



REPUBLICA DE CUBA  
MINISTERIO DE EDUCACION SUPERIOR  
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO  
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECHANICA

# TRABAJO DE DIPLOMA

*EN OPCION AL TITULO DE INGENIERO ELECTRICICO*

*Título: Compensación de Potencia Reactiva en la  
empresa Comandante Ernesto Che Guevara*

*Autor: Yorgan Alberto Sánchez Oro*

*Tutores: MSc. Ileana González Palau.*

*Dr. C: Secundino Marrero Ramírez.*

*“EMPRESA COMANDANTE ERNESTO CHE GUEVARA ”*

*MOA-2008*

## DECLARACIÓN DE AUTOR

---

Yo, Yorgan Alberto Sánchez Oro, autor de este trabajo de diploma y los tutores la MSc. Ileana González Palau. Y el Dr. C: Secundino Marrero Ramírez, certificamos su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero- Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, el cual podrá hacer uso del mismo para fines docentes y educativos.

---

Yorgan Alberto Sánchez Oro  
(Diplomante)

---

Dr. C: Secundino Marrero Ramírez.  
(Tutor)

---

MSc. Ileana González Palau.  
(Tutor)

## PENSAMIENTO

---

*Creo en el milagro de lo que puede hacer el trabajo, de lo que puede hacer la ciencia y de lo que pueden hacer los hombres”.*



*El verdadero hombre no mira de que lado se vive mejor, sino de que lado esta el deber, y ese es el único hombre práctico, cuyo sueño de hoy será la ley de mañana, porque el que haya puesto los ojos en las entrañas universales, y ha visto hervir los pueblos, llameantes y ensangrentados, en la artesa de los siglos, sabe que el porvenir, sin una sola excepción, esta al lado del deber.*

*Fidel Castro Ruz*

## DEDICATORIA

---

*Deseo dedicar la culminación de este trabajo a todas estas personas que me ayudaron de una forma u otra.*

*A mi MADRE Elsa Oro Sánchez por su cariño comprensión y por saber transmitirme toda esa sabiduría que la caracteriza, por estar siempre hay cuando la necesito, por comprenderme y apoyarme en todo momento gracias te quiero mucho.*

*A mi PADRE Alberto Sánchez Rodríguez porque todo lo que soy y seré se lo debo, muchas gracias por convertirme en la persona que soy y por confiar siempre en mi tu sabes que te quiero mucho.*

*A mi HERMANO Jorge Hernández Oro que me comprende como nadie y apoya en todo momento y sabe estar hay cuando mas lo necesito para dar su vida por la mía si es necesario, te quiero mucho ok,*

*A mi NOVIA Ariadna Pertelles Ricardo que me supo comprender y apoyar en todo momento, y me brinda todo su amor sin esperar nada a cambio solamente que la quiera tanto o más que ella a mí.*

*También a mi familia que me apoyaron en todos los momentos difíciles por los cuales transité a lo largo de mi carrera.*

## *Agradecimientos*

---

*Deseo agradecer en especial a mis tutores MSc. Ileana González Palau y el Dr. C: Secundino Marrero Ramírez por su sabiduría y experiencia volcadas hacia mí durante todo este tiempo.*

*A todos los profesores del departamento de Eléctrica por Transmitirme sus conocimientos a lo largo de mi carrera*

*Un muy especial agradecimiento a mis amigos y compañeros de aula por su apoyo y ayuda en todos los momentos difíciles por los que pase, José, Julio, Jorge, Páez, Alex, Yoismar, Daniel, Benedicto, Yasel, en fin a todos, los que no están no porque no los recuerde, siempre estarán presentes OK,*

*A Fidel y a la Revolución Cubana por darme la oportunidad de convertirme en un profesional al servicio de la Patria.*

*A todos muchas gracias*

# RESUMEN

---

El presente trabajo de diploma titulado: **Compensación de potencia reactiva a través de motores sincrónicos en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”**. El mismo esta estructurado en Introducción, Tres Capítulos, Conclusiones, Recomendaciones y Anexos.

El primer capitulo contiene el marco teórico-metodológico de la investigación, con el objetivo de establecer las bases para el desarrollo del estudio realizado. También se hace alusión a algunos de los trabajos precedentes con estrecha relación con el trabajo de diploma que se realiza, así como también se explica el sistema de suministro de la empresa y la ubicación de los compresores.

En el segundo capitulo se abordó el tema de la compensación de potencia reactiva y algunas variantes utilizadas internacionalmente. Se aborda la viabilidad de la compensación a través de los motores sincrónicos sobreexcitados que permiten la reducción de las pérdidas en el sistema de media tensión sin tener que realizar inversión y se prevé la instalación de bancos de condensadores para la disminución de las pérdidas en el sistema de baja tensión y donde fue necesario atendiendo a las mediciones y los valores obtenidos en el flujo de armónico de carga, se instalaron filtros pasivos para la reducción de los mismos.

El tercer capitulo se realizó la valoración económica y se cuantificaron las pérdidas de energía para la nueva variante y la viabilidad económica a través del Valor actual Neto (VAN), la Tasa Interna de retorno (TIR) y el período de recuperación.

Finalmente se dan las conclusiones y recomendaciones.

## *Abstract*

---

The present work of titled diploma: Compensation of power reactivates through synchronous motors in the company "Ernesto Che Guevara." The same one this structured in Introduction, Three Chapters, Conclusions, Recommendations and Annexes.

