Potencia Análisis y Diseño, 2008

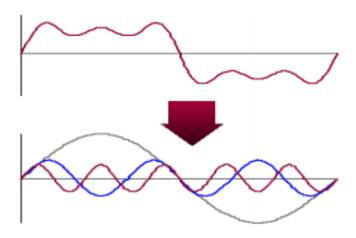


Figura 21 La onda deformada compuesta por la superposición de una fundamental a 60 Hz y armónicas menores de tercer y quinto orden.

Fuente: Ver²⁶

Las corrientes armónicas son producidas por todas la cargas que tengan una fuente de rectificación produce una distorsión de la onda fundamental de 60 Hz. Estas cargas son llamadas No-lineales y se relacionan con cualquier tipo de carga electrónica, tales como balastros electrónicos, arrancadores estáticos, PC's, entre otras.

Las armónicas pueden ocasionar disturbios en la red de distribución de energía eléctrica y causar calentamiento en cables, en los devanados de los motores y transformadores, el disparo repentino de interruptores, el sobrecalentamiento (y posible explosión) de capacitores, y también el mal funcionamiento de equipos de control y medición en general.

En particular, al incorporar un banco de capacitores en una instalación con equipos productores de armónicas, se debe tener en cuenta que aunque los capacitores son cargas

²⁶ Glover Dunkan, Sarman Mulukutla, (2008). Sistemas de Potencia Análisis y Diseño.

J. Dunkan Glover, Mulukutla S. Sarman. Sistemas de Potencia Análisis y Diseño, 2008

lineales, y por lo tanto no crean armónicas por si mismos, pueden contribuir a producir una amplificación importante de las armónicas existentes al entrar en combinación con las mismas.

Al respecto hay que considerar que la impedancia de un capacitor se reduce cuando crece la frecuencia, presentando así un camino de baja impedancia para las corrientes de las armónicas superiores. Por su parte, los capacitores de corrección del factor de potencia forman un circuito paralelo con la inductancia de la red de distribución y con la del transformador. Así las corrientes armónicas generadas por los elementos no lineales se dividen entre las dos ramas de este circuito paralelo, dependiendo de la impedancia presentada por el circuito para cada armónico.

Esto puede provocar una sobre corriente muy perjudicial para el capacitor. En el peor de los casos, cuando la frecuencia de alguna corriente armónica coincide, o está próxima, con la frecuencia de resonancia del circuito paralelo, la corriente que circula por cada rama del banco puede llegar a ser tan grande que los capacitores se degraden aceleradamente, o eventualmente exploten. Asimismo, estas corrientes armónicas también producen sobretensiones que se suman a la tensión total aplicada al capacitor y pueden dañar al dieléctrico del mismo.

Al energizar un banco de capacitores esta toma corrientes transitorias, cuya magnitud puede llegar a alcanzar valores elevados en el momento de cerrar el circuito. Un banco de capacitores descargado, hace bajar momentáneamente a cero la tensión de la línea en el lugar de su instalación, y para el sistema esto representa un corto circuito aparente. Si los capacitores se encontraban cargados antes de conectarse a la línea y si la polaridad de tensión era distinta a la de la línea en el momento de la conexión, se producen corrientes todavía más altas.

Existen dos razones que se deben considerar cuando se instalen capacitores para corregir el factor de potencia. La primera razón, es como ya se había mencionado anteriormente es que los capacitores son por naturaleza un camino de baja impedancia para las corrientes armónicas, esto es, absorben la energía a las altas frecuencias. Este aumento en las corrientes, incrementa la temperatura del capacitor y por consiguiente reduce su vida útil. La segunda razón, y potencialmente más peligrosos, es el efecto de resonancia.

Cuando los capacitores son conectados al sistema eléctrico, ellos forman un circuito de resonancia en paralelo junto con las inductancias del sistema (transformador). Si llegase a existir una corriente armónica cercana al punto de resonancia formado, entonces el efecto se magnifica. Este efecto amplificado, puede causar serios problemas tales como un exceso en la distorsión de tensión, disparos por sobretensiones en los controladores, niveles de aislamiento estresados de transformadores y conductores.

Se recomienda que para evitar que la distorsión armónica no afecte el funcionamiento adecuado de un capacitor, su corriente eficaz no debe sobrepasar un 115% de su valor a plena carga.

1.7 EFECTO DE RESONANCIA.

Las condiciones de resonancia causan sobre corrientes y sobretensiones. Hay dos posibilidades de condiciones de resonancia como se explica a continuación.

1.7.1 RESONANCIA SERIE.

La combinación de reactancias inductiva y capacitiva en serie forma un circuito resonante serie. El comportamiento de la impedancia de este circuito se ilustra en la figura 22. Se observa que a una frecuencia llamada frecuencia de resonancia, la impedancia se reduce a un valor mínimo el cual es muy bajo y de naturaleza resistiva. El circuito ofrece una impedancia muy baja a esta frecuencia lo cual causa un aumento en muchas veces de la corriente.

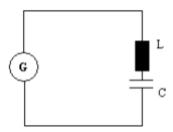


Figura 22 Circuito resonante serie.

Fuente: Ver²⁷

La resonancia serie ocurre en muchos casos, cuando las armónicas están presentes en lado primario del transformador. El transformador junto con los capacitores en el lado secundario de baja tensión actúan como un circuito resonante serie para el lado de alta tensión. Si la frecuencia de resonancia de la combinación L y C coincide con una frecuencia armónica existente puede sobrecargarse el equipo. Este circuito resonante serie provee un paso de baja impedancia a las armónicas en este caso. La cantidad de absorción dependerá de la posición relativa de la frecuencia de resonancia con respecto a la frecuencia de la armónica. Esta corriente armónica impone una carga adicional al transformador y especialmente a los capacitores. La tensión del lado de baja tensión del sistema se distorsiona como resultado de la resonancia.

²⁷LEYDEN, Boletín técnico (2008). El Factor de Potencia y su Compensación en Instalaciones de Baja Tensión.

1.7.2 RESONANCIA PARALELO.

Una combinación en paralelo de reactancia inductiva y una capacitiva forma un circuito resonante paralelo. El comportamiento de la impedancia de este circuito se muestra en la figura 23. A la frecuencia de resonancia la reactancia inductiva iguala a la capacitiva.

La impedancia resultante del circuito aumenta a valores muy altos a la frecuencia de resonancia. La excitación de un circuito resonante paralelo causa una tensión muy alta sobre las impedancias y corrientes.

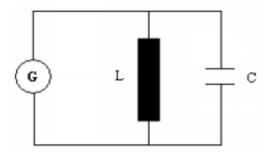


Figura 23 Circuito resonante paralelo..

Fuente: ver 28

Muchos de los sistemas de energía están equipados con capacitores para corrección del factor de potencia. La capacitancia forma un circuito resonante paralelo con las impedancias de la carga y del transformador. En consecuencia el generador de armónicas encuentra una aumentada reactancia de red. Consecuentemente la corriente armónica causa una tensión armónica aumentada comparada con la red no compensada (XL) la cual puede ser acompañada por distorsión de la fundamental.

_

²⁸LEYDEN, Boletín técnico (2008). El Factor de Potencia y su Compensación en Instalaciones de Baja Tensión.

Entre la red y el capacitor fluyen corrientes iguales que pueden llegar a sumar un múltiplo de la corriente armónica. Los transformadores y capacitores son cargados adicionalmente lo cual puede causar la sobrecarga de los mismos.

El punto de resonancia paralelo depende de la inductancia de la red y de la potencia capacitiva. Por lo tanto es posible ubicar el punto de resonancia de manera de asegurar la menor perturbación. En realidad la impedancia de la red no permanece constante todo el tiempo porque está determinada por la potencia de cortocircuito de la red y de las cargas conectadas a ellas. La potencia de cortocircuito de la red varía con el estado de conexión y el punto de resonancia paralelo se mueve con la configuración de la red. Por lo tanto el fenómeno puede ser más complicado cuando el equipo de corrección del factor de potencia varía por pasos.