The first surrender it contains the theoretical-methodological mark of the investigation, with the objective of establishing the bases for the development of the carried out study. Allusion is also made to some of the precedent works with narrow relationship with the diploma work that is carried out, as well as it is explained the system of supply of the company and the location of the compressors.

In the second I surrender you approaches the topic of the compensation of power it reactivates and some variants used internationally. The viability of the compensation is approached through the overexcited synchronous motors that they allow the reduction of the losses in the system of half tension without having to carry out investment and you prevé the installation of banks of condensers for the decrease of the losses in the system of low tension and where he/she went necessary assisting to the mensurations and the values obtained in the flow of harmonic of load, they settled passive filters for the reduction of the same ones.

The third surrender one carries out the economic valuation and the energy losses were quantified for the new variant and the economic viability through the Net current Value (they GO), the Internal Rate of return (TIR) and the period of recovery.

Finally the conclusions and recommendations are given.

<b>CONTENIDO</b>	<b>PAGINAS</b>
<b>Introducción General</b>	1
<b>CAPÍTULO I. Marco Teórico- Metodológico</b>	4
1.1 Introducción	4
1.2 Fundamentación teórico-Metodológico	5
1.2.1 Planteamiento del Problema	5
1.2.2 Formulación de la hipótesis	5
1.2.3 Objetivos Generales	6
1.2.4 Tareas a Desarrollar para el Cumplimiento del Objetivo	6
1.3 Búsqueda y revisión de Trabajos Precedentes	7
1.4 Caracterización del suministro de la Empresa	10
1.4.1 Ubicación de los compresores y sus características	12
1.5 Conclusiones parciales	16
<b>CAPÍTULO II. Fundamentos Sobre la compensación de la potencia reactiva con el uso de Motores Sincrónicos</b>	17
2.1 Introducción	17
2.2 Influencia en el sistema con la compensación a través de motores sincrónicos	19
2.3 Formas de compensación de Potencia Reactiva	26
2.3.1 Ventajas generales de la compensación de potencia reactiva	26
2.3.2 Ventajas y observaciones de las diferentes compensaciones de potencia reactiva	27

2.3.3 Técnicas de compensación de potencia reactiva en media tensión	28
2.4 Determinación de los principales parámetros y las pérdidas con el uso del DYCSE	30
2.5 Propuesta de optimización	42
2.6 Conclusiones parciales	43
<b>CAPÍTULO III. Valoración Económica de las propuestas de trabajo</b>	44
3.1 Introducción	44
3.2 Comentarios sobre el VAN, el TIR, y el Periodo de Recuperación	45
3.3 Cálculo económico de la propuesta y tiempo de recuperación	46
3.4 Conclusiones parciales	48
<b>CONCLUSIONES GENERALES</b>	49
<b>RECOMENDACIONES</b>	50
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	51
<b>ANEXOS</b>	

## *Introducción*

---

Actualmente en nuestro país, la eficiencia eléctrica es uno de los problemas fundamentales que atentan contra la economía, por lo que se requiere de grandes esfuerzos para su solución, y ejemplo de esto es los grandes cambios y transformaciones en las empresas productoras de energía.

El año 2006, fue denominado “AÑO DE LA REVOLUCIÓN ENERGÉTICA EN CUBA”, y presupone, como lo explicó en reiteradas ocasiones el Compañero Fidel Castro Ruz, la puesta en práctica de nuevas concepciones para el desarrollo de un sistema electro energético nacional más eficiente y seguro, y un uso racional y eficiente de la energía en todos los sectores de la sociedad cubana, haciendo del ahorro de energía el sustento fundamental del desarrollo del país.

El alcance principal de los programas incluidos en la Revolución Energética en Cuba son los siguientes:

- ✓ Adquisición e instalación de equipos de generación más eficientes y seguros con grupos electrógenos y motores convenientemente ubicados en distintos puntos del país.
- ✓ Programa intensivo de investigación y desarrollo del uso de la energía eólica y solar en Cuba.
- ✓ Programa de Grupos Electrógenos Diesel sincronizados al Sistema Eléctrico Nacional (1 258 MW en 827 grupos).
- ✓ Programa intensivo de ahorro de electricidad en los sectores estatal y residencial. Cambio de bombillos incandescentes por ahorradores, sustitución de más de 2 millones de refrigeradores ineficientes y sustitución de más de 1 millón de ventiladores rústicos por nuevos y eficientes equipos. Sustitución de hornillas eléctricas rústicas por hornillas eficientes. Sustitución de aires acondicionados ineficientes.
- ✓ Nueva tarifa eléctrica residencial con un importante impacto en el ahorro.

## *Introducción*

---

- ✓ Introducción de medios de cocción eléctricos eficientes en el sector residencial en sustitución del keroseno y el gas licuado (ollas arroceras, ollas de presión eléctricas).
- ✓ Programa de rehabilitación de redes eléctricas. Construcción de 288 km de nuevas líneas de 34,5 kV y menores, sustitución de 106 000 postes dañados, aumentar la capacidad de 11 176 transformadores de distribución e instalar 16 208 nuevos, cambiar 1 276 039 acometidas y sustituir 1 745 201 interruptores inadecuados.
- ✓ Programa de Grupos de Emergencia que comprende un total de 4 158 grupos para una potencia de 711 811 kW (en hospitales, policlínicos, centros de educación, centros de comunicación, estaciones meteorológicas, instalaciones de turismo, abastos de agua, frigoríficos, panaderías y otros objetos vitales desde el punto de vista económico-social).

La Revolución Energética en Cuba no es temporal, llegó para quedarse, marcando un antes y un después. Su desarrollo está superando todos los antecedentes. Sus resultados permitirán asegurar el desarrollo económico y social en bien de los cubanos y de otros pueblos hermanos del mundo que ya se benefician de esta experiencia.

El factor de potencia es un tema muy importante para la industria. Se puede definir como la relación entre la potencia activa (KW) y la potencia aparente (KVA) y es indicativo de la eficiencia con que se está utilizando la energía (activa de 60 Hz) eléctrica para producir un trabajo útil. El factor de potencia por debajo de lo establecido por la Unión Nacional Eléctrica, limita la capacidad de los equipos y trae consigo sobrecargas peligrosas y pérdidas excesivas de energía.

Adicionalmente provoca recargos en la cuenta de energía eléctrica, los cuales llegan a ser significativos cuando el factor de potencia es reducido. El origen del bajo factor de potencia son las cargas de naturaleza inductiva, principalmente motores de inducción, luces fluorescentes, equipos electrónicos y formas de onda distorsionadas (armónicas).

## *Introducción*

---

El primer paso en la corrección de un problema de factor de potencia es prevenirlos mediante la selección y operación correcta de los equipos. Los sistemas de compensación de reactivos (condensadores principalmente) son una forma práctica y económica de mejorar el factor de potencia, sobre todo en instalaciones existentes. Su utilización puede ser un problema complejo y es conveniente recurrir a especialistas si no se cuenta con los recursos necesarios para resolverlo. Así pues el Factor de Potencia se puede definir brevemente como un “*indicador del correcto aprovechamiento de la energía eléctrica*”.

## *CAPÍTULO I*

---

### **Marco Teórico-metodológico de la investigación**

- 1.1 Introducción.**
- 1.2 Fundamentación teórico-Methodológico.**
- 1.3 Búsqueda y revisión de Trabajos Precedentes.**
- 1.4 Caracterización del Sistema de suministro de la empresa.**
- 1.5 Conclusiones parciales.**

#### **1.1 Introducción.**

El objetivo de este capítulo es lograr el basamento teórico – metodológico que se pretende desarrollar en la presente investigación, para alcanzar el objetivo general del trabajo, a partir del planteamiento del problema existente, el cual mostrara la necesidad de la realización de la investigación y las perspectivas de los resultados para la futura aplicación de los mismos.

La metodología de la investigación muestra la secuencia de los pasos por los cuales transitara el estudio y finalmente la búsqueda y revisión bibliográfica, que indica los antecedentes y la situación actual del tema.

## **1.2 Fundamentación teórica-Methodológica de la investigación.**

La formulación del problema, la justificación o necesidad de realización de un estudio, y la aplicación de los resultados, son elementos que deben tomarse en cuenta en la fundamentación metodológica de cualquier investigación.

Se hace necesaria la búsqueda de variantes que contribuyan a dar solución a la problemática que presenta el sistema de suministro de la empresa que nos ocupa, con la óptica de mejorar los índices de eficiencia de la misma, creando las condiciones adecuadas en las diferentes instalaciones, lo que propiciaría un aumento de la actividad productiva y el consiguiente desarrollo económico de la empresa.

### **1.2.1 Planteamiento del Problema.**

El problema que constituye el punto de partida de la siguiente investigación consiste en la limitación de la capacidad del sistema de generación asociado a un bajo factor de potencia y la no existencia de dispositivos compensadores de potencia reactiva en media tensión en la fábrica Comandante Ernesto Che Guevara.

### **1.2.2 Formulación de la Hipótesis.**

Si se utilizan los motores sincrónicos existentes en media tensión entonces puede mejorarse el factor de potencia y obtenerse una reducción de las pérdidas asociadas al ahorro de la energía.

### **1.2.3 Objetivos Generales.**

Establecer las oportunidades que se pueden lograr durante el proceso de compensación de la potencia reactiva con el uso de motores sincrónicos sobreexcitados.

### **1.2.4 Tareas a Desarrollar para el Cumplimiento del Objetivo.**

Los objetivos específicos que se trazaron para el cumplimiento del objetivo general se establecen a continuación:

- ❖ Establecer las oportunidades de compensación de potencia reactiva y ahorro de energía con uso de los motores sincrónicos existentes en la red.
- ❖ Reducir los costos de la compensación de la potencia reactiva por el uso de motores sincrónicos y la no adquisición de bancos de capacitares.
- ❖ Mejora de la operación de los generadores en la termoeléctrica de la Che Guevara.

### **1.3 Búsqueda y revisión de Trabajos Precedentes.**

La búsqueda y revisión de trabajos precedentes recoge la forma en que ha sido tratada por diferentes autores en la temática.

La energía eléctrica es uno de los portadores más preciados y costosos, por tal motivo, su uso adquiere una importancia especial. La particularidad de ella consiste en la igualdad en tiempo entre la generación y su consumo, de hay que el consumidor determine la línea de carga.