En general, es evidente que la ocurrencia de resonancia serie o paralelo puede causar sobretensiones y sobre corrientes de niveles peligrosamente altos. Las armónicas que crean una posibilidad de resonancia no sólo sobrecargan los componentes del sistema sino también deterioran la calidad de energía en términos de distorsión y caídas de tensión.

El problema en los capacitores es debido a la resonancia que presentan con el sistema, esta frecuencia de resonancia muchas veces se encuentra cercana a la 5ª o 7ª armónica, las cuales son armónicas muy comunes en los sistemas eléctricos.

De esta manera la frecuencia de resonancia a la cual esta expuesta un banco de capacitores esta dado por la ecuación 17, la cual es:

$$f_{res} = \sqrt{\frac{\text{MVA}_{CC}}{\text{MVArs}_{CAP}}}$$
(17)

Donde:

MVACC = Es la potencia de corto circuito donde esta conectado el banco de capacitores.

MVArsCAP = Es la potencia del banco de capacitores.

La figura 25 muestra las corrientes a través de un banco de capacitores cuando están expuestos a las armónicas.

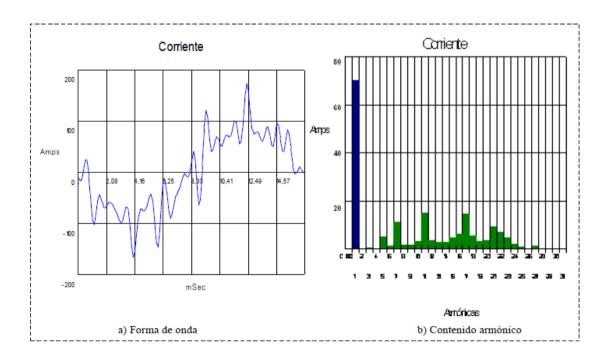


Figura 24 Corriente armónica en un banco de capacitores de 60 kVAr, 480 Volts.

Fuente: Ver²⁹

²⁹LEYDEN, Boletín técnico (2008). El Factor de Potencia y su Compensación en Instalaciones de Baja Tensión.

CAPITULO II

LA EMPRESA: SITUACIÓN DE LAS CARGAS Y DE LA DEMANDA EN LA EMPRESA MATERIAS PRIMAS, S.R.L

2.1 EMPRESA MATERIAS PRIMAS S.R.L.

2.1.1 ANTECEDENTES

En su inicio Materias Primas no existía como tal, La Reina, C. Por A., es el nombre de la empresa que comenzó sus labores en el país en el año 1959, estaba ubicada en la calle Moca del Sector de Villa Juana; ésta tenía que importar la mayoría de la Materia Prima. Por tal razón, su presidente en ese entonces el Sr. KurtKoenig, con el apoyo de la asociación de colchones del país, decidieron crear una empresa que les facilitara la materia prima sin tener que recurrir a las importaciones y de esta forma surge la idea de crear en el 1964 la empresa Materias Primas C. por A (S.R.L en la actualidad)siendo la primera empresa del país en fabricar Interiores, Muelles, Mallas, etc. La misma es la que le suministra parte de la materia prima a la Reina y otras industrias de la misma naturaleza. En la actualidad MAPRICA es una empresa que se mantiene a flote en el mercado competitivo de hoy, haciendo cambios constate a nivel tecnológico que le han dado una gran pujanza y ventajas comparativas frente a sus otros competidores tanto nacionales como internacionales.

En Materias Primas se produce una amplia gama de productos para tanto para camas como para muebles, dentro de los cuales podemos citar:

2.1.2 ALAMBRE:

Es producido por el método de trefilado¹ para la conformación de todos los elementos de acero con que cuenta tanto el colchón como su base. Se utiliza el alambrón como materia prima y se convierte en alambre de distintos calibres tanto para consumo interno de la empresa como para las ventas locales y de exportación.

2.1.3 INTERIORES (PANEL DE SPRING DE ACERO):

En este departamento se realizan dos operaciones principales; se toma el alambre para hacer el spring o muelle y luego se ensamblan en paneles de diferentes medidas para crear la estructurametálica del colchón. A estos paneles se le denominan interiores, se producen alrededor de unos 1,300 diarios,tanto para la producción de colchones terminados de las marcas mencionadas anteriormente, como para la venta local y de exportación.

2.1.4 MALLAS ELECTRO SOLDADAS PARA BASE DE CAMA:

Las mallas electro soldadas son confeccionada tanto con alambre de forma, como con Muelles cónicos. Estas ensambladas en un armazón de madera, componen lo que es la base del la cama que soporta el colchón, se producen cerca de 400 diarias y van dirigidas tanto para la producción de la empresa como para las ventas locales.

¹Proceso de reducción de secciones, de un sólido, que se lleva a cabo a través de dos o más operaciones seguidas.

_

2.1.5 NOG-ZAG (SPRING DE MUEBLES):

El Nog-Zag es un componente para mueblería, que se produce en rollos para la ventas locales y de exportación a empresas que se dedican a la fabricación de muebles.

2.1.6 MISIÓN

Fabricar productos de la mejor calidad posible para mantener la preferencia de los clientes en el mercado nacional e internacional, a fin de continuar un crecimiento sostenido y expandirnos como empresa.

2.1.7 VISIÓN

Continuar siendo líderes en el mercado nacional y lograr mayor expansión en el mercado Internacional.

2.1.8 VALORES

Asegurar un trato justo a nuestros clientes y colaboradores.

Mantener una atmósfera de un mejoramiento continuo de nuestros procesos y nuestro servicio al cliente.

Mantener nuestras introducciones de productos al ritmo requerido en el Mercado, tanto local como internacional.

2.2 ANÁLISIS DE CARGAS Y CONSUMO DE MATERIAS PRIMAS, EN EL PERÍODO ENERO-MARZO 2016

Materias Primas es una empresa netamente de manufactura, organizacionalmente dividida por departamentos, los cuales en más un 90 % cuentan con maquinarias que desarrollan productos o algún subproducto. Esas maquinarias en su mayoría consumidoras de medianas y grandes potencias conforman el sistema eléctrico de la empresa.

Estos departamentos forman una cadena de producción cada uno con tareas determinadas para completar un producto terminado. En cada paso de este proceso interviene el uso de la energía eléctrica.

En la actualidad el sistema eléctrico de Materias Primas como ya se ha planteado anteriormente, carece de un factor de potencia optimo por tanto su factura de electricidad está siendo penalizada. El valor actual de dicho factor de potencia ronda el **0.81** acorde con los tres meses de facturación que se utilizaron como muestra para este trabajo. Las empresas de distribución eléctrica en la Republica Dominicana tienen como factor de potencia optimo aquel que se encuentre por encima de 0.90 según la ley de electricidad 125-01.

En los planos de distribución de Materias Primas S.R. L. (Ver en anexos 1) se muestran de forma detallada las cargas (motores, luminarias, hornos) con las que cuenta le empresa. Estas en su mayoría motores de inducción, los cuales son los principales causante del bajo factor de potencia que presentan las mediciones registradas por el contador de la distribuidora Edesur.

De esta manera cabe enumerar por sector, los componentes pasivos que influyen en la generación del desfasamiento entre las ondas de voltaje y corriente del sistema eléctrico de la empresa, estos se pueden describir de la siguiente manera:

2.2.1 MOTORES DE INDUCCIÓN

Son los mayores responsables del problema de factor de potencia, por lo general estos vienen diseñados para operar con factor de potencia alrededor del 80% (0.8). Y al ser los que más energía demandan en una empresa de manufactura su influencia sobre el problema es de mayor importancia.

2.2.2 LUMINARIAS

Otro sector a tomar en cuenta es el de iluminación, ya que todo el alumbrado está constituido por lámparas Metal halidede unos 400 W en su mayoría, y de lámparas fluorescente, ambas cuentan con trasformadores que también son elementos pasivos que consumen energía reactiva del sistema.