Mazorra (1986) [16], plantea una metodología sobre la base del análisis técnico-económico, posibilitando la minimización de las perdidas de energía en los sistemas eléctricos industriales. La potencia reactiva carga todas las capacidades de generación y transmisión, pues el dimensionado de las instalaciones no tiene que realizarse de acuerdo con la corriente total, en caso de una cuota alta de corriente reactiva se obtiene mayores secciones transversales de la potencia aparente de línea y de las potencias de los transformadores. Por tanto, un bajo factor de potencia eleva todos los costos de la instalación, además de la corriente reactiva, se elevan las pérdidas de calor de las líneas.

Controlar la potencia reactiva por diferentes métodos ha sido una de las mayores preocupaciones de los investigadores de esta rama.

Maldonado (1968) [15]. Analiza los beneficios de la instalación de bancos de capacitores en los sistemas eléctricos. Propone una metodología para realizar la compensación de la potencia reactiva en redes electro energéticas industriales con presencia de convertidores estáticos, esto mantiene vigencia pues una gran parte de la energía consumida a escala industrial es gobernada mediante convertidores, propone filtros para los armónicos que introducen los convertidores, pero no tiene en cuenta los introducidos por los bancos de capacitores propuestos para mejorar el factor de potencia.

Trabajo de Diploma del Ingeniero Noider (curso 1999 – 2000) [6]. Donde aborda los principales portadores de la empresa Mecánica del Níquel, teniendo como resultado la realización de cálculos de condensadores para la compensación del reactivo y propuesta para mejorar el sistema de suministro de la empresa.

Trabajo de Diploma de la ingeniera Gretel Parodi (curso 1999 – 2000) [18]. Este trabajo se realizó con el objetivo de proyectar el sistema de alumbrado de la planta de Lixiviación y Lavado de la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” y se determinaron las pérdidas de potencia y tensión.

Tesis en opción al Título de Master en Ciencias Técnicas Roberto Hinojosa Rivera (curso 2007 – 2008) [19]. Donde se desarrolla una metodología de cálculo para compresores centrífugos de 3 etapas con enfriadores intermedios que permitió establecer la influencia de los parámetros de trabajo que intervienen en el sistema de distribución de aire en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

En el trabajo de González I, 1999 [7] se establece un procedimiento para la compensación de la potencia reactiva, a través de un acomodo de carga en una red industrial, con un análisis de las principales medidas organizativas que pueden ser implementadas por etapas y solo después de ser valorado el efecto de las mismas, se procede a la introducción de medidas que conlleven a realización de inversiones en el sistema.

En González I en el 2004 y 2005[10] [11], aborda la optimización de la potencia reactiva con el uso de la programación dinámica, utilizando en la función objetivo una función de gasto, donde analiza diferentes niveles de tensión y fuentes de energía reactiva a instalar. Esto permite hallar un intervalo óptimo de  $n$  soluciones para los nodos del sistema. Se formula la tarea de optimización y la ubicación de los dispositivos de compensación para

---

un modelo en el que interviene un conjunto de ecuaciones diferenciales, considerándose el carácter

Dinámico del problema. Este planteamiento contrasta con los problemas de optimización estática, en los cuales se busca un punto óptimo en un espacio de  $n$  dimensiones, donde se

Maximiza o minimiza el valor de una función objetivo conocida. Este enfoque dinámico resulta poco aplicable para sistemas industriales con un considerable número de nodos, la presencia de contaminación armónica y varias fuentes de reactivo. En esa investigación se trabajó solamente con cargas de características lineales, lo que limita su utilización en sistemas industriales con fuentes generadoras de armónicos y no se consideró en su totalidad el carácter multicriterial del problema.

Hernández, 2000 [13] realiza la compensación de la potencia reactiva para una red industrial con la utilización de la programación lineal, utilizando en la función objetivo los costos de compensación y como restricciones la variación de la potencia y la cantidad de reactivo necesario a instalar en cada nodo. En este trabajo no se consideraron las cargas no lineales ni el carácter discreto del problema de compensación de potencia reactiva

En González I. en 2008 [12] se aborda la compensación de la potencia reactiva, con un enfoque multicriterial, con el uso de técnicas de optimización heurísticas (Integración de variables) integrando no sólo los costos asociado a la reducción de las pérdidas de energía obtenida por un bajo factor de potencia, sino también, incorporando algunos parámetros de calidad de la energía como es el caso de la distorsión armónica y la variación de la tensión en los nodos de la red.

#### **1.4 Caracterización del Sistema de suministro de la empresa.**

Las redes de suministro eléctrico industrial de las Empresas Metalúrgicas se caracterizan por poseer un número considerable de consumidores y subestaciones para el servicio de plantas, ubicadas en un área de dimensiones considerables, presentando características muy particulares, debido a múltiples conexiones, líneas de resistencia comparables a su reactancia con topología típicamente radial. La distribución hacia los consumidores, se hace en el nivel de media tensión de 10.5/0.48 y 6,3/0.48 kV. Otra característica de este sistema es la presencia de cargas de diferentes naturalezas, producto del equipamiento asociado a

accionamientos de gran potencia en los sistemas de transporte de fluidos, ventilación y los procesos de preparación mecánica de mineral.