2.2.3 CLIMATIZACIÓN

Los Aires acondicionados nunca faltan, son ampliamente usados en cualquier industria. Materias Primas cuenta con una importante cantidad de estos para la climatización de sus equipos de controles, ubicados en los famosos CCMs (centros de control de motores), y en las áreas de oficinas y laboratorios de instrumentación. Estos también por ser impulsados por motores eléctricos se convierten en elementos que demandan energía reactiva.

2.2.4 ELECTRO SOLDADORAS

Dos departamentos (Mallas Grip top y Mallas Semi Flex) de la empresa utilizan estas máquinas, y a estos se la adiciona el taller de soldadura. Toda máquina de soldar cuenta con un

transformador para elevar la corriente y disminuir voltaje, estos son consumidores de grandes potencias reactivas, para generar sus campos eléctricos.

2.2.5 MEDICIONES DE POTENCIA

Las mediciones de potencia de la empresa Materias Primas se tomaron como muestra los tres primeros meses del año, utilizando la facturación de consumo de energía de estos 3 meses. Las facturas emitidas por la empresa distribuidora de electricidad Edesur tienen conjunto a los montos de energía consumida la penalización por factor de potencia que se le hace a la empresa desde que fue puesta en vigencia la aplicación de le ley general de electricidad 125-01.

En la siguiente imagen podemos ver el encabezado de un duplicado de las facturas emitidas por la empresa distribuidora Edesur. Estas se presentaran en las siguientes páginas, para mostrar los datos que servirán de base para los cálculos y diseño del banco de capacitores, aquí se pueden apreciar los datos de la empresa distribuidora y del cliente Materias Primas.



Duplicado

VVA3MDU0OTE=

Ruta:

9200248

Itiner.: 0007

OFICINA: 1204 - PENA BATLLE CALLE PEÑA BATLLE 184 0 0 TELÉFONO: 563-1844 REFERENCIA DE PAGO:

FECHA DE EMISIÓN: CONDICIÓN FISCAL:

FECHA LÍMITE DE PAGO: 10/06/2016

6006541077-18 F012003126002155

11/05/2016

Loc.: LA FE Sección: ZONA URBANA Municipio: SANTO DOMINGO DE GUZMAN Provincia: DISTRITO NACIONAL

MATERIAS PRIMAS, S.A.S.

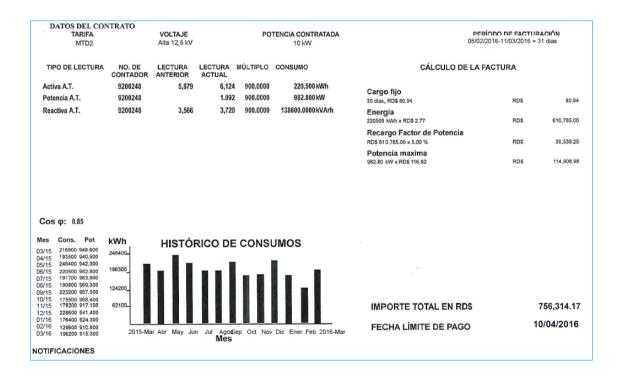
Finca: MAPRICA REF.: MAPRICA

DIRECCIÓN: CALLE JUAN ALEJANDRO IBARRA 124

Dirección Anterior: LA FE CALLE JUAN ALEJANDRO IBARRA S/N ENTRE GENARO PEREZ Y PEDR

Demanda de potencia mes de Marzo 2016

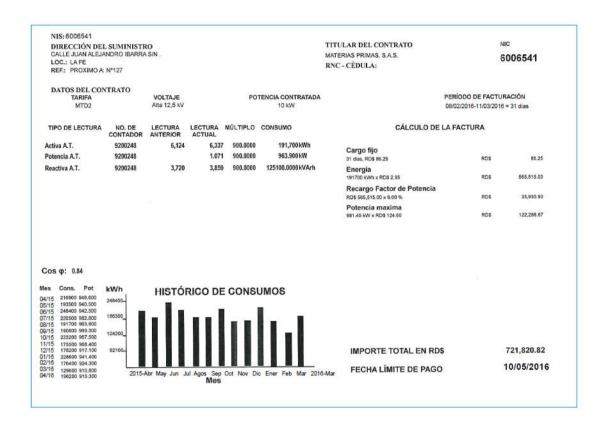
Factura No. 1



Fuente: Empresa de distribución eléctrica del sur (Edesur)

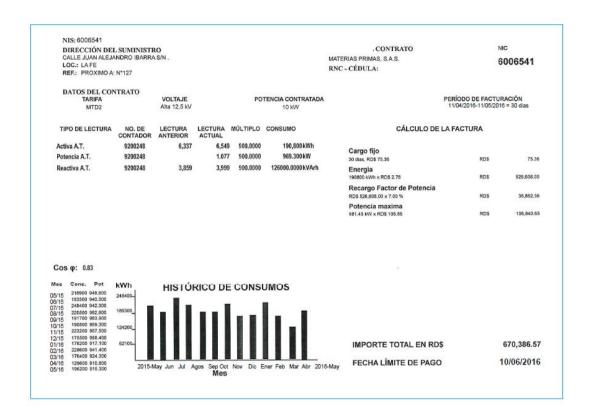
Nota: solo se muestran las secciones más importantes de la factura para este trabajo, por razones de tamaño y visualización

Factura No.2



Fuente: Empresa de distribución eléctrica del sur (Edesur)

Factura No. 3



Fuente: Empresa de distribución eléctrica del sur (Edesur)

2.2.6 OBSERVACIONES Y RESULTADOS DE MEDICIONES DE POTENCIA

La recopilación de tres facturas del año 2016 como muestra, sirve de apoyo para los cálculos técnicos y económicos que se realizaran en el capítulo 3. Estas facturas arrojan datos suficientes para que sirven de base para la obtención de los resultados esperados en este trabajo. Las variables más importantes que se pueden ver aquí son, potencia activa, potencia reactiva, y factor de potencia.

Dentro de los resultados de la facturación, se visualiza un aumento de la demanda de energía reactiva y por defecto de esto una baja del factor de potencia de manera sostenida en el curso de los tres meses maestrales, 0.85, 0.84 y 0.83 de Marzo a Mayo respectivamente. Significa que según lo descrito en el capítulo anterior, el sistema eléctrico de la empresa no está funcionando de forma óptima, su circuito de potencia esta produciendo armónicos que generan daños a largo plazo los equipos electrónicos y de controles. Tambien perdidas significativa en los conductores.

2.3 ESTRUCTURA LEGAL E INSTITUCIONAL QUE ESTABLECE LA PENALIZACIÓN EN LA FACTURA ELÉCTRICA POR BAJO FACTOR DE POTENCIA EN LA REPUBLICA DOMINICANA.

2.3.1RESOLUCIÓN NO. 237 DE MINISTERIO DE INDUSTRIA Y COMERCIO

La presente Resolución establece el Régimen Tarifario del Servicio Público de Distribución y Comercialización de Electricidad, el que comprende las opciones tarifarias, sus condiciones de aplicación, y las fórmulas que establecen su estructura, para determinar las tarifas de suministro eléctrico en las zonas de servicio de las empresas distribuidoras EDE Norte, EDE Este y EDE Sur, las que operan bajo contrato de cesión con la Corporación Dominicana de Electricidad.

Vigencia

De acuerdo con el Artículo 120 de la Resolución No. 236 de la Secretaría de Estado de Industria y Comercio (Reglamento Técnico para las Operaciones del Sub-Sector Eléctrico), la presente Resolución entrará en vigencia en la fecha de toma de control de las distribuidoras por las empresas adjudicatarias de la capitalización de la CDE, y expirará el 31 de Diciembre de 2006.