El sistema de Suministro Eléctrico de media tensión de la empresa” comandante Ernesto Che Guevara” posee dos generadores acoplados al punto de distribución (DDP) donde se aprovecha parte del vapor generado para en el proceso tecnológico de la fábrica para la obtención secundaria de energía eléctrica de una tensión 10.5 kV, potencia de 15 MVA, eficiencia del 95%, 3600rpm y factor de potencia de 0.8 en los generadores. La red industrial está enlazada con el Sistema Electro energético Nacional a través de dos transformadores de tres devanados con los siguientes datos:

Devanado primario 110 kV con 40 MVA

Devanado secundario 10.5 kV con 20 MVA

Devanado terciario 10.5 kV con 20 MVA

Los transformadores de fuerza usados para la alimentación de las plantas de proceso son generalmente de tensión 10.5/0.48 y 10.5/6.0 kV. En la tabla 1.1 se muestran las principales características para los transformadores de 1600 y 2000 kVA de potencia.

Tabla 1. 1 Características de los transformadores más utilizados en las subestaciones de plantas.

$S = 1600 \text{ kVA}$	Taps	$U_p$	$S = 2000 \text{ kVA}$	Taps	$U_p$
$f = 60 \text{ Hz}$	1	10500	$f = 60 \text{ Hz}$	1	11025
$\Delta/Y_{n11}$	2	10250	$\Delta/Y_{n11}$	2	10762
$Z_{cc} = 6.3\%$	3	10000	$Z_{cc} = 5.78\% (75^\circ)$	3	10500
$I_p = 92.4 \text{ A}$	4	9750	$I_p = 110 \text{ A}$	4	10238
$U_s = 480 \text{ V}$	5	9500	$U_s = 480 \text{ V}$	5	9975
$I_s = 1925 \text{ A}$			$I_s = 2406 \text{ A}$		

Esta empresa por las características del flujo tecnológico, es considerada de producción continua en dos turnos de trabajo. El comportamiento del consumo de energía en los dos turnos de trabajos, no presenta grandes diferencias, debido a que la mayoría de los consumidores de mayor peso, funcionan de forma alterna la mayor parte del tiempo.

Para la evaluación de la red de suministro se realizaron mediciones en las subestaciones de plantas y en los principales nodos del sistema, a través de un Analizador de red PQM (*Power Quality Meter*) de la firma Multilin portátil y con la ayuda de otros medidores existentes en los diferentes nodos como parte de la red informática industrial que posee la empresa. Estas mediciones fueron tomadas para 24 horas de trabajo cada 60 ó 69 segundos donde se obtuvieron valores instantánea y en períodos de tiempo alterno (el instrumento de medición posee capacidad de memoria e interfase para el almacenamiento de los datos) ya que la instrumentación en muchos puntos del sistema permanece instalada de forma permanente respondiendo a un sistema escada de monitoreo y adquisición de datos apoyado en el software CITED.

En otros puntos de medición para la evaluación del comportamiento de cargas puntuales, se utilizó un Analizador de Redes Programables (Interlogger) de 8 canales, Versión 1.3 con tarjeta clave batimétrica. BBBB que posee las siguientes características:

- Lectura de mínima, máxima y media (4 corrientes y tensiones).
- Frecuencia instantánea (1 canal).
- Valor medio de las potencias activa, reactiva y factor de potencia para tres canales. Valor instantáneo de THD (tensión y corriente).
- Componente armónica hasta el orden 50 y memorización para tres canales.

El esquema simplificado de la red de suministro se muestra en el anexo #1 para un total de 59 nodos.

#### **1.4.1 Ubicación de los compresores y sus características.**

Los compresores en la empresa comandante Ernesto Che Guevara son utilizados para las diferentes necesidades tecnológicas como suministrar aire comprimido a los quemadores de hornos de reducción, para las necesidades de la planta de lixiviación y lavado del mineral la cual requiere de un flujo para los turboaeradores.

Los compresores se encuentran situados en la barra **1RP** la cual se alimenta de la línea PD-1-1, PD-1-2, PD-1-3 y la PD-1-4. El total de compresores sincrónicos situados en esta barra presentan funcionamientos individuales a continuación les presentamos algunos de estos funcionamientos así como sus datos nominales.

**Funcionamiento de los compresores (5K-265/4,2T):**

Existen en la planta 5 compresores de este tipo los cuales producen aire comprimido a una presión de 3,2 KgF/cm<sup>2</sup> y un volumen de 265 m<sup>3</sup>/min. Cada uno para las diferentes necesidades tecnológicas de la fábrica como:

- ✓ Temperatura neumática del aire en la tolva mezcladora. 135 m<sup>3</sup>/min.
- ✓ Transporte neumático del mineral hasta los silos 270 m<sup>3</sup>/min.
- ✓ Transporte neumático del mineral hasta las tolvas de hornos de reducción. 270 m<sup>3</sup>/min.
- ✓ Transporte neumático del polvo hasta los electro filtros. 50 m<sup>3</sup>/min.

Este aire se obtiene de los compresores 21,22 y 23. Los compresores 24 y 25 suministran aire comprimido a los quemadores de hornos de reducción en cantidades de 245 m<sup>3</sup>/min, por lo que el consumo total será de 1055 m<sup>3</sup>/min para lo cual se utilizan 4 compresores trabajando y uno de reserva.

Para el trabajo del compresor el aire es succionado desde la atmósfera a través de la cámara de succión, independientemente para cada compresor.

El aire succionado penetra a la primera etapa de compresión, a la salida de este el que pasa a través del enfriador y separador de humedad intermedio de lo cual penetra de

nuevo al compresor donde alcanza su presión nominal de 3,2 KgF/cm<sup>2</sup>, de aquí penetra en el separador de humedad final y es enviado a otro enfriador montado a la parte exterior de la planta con el objetivo de enfriar mas el aire y extraerle la mayor cantidad de aire posible antes de pasar al sistema.