2.3.2 OPCIONES TARIFARIAS Y CONDICIONES DE APLICACIÓN

Establecerse las opciones tarifarias y sus condiciones de aplicación que se describen a continuación:

Los clientes podrán elegir libremente cualquiera de las opciones tarifarias que se describen más adelante, con las limitaciones establecidas en cada caso y dentro del nivel de tensión que les corresponda. Los distribuidores estarán obligados a aceptar la opción que los clientes elijan.

Salvo acuerdo entre el cliente y el distribuidor, la opción tarifaria tomada por el cliente regirá por un plazo mínimo de doce meses consecutivos.

2.3.3 OPCIONES TARIFARIAS PARA CLIENTES EN BAJA TENSIÓN

Son clientes en baja tensión aquellos que están conectados con su empalme a redes cuya

tensión es inferior a 1,000 Volts.

Tarifa BTS: Tarifa Simple.

Descripción

La tarifa BTS, tarifa simple, comprende los siguientes cargos, que se sumarán en la factura o

boleta del cliente:

a) Cargo fijo mensual.

b) Cargo por energía.

Aplicación de los cargos

a) Cargo fijo mensual.

Es variable dependiendo del consumo del cliente, y se aplicará incluso si dicho consumo es nulo.

b) Cargo por energía.

Se obtendrá multiplicando los kilowatts-hora de consumo de energía por su precio unitario.

Limitaciones para optar a la tarifa BTS.

Sólo podrán optar a esta tarifa los clientes cuyo suministro se efectúe en baja tensión y su

potencia conectada sea inferior a 10 kilowatts. Para controlar que el cliente no sobrepase dicha

potencia, el distribuidor podrá exigirle la instalación de un limitador de potencia de manera que se

cumpla dicha condición, el que será de cargo del cliente.

Se entenderá por potencia conectada a la máxima potencia que el cliente puede

demandar, dada la capacidad de su empalme.

Tarifa BTD: Tarifa con Potencia Máxima.

Descripción

La tarifa BTD comprende los siguientes cargos, que se sumarán en la factura o boleta del cliente:

a) Cargo fijo mensual.

b) Cargo por energía.

c) Cargo por potencia máxima.

Aplicación de los cargos.

a) Cargo fijo mensual.

El valor correspondiente se aplicará incluso si el consumo del cliente es nulo.

b) Cargo por energía.

Se obtendrá multiplicando los kilowatts-hora de consumo de energía por su precio unitario.

c) Cargo por potencia máxima.

Se obtendrá multiplicando la potencia máxima del cliente en kilowatt por su precio unitario

y se aplicará incluso si el consumo de energía es nulo.

Aquellos clientes que tengan medidor simple de energía, la potencia máxima será igual a

la potencia que tenga contratada con el distribuidor.

Para aquellos clientes que tengan medidor de energía y demanda máxima, la potencia

máxima será igual al mayor valor que resulte de comparar la demanda máxima del mes con el

promedio de las dos más altas demandas máximas mensuales registradas dentro de los últimos

12 meses.

Se entenderá por demanda máxima de un mes, el más alto valor de las demandas

integradas en períodos sucesivos de 15 minutos, medidas durante las 24 horas de cada día del

mes.

Los clientes que opten por esta tarifa y no tengan un medidor con indicación de demanda

máxima, deberán contratar libremente una potencia máxima con el distribuidor, la que regirá por

un plazo mínimo de un año. Durante dicho plazo, el cliente no podrá disminuir ni aumentar su

potencia contratada sin el acuerdo del distribuidor. Al término de la vigencia anual de la potencia

contratada, el cliente podrá contratar una nueva potencia.

Para garantizar que los clientes con potencia contratada no sobrepasen su valor

contratado, el distribuidor podrá exigirle la instalación de un limitador de potencia especificado por

ella misma, el que será de cargo del cliente. La potencia contratada que solicite el cliente deberá

ceñirse a las capacidades de los limitadores disponibles en el mercado. Durante el período de

vigencia de dicha potencia contratada, el cliente podrá hacer uso de ella en cualquier momento,

sin restricciones.

Tarifa BTH: Tarifa Horaria

Descripción

La tarifa comprende los siguientes cargos, que se sumarán en la factura o boleta del cliente:

- a) Cargo fijo mensual.
- b) Cargo por energía.
- c) Cargo por potencia máxima.
- d) Cargo por potencia máxima en horas de punta.

Aplicación de los cargos

- a) Cargo fijo mensual.
- a) Es independiente del consumo del cliente y se aplicará incluso si dicho consumo es nulo.
- b) Cargo por energía.
- c) Se obtendrá multiplicando los kilowatts-hora de consumo de energía por su precio unitario.
- d) Cargo por potencia máxima.

Se obtendrá multiplicando la potencia máxima del cliente en kilowatts por su precio unitario y se aplicará incluso si el consumo de energía es nulo.

Para aquellos clientes que tengan medidor sin indicador de demanda máxima, la potencia máxima será igual a la potencia máxima que tenga contratada con el distribuidor, y su contratación se regirá por el mismo procedimiento establecido para la contratación de potencia en la tarifa BTD.

Para aquellos clientes que tengan medidor con indicador de demanda máxima, la potencia máxima será igual al mayor valor que resulte de comparar la demanda máxima del mes con el promedio de las dos más altas demandas máximas mensuales registradas dentro de los últimos 12 meses.

Se entenderá por demanda máxima de un mes, el más alto valor de las demandas integradas en períodos sucesivos de 15 minutos, medidas durante las 24 horas de cada día del mes.

e) Cargo por potencia máxima en horas de punta.

Se obtendrá multiplicando la potencia máxima en horas de punta del cliente en kilowatts por su precio unitario y se aplicará incluso si el consumo de energía es nulo. Para aquellos clientes que no tengan medidor con indicación de demanda máxima en horas de punta, la potencia máxima en horas de punta será igual a la potencia máxima que tenga contratada con el distribuidor durante las horas de punta.

Para aquellos clientes que tengan medidor con indicador de demanda máxima en horas de punta, la potencia máxima en horas de punta será igual al mayor valor que resulte de comparar la demanda máxima del mes en el horario de punta con el promedio de las dos más altas demandas máximas mensuales registradas en el horario de punta dentro de los últimos 12 meses.

Se entenderá por demanda máxima en horas de punta de un mes, el más alto valor de las demandas integradas en períodos sucesivos de 15 minutos, medidas durante las horas de punta de cada día del mes.

Para aquellos clientes que no tengan medidor con indicador de demanda máxima en horas de punta, la potencia máxima en horas de punta será igual a la potencia máxima en horas de punta que tenga contratada con el distribuidor, y su contratación se regirá por el mismo procedimiento establecido para la contratación de potencia en la tarifa BTD.

El monto de la potencia máxima contratada en horas de punta será el que solicite el cliente ciñéndose a las capacidades de los limitadores de potencia disponibles en el mercado. El

distribuidor podrá instalar un reloj control o interruptor horario de manera tal que asegure que el monto de la potencia máxima contratada en las horas de punta no sea sobrepasado durante dicho horario. El valor de estas instalaciones será costeado por el cliente.

2.3.4 OPCIONES TARIFARIAS PARA CLIENTES EN MEDIA TENSIÓN

Son clientes en media tensión aquellos que están conectados con su empalme a redes cuyo voltaje es inferior o igual a 34.5 kV y superior o igual a 1.000 Volts.

En media tensión regirán las tarifas MTD y MTH, que serán iguales en estructura y condiciones de aplicación a las tarifas BTD y BTH, respectivamente, difiriendo sólo en los precios unitarios correspondientes.

Los consumos correspondientes a clientes de media tensión podrán ser medidos en baja tensión, aplicándose en este caso sobre los cargos por energía y potencias de la tarifa correspondiente, un recargo por pérdidas de transformación igual a un 1%.

2.3.5 OPCIONES TARIFARIAS PARA CLIENTES EN ALTA TENSIÓN

A los clientes sujetos a regulación de precios abastecidos desde instalaciones en alta tensión, vale decir en voltajes mayores que 34.5 kV, se les aplicará una tarifa igual al precio de venta de la tarifa en media tensión MTD o MTH afectada a un descuento de 5% en el cargo por energía y de 36% en potencia.

Los consumos correspondientes a clientes de alta tensión podrán ser medidos en media tensión, aplicándose en este caso sobre los cargos por energía y potencias de la tarifa correspondiente, un recargo por pérdidas de transformación igual a un 1%.

2.3.6 RECARGO POR FACTOR DE POTENCIA MEDIO MENSUAL

La facturación por consumos efectuados a instalaciones cuyo factor de potencia medio mensual es inferior a 0.90, se recargará en un 1% por cada 0.01 en que dicho factor baje de 0.90.

2.3.7 DEFINICIÓN DE LAS HORAS DE PUNTA

En el ámbito de la presente resolución, se entenderá por horas de punta al período comprendido entre las 18:30 y las 23:00 horas de cada día del año.

2.3.8 CONDICIONES GENERALES DE APLICACIÓN DE LAS TARIFAS

Cuando en un período de facturación existan sub-períodos con distintos precios de energía y potencia, el consumo de energía de cada uno se determinará proporcionalmente a su duración, y se facturará con el precio de energía correspondiente, y la potencia se facturará con un precio de potencia promedio ponderado por la duración de cada sub-período.

Los montos de potencias contratadas de las tarifas BTD, BTH, MTD y MTH, como también la opción tarifaria elegida por el cliente, regirán por 12 meses y se entenderán renovados por igual período salvo aviso por escrito en contrario del cliente con a lo menos 30 días de anticipación al vencimiento de dicho período o de cualquiera de sus renovaciones. La empresa deberá comunicar con 60 días de anticipación al cliente la fecha de término del período de 12 meses de aplicación

de la tarifa que esté vigente. No obstante, el cliente podrá anticipadamente disminuir dichos montos o bien cambiar la opción tarifaria, comprometiendo con el distribuidor el pago de los remanentes que tuviere por concepto de potencias máximas.

Todos los equipos de medida y otros dispositivos de control serán de cargo del cliente o bien provistos por éste. En este último caso, el distribuidor podrá rechazar los equipos y dispositivos que a su juicio no cuenten con el grado de confiabilidad requeridos.

Todos los conflictos que se susciten entre el distribuidor y los clientes con motivo de la interpretación o aplicación de las presentes condiciones de aplicación, y en los que no se haya logrado acuerdo entre las partes en un período de 60 días desde la presentación por escrito del reclamo del cliente, serán resueltos por la Superintendencia de Electricidad.

2.4 METODOLOGÍA PARA LA COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA CAPACITIVA

En esta metodología se hace un análisis de las características que un banco de capacitores debe reunir para llevar a cabo el suministro de potencia reactiva dentro de un sistema industrial, así como los criterios que se tienen que considerar para poder ser aplicados, contemplando que en el capítulo 1 se muestran las tablas y conexiones para la selección del banco de capacitores.

2.4.1 CÁLCULO DE LA POTENCIA REACTIVA

En todos los casos que se estudiarán a continuación se aplicarán soluciones prácticas que de ninguna forma pretende ser la óptima o ideal ya que ésta requeriría estudiar la configuración del circuito, la distribución de cargas, la regulación de tensión, etc. Por lo tanto será el proyectista o instalador el que optará por el criterio a aplicar en cada caso, el objeto de esta metodología es proporcionar una guía para calcular la potencia reactiva necesaria.

2.4.2 CÁLCULOS DE LAS INSTALACIONES INDUSTRIALES CON MEDICIÓN DE LA ENERGÍA REACTIVA

Conociendo las energías activa y reactiva consumidas en uno o varios períodos de medición, por ejemplo los estados mensuales de los medidores y las horas mensuales de utilización, puede calcularse el consumo de potencia y el factor de potencia promedio de la instalación.

$$P = \frac{kWh}{h} = kW$$
(18)

$$Q = \frac{kVArh}{h} = kVAr$$

(19)

El tiempo de utilización se refiere a la cantidad de horas efectivas de trabajo dentro del período de facturación de energía el cual viene siempre impreso en la factura. El tiempo de utilización se puede calcular aproximadamente tomando en cuenta los siguientes lineamientos:

Si se tiene un taller con consumos de 2430 kWh y 2322 kVArh que trabaja de lunes a viernes de 8 a 18 horas, de las cuales de 8 a 12 horas lo hace al 100% de la carga, de 12 a 14 horas al 50%, y de 14 a 18 horas al 80%, además trabaja los sábados de 8 a 13 horas con sólo el 30% de la carga y se desea alcanzar un factor de potencia de 0.9. La facturación cubre un mes de 31 días con 4 sábados, 4 domingos y 2 feriados:

Entonces se tiene que:

Tiempo de utilización = $21 \times (1 \times 4 + 0.5 \times 2 + 0.8 \times 4) + 4 \times (0.3 \times 5) \approx 180 \text{ horas}$ (20)

Donde:

21 = Días hábiles: 31 – 4 – 4 – 2

1 x 4 = 100 % de la carga en 4 horas

 $0.5 \times 2 = 50 \%$ de la carga en 2 horas

0.8 x 4 = 80 % de la carga en 4 horas

4 = Sábados

 $0.3 \times 5 = 0.330 \%$ de la carga: 5 horas

Una vez que se obtuvo el tiempo de utilización de la ecuación 20 se efectúa la sustitución de este valor en las ecuaciones 18 y 19 para obtener las potencias correspondientes.

$$P = \frac{kWh}{h} = \frac{2430}{180} = 13.5 \text{ kW}$$

$$Q = \frac{\text{kVArh}}{\text{h}} = \frac{2322}{180} = 12.9 \text{ kVAr}$$

Para encontrar el factor de potencia al cual opera el sistema se aplica la ecuación 10 y posteriormente la ecuación 6.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{13.5^2 + 12.9^2} = 18.67 \text{ kVA}$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{1.35}{18.67} = 0.72$$

Posteriormente se corrige el factor de potencia de 0.72 atrasado a 0.9 atrasado aplicando la ecuación 21 y con el resultado obtenido se selecciona la potencia del banco de la tabla 4.

$$Q_{CAP} = kW \left\{ \left[\frac{1}{(\cos \varphi_1)^2} - 1 \right]^{1/2} - \left[\frac{1}{(\cos \varphi_2)^2} - 1 \right]^{1/2} \right\}$$
(21)

$$Q_{CAP} = 13.5 \left\{ \left[\frac{1}{(0.72)^2} - 1 \right]^{1/2} - \left[\frac{1}{(0.9)^2} - 1 \right]^{1/2} \right\}$$

$$Q_{CAP} = 6.5 \text{ kVAr} \cong 7.5 \text{ kVAr}$$

(4 tabla la de próximo más comercial valor)

Finalmente se selecciona las especificaciones para el banco de capacitores trifásicos en baja tensión con la potencia en KVAr calculada en el punto anterior, teniendo entonces:\

Tabla VII. Capacidades banco de capacitores trifásicos en baja tensión

Tensión de línea		ncia (Ar)	Capacitanci a nominal	Corriente nominal (A)		Fusible NH ó Dz (A)	Conductor de conexión mm²
(V)	50 Hz	60 Hz	(μF)	50 Hz	60 Hz		
	2.1	2.5	137.01	5.5	6.6	10.0	2.5
	4.2	5.0	274.03	10.9	13.1	25.0	2.5
	6.3	7.5	411.04	16.4	19.7	32.0	6.0
	8.3	10.0	548.05	21.8	26.2	50.0	10.0
220	10.4	12.5	685.07	27.3	32.8	63.0	16.0
220	12.5	15.0	822.08	32.8	39.4	63.0	16.0
	14.6	17.5	959.09	38.2	45.9	80.0	25.0
	16.6	20.0	1096.12	43.7	52.5	100.0	25.0
	18.7	22.5	1233.12	49.1	59.0	100.0	35.0
	20.8	25.0	1370.14	54.6	65.6	125.0	35.0

2.4.3 CÁLCULO DE LA POTENCIA REACTIVA POR EL MÉTODO DE TABLAS.

Para realizar el cálculo de la potencia reactiva por tabla es necesario conocer los siguientes aspectos:

La potencia activa consumida en kW

IEI factor de potencia deseado

Suponiendo que una industria consume una potencia de 220 kW, con un factor de potencia de 0.85 atrasado y se desea mejorar el factor de potencia hasta 0.95, entonces a partir de estos datos se prosigue a calcular la potencia del banco de capacitores necesaria para compensar la potencia reactiva necesaria para elevar el factor de potencia al valor deseado.