Tabla 1.2 Datos de los compresores (CO-21, 22, 23, 24 y 25):

Cant	Tipo	Pn (Kw)	Un(V)	In(A)	Nn (rpm)	Efic	F.Pot	Uexc( V)	Iexc (A)
5	CTD- 1600- 3600T4	1600	10000	107	3600	91,4	0.9	48	240

### **Funcionamiento de los compresores (TK2-RVA-99-aire tecnológico):**

Existen 2 compresores de este tipo los cuales producen aire comprimido a una presión de 1,1 KgF/cm<sup>2</sup> (110 KPa), y un volumen de 40200 m<sup>3</sup>/H. Para las necesidades de la planta de lixiviación y lavado la cual requiere de un flujo para los turboaeradores.

El mando de los turbocompresores es automatizado en grado considerable, y los sistemas de regulación automático garantizan los parámetros necesarios.

El compresor se acciona por medio de motor eléctrico y el multiplicador de aire. El aire se aspira de la atmósfera a través de una cámara de succión, y el silenciador, el aire penetra en el compresor a través de la válvula de succión y se comprime en su única etapa hasta la presión de trabajo pasando después por el enfriador final y luego por el separador de humedad, por la válvula de cheque y las válvula de salida al consumidor.

Tabla 1.3 Datos de los compresores (K500-2 y3):

Cant	Tipo	Pn(Kw)	Un(V)	In(A)	Nn (rpm)	Efic	F.Pot	Uexc( V)	Iexc (A)
2	CTD- 2500- 3600T4	2500	10000	166	3600	91,2	0.9	11	230

A continuación les mostramos los datos nominales de los compresores restantes.

Tabla 1.4 Datos de los compresores 325-CO-201 (11)

Cant	Tipo	Pn(Kw)	Un(V)	In(A)	Nn (rpm)	Efic	F.Pot	Uexc( V)	Iexc (A)
1	CTKZ-16- 29-14KT4	320	6000	37	514	93	0.9	32,6	262

Tabla 1.5 Datos de los compresores 325-CO-202 y 203 (12 y 13)

Cant	Tipo	Pn(Kw)	Un(V)	In(A)	Nn (rpm)	Efic	F.Pot	Uexc( V)	Iexc (A)
2	CTKZ-16- 29-14KT4	320	6000	37	514	93	0.9	27	232

### **1.5 Conclusiones parciales.**

- En este capítulo quedo definido el Marco Teórico-Methodológico de la investigación, se analizaron los trabajos precedentes para tener una base teórica para la investigación.
- Se caracterizo el sistema de Suministro Eléctrico de media tensión de la Empresa” comandante Ernesto Che Guevara.
- Ubicación de los compresores así como sus principales características.

## *Capítulo II*

---

### **Fundamentos Sobre la Compensación de la Potencia Reactiva con el uso de Motores Sincrónicos.**

- 2.1 Introducción.**
- 2.2 Influencia de la compensación a través de motores sincrónicos en los sistemas eléctricos.**
- 2.3 Diferentes formas de compensación de potencia reactiva.**
- 2.4 Compensación de potencia reactiva con el uso del DYCSE.**
- 2.5 Propuesta de Optimización.**
- 2.6 Conclusiones parciales.**

#### **2.1 Introducción.**

La conservación energética requiere de métodos que enfoquen la solución del sobre consumo, el exceso de pérdidas y la explotación eficiente de las instalaciones desde el punto de vista técnico y económico, para lograr un mayor beneficio económico y al mismo tiempo reducir los consumos de energía. Las diferentes soluciones y medidas a implantar, deben de estar basadas en un análisis integral que se corresponda con las características específicas de cada consumidor, su problemática de operación y la explotación de procesos y equipos.

La utilización racional de la energía en la industria, constituye en estos momentos una tarea de orden prioritario por la incidencia que tiene en los indicadores técnico-económicos de la producción específica de una industria y para la economía del país. A su vez el uso

## *Capítulo II. Fundamentos Sobre la compensación de la potencia Reactiva <sup>18</sup> en sistemas industriales.*

---

eficiente de la energía, disminuye sustancialmente la contaminación ambiental y garantiza la utilización racional de los recursos energéticos no renovables.

En trabajos precedentes realizados en las fábricas de níquel en Moa, por el grupo de Eficiencia Energética del ISMM, uno de los problemas generalizados en estas redes industriales lo constituye la topología compleja de su diseño, que incluye doble alimentación de las cargas para garantizar la confiabilidad del suministro. Otra característica de estas plantas es la gran diversidad de consumidores, con variaciones de la relación  $X/R$ , gran cantidad de cargas no lineales, entre ellas variadores de velocidad. Otro aspecto importante a considerar es la existencia de problemas en la ubicación correcta de bancos de capacitores usados para la compensación de la potencia reactiva. Todo lo anteriormente planteado repercute en que los indicadores de eficiencia se encuentren por debajo de los parámetros establecidos, aumentando las pérdidas de energía de la red eléctrica.

La compensación de potencia reactiva juega un papel importante tanto para la operación como el diseño de redes de suministro eléctrico industriales, siendo su objetivo principal, proporcionar una colocación apropiada de los dispositivos correctores para asegurar la calidad de la energía suministrada al sistema, lo que garantiza la disminución de pérdidas y costo de explotación del sistema.