Para ello inicialmente se debe hacer uso de la tabla 2 seleccionar en función del $\cos \phi$ y de la instalación antes y después de la compensación una constante K a multiplicar por la potencia activa para encontrar la potencia del banco de capacitores a instalar.

La constante K que determinara el factor por el cual se debe multiplicar la potencia activa se localiza identificando en la primera columna el factor de potencia inicial de nuestro sistema, es decir el factor de potencia original sin compensación de potencia reactiva, posteriormente se identifica el valor del factor de potencia hacia el cual se quiera corregir y se elige el valor en el cual se intersecta el factor de potencia inicial con el deseado.

Tabla VII: Factor K

Factor de	Factor K									
potencia	Factor de potencia deseado									
inicial	0.9	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95♥	0.96	0.97		
0.76	0.371	0.4	0.429	0.46	0.492	0.526	0.563	0.605		
0.77	0.344	0.373	0.403	0.433	0.466	0.5	0.537	0.578		
0.78	0.318	0.347	0.376	0.407	0.439	0.474	0.511	0.552		
0.79	0.292	0.32	0.35	0.381	0.413	0.447	0.484	0.525		
0.8	0.266	0.294	0.324	0.355	0.387	0.421	0.458	0.499		
0.81	0.24	0.268	0.298	0.329	0.361	0.395	0.432	0.473		
0.82	0.214	0.242	0.272	0.303	0.335	0.369	0.406	0.447		
0.83	0.188	0.216	0.246	0.277	0.309	0.343	0.38	0.421		
0.84	0.162	0.19	0.22	0.251	0.283	0.317	0.354	0.395		
→ 0.85	0.135	0.164	0.194	0.225	0.257	0.291	0.328	0.369		

Una vez que se encontró este valor se sustituye en la ecuación 12, para calcular la potencia reactiva.

$$Q_C = P \times Factor K = 315 \text{ kW} \times 0.291 = 92 \text{ kVAr}$$

$$Q_C \approx 100 \text{ kVAr}$$
 (valor comercial más próximo de la tabla 5)

Posteriormente se selecciona la potencia del banco de capacitores monofásicos en media tensión con el valor más próximo de la potencia calculada, obteniendo:

Tabla IX: Capacitores monofásicos en MT.

Capacidades en kVAr para capacitores monofásicos en media tensión					
Tensión	kVAr				
2400	50				
2770	100				
4160	150				
4800	200				

Por lo que la potencia del capacitor a instalar para mejorar el factor de potencia será de 100 kVAr o se puede sustituir por 2 capacitores de 50 kVAr.

2.4.4 CALCULO DE POTENCIA REACTIVA A PARTIR DEL RECIBO DE LA COMPAÑÍA DE DISTRIBUCIÓN

El cálculo de potencia a través del recibo es solamente un método aproximado pero muy práctico para el cálculo la potencia reactiva del banco de capacitores. Generalmente proporciona resultados aceptables, pero si no se hace un correcto análisis, los resultados pueden ser insatisfactorios.

Para este caso el procedimiento a seguir es similar al realizado por el método de tablas, la factura eléctrica se encuentran los datos necesarios para calcular la potencia reactiva de los bancos de capacitores si se desea elevar el factor de potencia que se indica en la factura, la forma de calcularla es la siguiente:

De la factura eléctrica tenemos los datos de la potencia consumida en kW y kVAr así como el factor de potencia de nuestro sistema, de aquí que con los datos de las potencias podamos calcular el

factor de potencia con las mismas ecuaciones con las que se ha trabajado anteriormente con la simple finalidad de corroborar de que este sea el correcto. Para calcular la potencia de los bancos de capacitores se hace uso de la ecuación 21, considerando el factor de potencia al cual se quiera elevar. Este se ejemplificara posteriormente en el análisis económico en el capítulo 3.

2.4.5 CALCULO DEL NÚMERO DE UNIDADES

De acuerdo con el tipo de conexión y con los valores conocidos para las unidades capacitivas las cuales se presentan en el capítulo 2, los fabricantes de capacitores recomiendan la formación de grupos de serie, de acuerdo a la tabla 6.

En la tabla 6 se especifica el número de unidades capacitivas por grupos serie, el número mínimo de unidades por grupo y el mínimo número de unidades por grupo en el cual deben estar conformados los bancos de capacitores.

Ahora bien si se desea formar un banco de capacitores trifásicos de 30 MVAr, 115 kV entre fases en conexión estrella con neutro flotante, que permita una sobretensión máxima del 10% entonces se debe obtener el mínimo número de unidades capacitivas trifásico aplicando la ecuación 9 por fase y suponiendo que se emplea una conexión estrella con neutro flotante formada de 5 grupos en serie, entonces por datos de la tabla 6, se contemplan 10 unidades mínimas por grupo y 150 unidades por banco trifásico, por lo que se puede aplicar la ecuación 34 para encontrar el mínimo número de unidades trifásico.

Aplicando la ecuación 22 se obtiene que:

Mínimo número 3[†] = (Número de grupos en serie/fase)(Mínimo número de grupos en serie para las tres fases)

$$kVAr = \frac{kVAr_{3\varphi}}{3} = \frac{30000}{3} = 10000$$
(22)

Sustituyendo los valores en la ecuación 22 se obtiene:

A continuación se utiliza la ecuación 23 para calcular los kVAr por cada unidad.

$$kVAr/unidad = \frac{kVAr_{3\varphi}}{M \text{ inimo número de unidades trifásicas}} = \frac{30000}{150} = 200$$
 (23)

Para los 115 kV entre fases, se hace uso de la ecuación 24 y se obtiene:

$$V_{LN} = \frac{V_{LL}}{\sqrt{3}}$$

$$V_{LN} = \frac{115}{\sqrt{3}} = 66.39 \text{ kV}$$
(24)

Como cada fase está formada por 5 grupos en serie, la tensión por grupo se obtiene utilizando la ecuación 25.

$$V_{grupo} = \frac{V_N}{No.grupos} = \frac{66.39}{5} = 13.27 \text{ kV}$$
 (25)

Por lo tanto, se seleccionan unidades de 13.28 kV ya que es el valor comercial más próximo

CAPITULO III

IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE COMPENSACIÓN DE REACTIVOS EN MATERIAS PRIMAS S.R.L. (FACTIBILIDAD TÉCNICO ECONÓMICA.)

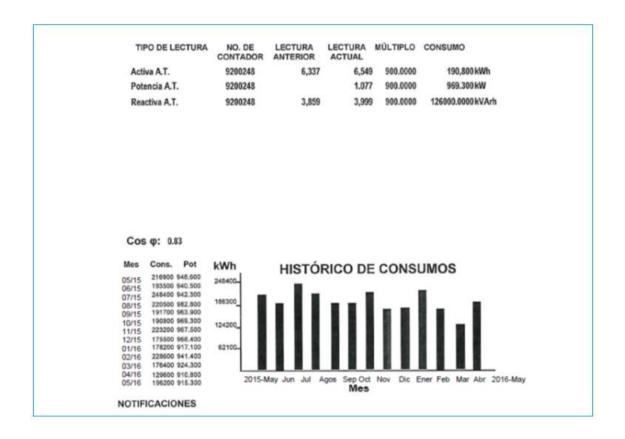
3.1 CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS A CONSIDERAR PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE COMPENSACIÓN.

Para la implementación de un sistema de compensación de reactivos, tenemos los siguientes parámetros a tomar en cuenta:

Mes de facturación

La factura elegida para hacer los cálculos del banco de capacitores ideal para corregir el factor de potencia es la del mes de Mayo, ya que es un mes donde se registró la mayor demanda de energía de los tres meses elegido como muestra para este trabajo, en el capítulo anterior. Tambien es el mes que presenta el más bajo FP.

Factura No.3 Valores de potencias y factor de potencia, mes de Mayo



Potencia activa en KW del mes de facturación elegido

En el mes de Mayo, un mes relativamente caluroso y de mucha actividad de producción en la empresa Materias Primas, la demanda de potencia activa como se puede ver en la factura No. 3 del capítulo anterior fue de <u>969.3 KW.</u> Esta cifra será utilizada para los cálculos técnicos de la capacidad en KVAr del banco de capacitores a instalar.

Factor de potencia de la factura eléctrica

En la factura No. 3 el factor de potencia como los demás meses estuvo por debajo de 0.9 este fue el más bajo de las tres facturación, $Cos \emptyset = 0.83$.

Factor de potencia deseado

Para conseguir un buen margen de compensación, por razones preventiva a la instalación

de cargas futuras se ha elegir un factor de potencia futuro por encima de los 5 puntos centesimales

de 0.9. Según el criterio de los actores este trabajo se va a optar por un FP de 0.96.

Método a utilizar para el cálculo del banco de capacitores

La metodología a utilizar para el cálculo del banco de capacitores, es por medio del uso

de la tabla No. 6 (del factor K) presentada en el capítulo 1. Es un método rápido y fácil, utilizado

ampliamente por las compañías que diseñan ensamblan y venden estos equipos para la industria.

Consiste en encontrar, a partir del factor de potencia actual y el factor de potencia deseado, un

factor K que multiplicado este por la potencia activa da como resultado la capacidad en KVAR del

banco de capacitores que necesita la red para la corrección del mismo.

Qc = Potencia Activa x Factor K

Donde Qc es la potencia reactiva del banco de capacitores requerida para llevar al FP deseado y

seleccionado en la tabla arbitrariamente.

Calculo para el banco capacitores trifásicos

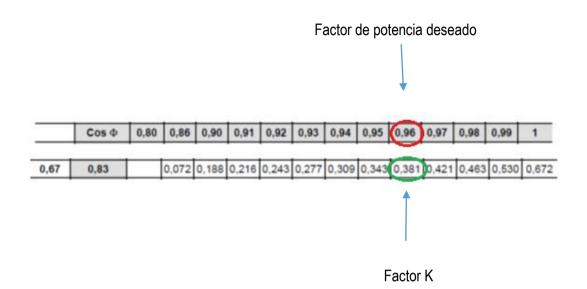
De la factura No. 3 se tienen los siguientes datos:

Potencia activa = 969.3 KW

FP = 0.83

90

De la tabla No. 6 se tiene el factor "K"



Se procede a sustituir en la formula.

Qc = 969.3 KW X 0.381

Qc = 369.3 KVAR

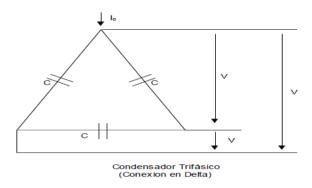
Como los valores comerciales de banco de capacitores no se ajustan a este resultado, se toma el valor más cercano hacia arriba. El banco ideal sería uno de **375 KVAR**.

Tipo de compensación según su instalación

En este proyecto se utilizará la compensación central, la cual de manera automática adicionara los reactivos que se requiere en cada instante de operación de la planta, para mantener el factor de potencia dentro de la escala de optimización.

Conexión del banco de capacitores

Se utilizara la conexión delta, porque en sistemas donde no hay un buen balance de cargas entre líneas, es excelente para equilibrar la corriente.



3.2 FACTIBILIDAD ECONÓMICA DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE COMPENSACIÓN.

Estudio económico de banco de capacitores

Costos de inversión

Son los asociados a la infraestructura eléctrica, la compra de los equipos, mano de obra administrativos etc. De ser llevado a cabo este proyecto, en la Tabla 3-1 se muestra con detalles las partidas que conllevarían la ejecución e instalación de dos bancos de capacitores de compensación automática de 200 KVAR uno por cada banco de trasformadores de la planta.

En la siguiente Tabla 3-1, se presenta el presupuesto detallado con, las partidas necesarias para ejecutar la obra. Para la elaboración de este presupuesto fue necesario tomar tres cotizaciones de banco de capacitores de tres tiendas eléctricas diferentes. Estas tiendas fueron: Tecni Electric, NC Automatización y Controles, y Warren del Caribe. La cotización elegida fue, la de NC Automatización y Controles, por ser la más económica y a la vez las marcas de sus componentes como son capacitores, contactores, relee, Fusibles etc., son reconocidas y de calidad entre excelente y regular (TELEMECANIQUE, capacitores SASSIN, componentes para la automatización del banco marca *CIRCUTOR*).

Tabla X: Resumen presupuesto de banco de capacitores.

PRESUPUESTO BANCOS DE CAPACITORES AUTOMÁTICO

	PRESUPUES	то				
N? DESCRIPCIÓN	CANTIDA	NDUNIDAD	RECIO UNITARIC	VALOR	SUB TOTAL	
1 BANCO DE CAPACITORES AUTOMÁTICO 200KVAR, Gabinete Metálico, N-3R, Pintura Electroestática Sistema de Control para la Automatización		UNID	280.000,00	560.000,00		
					560.000,00	
2 MANO DE OBRA						
1 Mano de Obra y Dirección técnica	15	%	560.000,00	84.000,00	84.000,00	
	SUB TO	TAL MATE	RIALES Y M.O		644.000,00	
3 GASTOS GENERALES						
1 Seguros y Fianzas Laborales	2	%		11.200,00		
2 Transporte y Grúa	5	%		28.000,00		
3 Gastos administrativos	2	%		11.200,00		
4 Prestaciones	10	%		56.000,00		
					106.400,00	
	SUB-1	TOTAL PRES	SUPUESTADO		750.400,00	
ITBIS 18%						
TOTAL PRESUPUESTADO						

Tabla XI: Resumen de análisis económico del proyecto.

ANÁLISIS ECONÓMICO BANCOS DE CAPACITORES AUTOMÁTICO

DATOS	
No. de Periodos	20
Tipo de Periodo	Anual
Tasa de Descuento	10%

	DETALLE	Periodos Anua								
	DETALLE	0	1	2	3	4	5			
EGRESO	Inversión	-880.432,00	-	-	-	-				
EGRESO	Costo de Mantenimiento	1%		- 8.804,32	- 8.804,32	- 8.804,32	- 8.804			
INGRESO	Factor de Potencia Optimo	-	442.350,72	442.350,72	442.350,72	442.350,72	442.350			
	BALANCE ANUAL	-880.432,00	442.350,72	433.546,40	433.546,40	433.546,40	433.546			

	DETALLE -		Periodos Anuales								
	DETALLE	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
EGRESO	Inversión				•	•	•				-
EGNESO	Costo de Mantenimiento	- 8.804,32	- 8.804,32	- 8.804,32	- 8.804,32	- 8.804,32	- 8.804,32	- 8.804,32	- 8.804,32	- 8.804,32	- 8.804,32
INGRESO	Factor de Potencia Optimo	442.350,72	442.350,72	442.350,72	442.350,72	442.350,72	442.350,72	442.350,72	442.350,72	442.350,72	442.350,72
	BALANCE ANUAL	433.546,40	433.546,40	433.546,40	433.546,40	433.546,40	433.546,40	433.546,40	433.546,40	433.546,40	433.546,40

Fuente: Elaboración propia

Tabla XII: Resumen valor anual neto.