Una de las soluciones utilizada para la compensación de la potencia reactiva es mediante la sobrecitación de los motores sincrónicos, la instalación de bancos de capacitores, atendiendo a sus costos y baja complejidad de implementación entre otros métodos. El de instalar bancos de capacitores resulta ser económico, rápido y seguro para proporcionar la energía reactiva requerida en la red.

Las ventajas obtenidas con la mejora del factor de potencia son las siguientes.

- Disminución de recargos en la factura de energía eléctrica
- Disminución de las pérdidas de energía activa en los conductores.
- Mayor potencia disponible en el secundario de los transformadores
- Reducción de las caídas de tensión.

## **2.2 Influencia en el sistema con la compensación a través de motores sincrónicos.**

### *Potencia activa y reactiva de una máquina sincrónica conectada al sistema*

La potencia en una máquina sincrónica depende de la corriente, la tensión y el ángulo entre ellas.

$$P = mUI\cos\varphi; \quad Q = mUI\sin\varphi. \quad (2.1)$$

En las máquinas sincrónicas la corriente del inducido, depende de la corriente de excitación ( $I_f$ ) y de la posición espacial del rotor respecto a la tensión de la red ( $U_{\text{sis}}$ ), la cual se caracteriza por el ángulo ( $\delta$ ) comprendido en  $U$  y  $E_f$ . En la literatura es usual representar las potencias activas y reactivas en función de la tensión ( $U=U_{\text{sis}}$ ), la fem de excitación ( $E_f$ ) y el ángulo entre ellas ( $\delta$ ). Según (Ivanov. 306). [ ]

$$P=f(U, E_f, \delta); \quad Q=f(U, E_f, \delta). \quad (2.2)$$

Para este tipo de motor según, McPherson, la potencia de entrada es igual a la potencia de salida donde:

$$P_1 = P_2 = \frac{m_1 E_f U}{x_s} \text{sen } \delta. \quad (2.3)$$

Como se observa la aparición de potencia está dada por la presencia de una excitación  $E_f$ , por eso para que la máquina sincrónica de polos interiores pueda desarrollar una potencia, necesita de una excitación, por lo que no puede ser auto excitada.

## Capítulo II. Fundamentos Sobre la compensación de la potencia Reactiva <sup>20</sup> en sistemas industriales.

---

La representación gráfica de la ecuación 2.2 da lugar a la característica angular de la potencia activa (Fig. 2.1). De aquí se obtiene ( $P_{m\acute{a}x}$ ). Máxima potencia que puede desarrollar la máquina síncrona para ello ( $\delta = \pm\pi/2$ ) teóricamente.

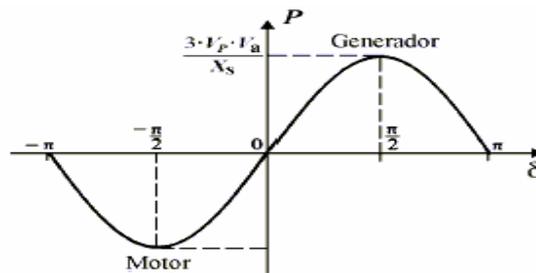


Figura 2.1 Característica angular de la potencia activa  $P = f(\delta)$

En el modo generador - motor se obtiene la potencia máxima según la siguiente expresión.

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{m_1 E_f U}{x_s}. \quad (2.4)$$

Capacidad de sobrecarga ( $k_s$ ).

$$k_s = \frac{P_{m\acute{a}x}}{P_n} = \frac{1}{\text{sen} \delta}. \quad (2.5)$$

Momento desarrollado.

$$M = \frac{P}{\omega_s} = \frac{m_1 E_f U}{\omega_s x_s} \text{sen} \delta. \quad [\text{N.m}]. \quad (2.6)$$

## Capítulo II. Fundamentos Sobre la compensación de la potencia Reactiva <sup>21</sup> en sistemas industriales.

---

Donde  $\omega_s = \frac{2\pi f}{P}$ . Velocidad angular de rotación en (rad/s).

Por su forma el momento ( $M$ ) repite la potencia con diferente escala. La multiplicidad del momento máximo ( $M_{\text{máx}}$ ) sobre el momento nominal ( $M_n$ ) es igual a  $k_s$ .

### **Potencia reactiva.**

La potencia reactiva ( $Q$ ) se expresa de forma análoga a la potencia activa ( $P$ ).

$$Q = \frac{mUE_f}{x_s} \cos \delta - \frac{mU^2}{x_s}. \quad (2.7)$$

La potencia reactiva ( $Q$ ) tiene dos componentes. La primera es la originada durante la excitación a cuenta de la corriente longitudinal  $I_f = \frac{E_f}{x_s}$ . La segunda ( $-\frac{mU^2}{x_s}$ ) y se consume por la máquina síncrona, sin excitación para originar el campo de armadura. La dependencia  $Q=f(\delta)$  para  $U_{\text{sis}}=\text{constante}$  y  $f_{\text{sis}}=\text{constante}$  se denomina característica angular de la potencia reactiva. (Fig. 2.2)