VALOR ANUAL NETO

No.	FNE	(1+I)*	FNE/(1+I)*
0	- 880.432,00		- 880.432,00
1	442.350,72	1,10	402.137,02
2	433.546,40	1,21	358.302,81
3	433.546,40	1,33	325.729,83
4	433.546,40	1,46	296.118,02
5	433.546,40	1,61	269.198,20
6	433.546,40	1,77	244.725,64
7	433.546,40	1,95	222.477,85
8	433.546,40	2,14	202.252,60
9	433.546,40	2,36	183.866,00
10	433.546,40	2,59	167.150,91
11	433.546,40	2,85	151.955,37
12	433.546,40	3,14	138.141,24
13	433.546,40	3,45	125.582,95
14	433.546,40	3,80	114.166,32
15	433.546,40	4,18	103.787,56
16	433.546,40	4,59	94.352,33
17	433.546,40	5,05	85.774,84
18	433.546,40	5,56	77.977,13
19	433.546,40	6,12	70.888,30
20	433.546,40	6,73	64.443,91
			2.818.596,83

VAN= \$2.818.596,83

Fuente: Elaboración propia.

Tabla XIII: Resumen tasa interna de retorno.

TASA INTERNA DE RETORNO

TASA DE DESCUENT	VAN
0%	7799300,32
5%	4.530.899,50
10%	2.818.596,83
15%	1.840.934,56
20%	1.238.093,70
25%	840.803,26
30%	563.891,13
35%	361.729,69
40%	208.427,37
45%	88.505,62
50%	- 7.730,41
55%	- 86.608,65
60%	- 152.411,74
65%	- 208.131,40
70%	- 255.916,23
75%	- 297.347,06
80%	- 333.611,96
85%	- 365.620,63
90%	- 394.081,21
95%	- 419.553,05
100%	- 442.483,85

TIR= 50%

Fuente: Elaboración propia

Análisis financiero y tomas de decisiones

Una vez conocidos los beneficios y los costos de un proyecto, se obtiene el Resultado Neto de Operación (RNO) que es el resultado de la eficiencia de los beneficios menos los costos operativos. Al descontar la inversión del proyecto se obtiene el Flujo Neto y los indicadores de rentabilidad, los cuales nos permitirán tomar la decisión de seguir o abordar la realización de dicho proyecto. Los criterios para la toma de decisiones son los siguientes:

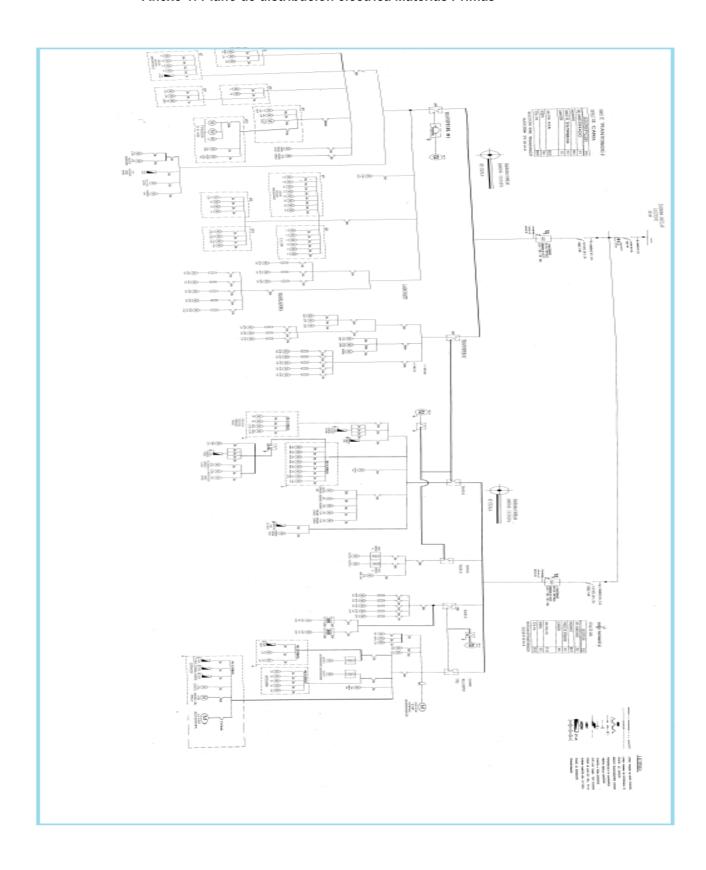
- Valor Anual Neto (VAN): VAN> 0: el valor actualizado de los cobros y pagos futuros de la inversión, a la tasa de descuento elegida generará beneficios, por tanto debe ejecutarse.
- 2) Tasa interna de retorno (TIR): Si la TIR es mayor que la tasa de descuento, significa que el retorno del proyecto compensa el costo de oportunidad del dinero, además, genera un rendimiento, considerándose el proyecto como una inversión rentable.

Análisis económico:

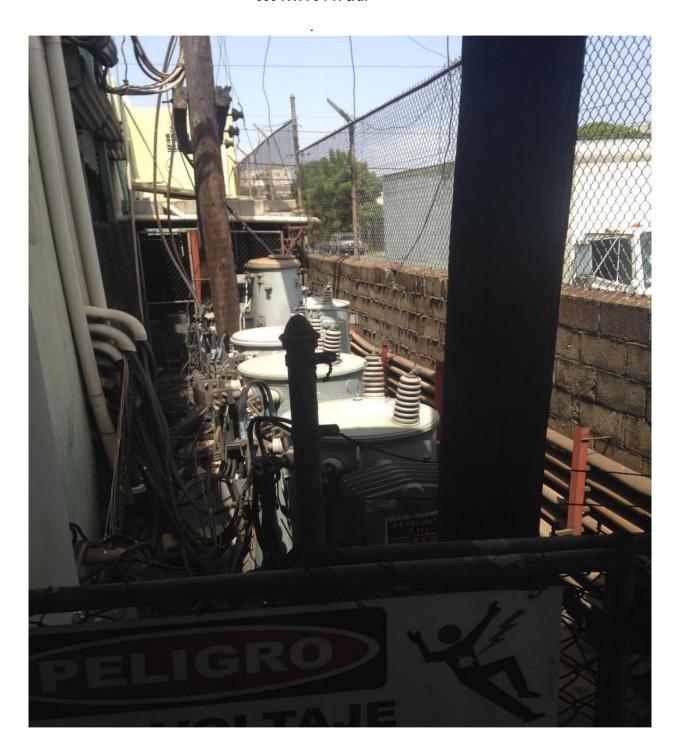
Según los cálculos realizados en las Tablas 3-2 y 3-3, vemos que el VAN es mayor que cero y la TIR es de 50%, 40 por ciento más que la tasa de descuento, se puede decir que este proyecto cuenta con una alta proyección de beneficios futuros a mediano y largo plazo, que impactaran positivamente en la economía de la empresa. Con estos resultados, de ejecutarse dicha obra antes de los 2 años se estaría recuperando la inversión del proyecto, lo cual implica que los siguientes 18 años de vida útil de los bancos de capacitores de 200 KVAR cada uno, serán solo de beneficios para la compañía.

ANEXOS

Anexo 1: Plano de distribución eléctrica Materias Primas



Anexo 2. Subestacion de Materias Primas S.R.L, dos bancos de transformadores de 3TR 330 KVA 3 PH c/u.



Anexo 3. Capacitor trifasico marca SASSIN de 30 KVAR, son los elegidos en el presupuesto del proyecto.



Anexo 4. Lineas de produccion de maquinas trefiladoras.



Anexo 5. Panel de Sprint para colchones (interior) un producto de los que elabora la empresa