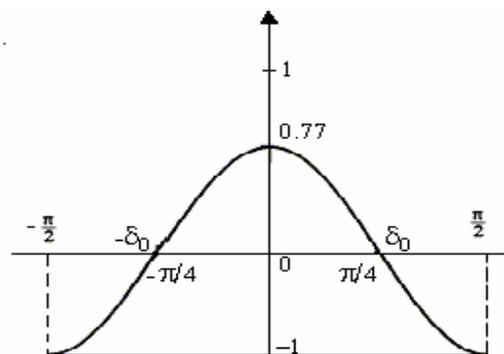


Figura 2.2 Característica angular de la potencia reactiva para  $U=1$ ,  $E_f=1.27$ ,  $X_s=1$

## *Capítulo II. Fundamentos Sobre la compensación de la potencia Reactiva <sup>22</sup> en sistemas industriales.*

---

Durante la marcha en vacío el ángulo  $\delta=0$  y la potencia alcanza su valor máximo ( $Q_{\max}$ ).

$$Q_{\max} = \frac{mU}{x_s}(E_f - U). \quad (2.8)$$

Cuando  $E_f > U_1$ , la potencia ( $Q_{\max} > 0$ ), se entrega potencia al sistema y para  $E_f < U$  se consume potencia del sistema.

La capacidad de generación de potencia reactiva depende solo de los valores absolutos de la potencia activa y del ángulo ( $\delta$ ), según (Ivanov Pág. 321).[ ]

Cuando  $P=P_n$ ,  $\cos\varphi_n=0.8$  y  $\delta=\delta_n$  la máquina desarrolla  $Q_n=\text{sen}\varphi_n$  con los ángulos  $\delta_0$  y  $-\delta_0$ . Cuando la potencia reactiva toma el valor de cero ( $Q=0$ ) y al seguir aumentando la carga activa (en valor absoluto) el ángulo  $\delta$  se hace mayor  $\delta_0$  ( $\delta > \delta_0$ ) se torna negativo ( $-\delta_0$ ) y se consume.

Cuando un motor sincrónico es sincronizado con el campo del entrehierro solo depende de la frecuencia de la línea. La potencia de salida depende completamente de la carga mecánica en el eje. Entonces la velocidad no cambia con la variación de la corriente de excitación, cambiando la corriente de excitación ( $I_f$ ) no se afecta la potencia de salida. Según (Mc Pherson Pág. 98)[ ]

Efecto de la variación de la  $I_f$  sobre la potencia.

Una alta corriente de excitación significa hacer los polos del motor más fuertes, entonces se requiere de un gran momento para que la máquina salga de sincronismo. Esto se demuestra a través del momento máximo ( $M_{\max}$ ). Es decir aumenta el momento máximo que es capaz de desarrollar y por tanto la capacidad de sobrecarga.

*Capítulo II. Fundamentos Sobre la compensación de la potencia Reactiva <sup>23</sup> en sistemas industriales.*

---

$$M_{\text{máx}} = \frac{3U_1 E_f}{\omega_s x_s} \quad (2.9)$$

Una baja corriente de excitación significa hacer más débil los polos del rotor y menor coeficiente de sobrecarga ( $k_s$ ).

La corriente de excitación afecta el factor de potencia de entrada de la línea de corriente alterna.

Esto se entiende bien, en una situación donde, la carga mecánica o potencia activa permanezca constante. Ver diagrama vectorial. (Fig. 2.3). (Fig. 2.56 Mc Pherson)

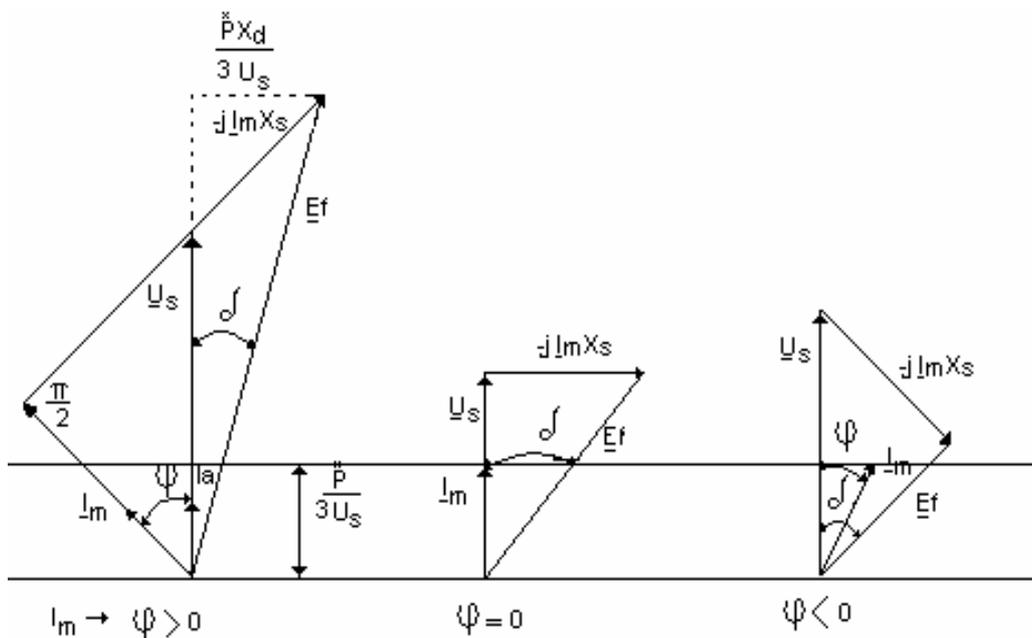


Figura 2.3 Efecto de la variación de la corriente de excitación sobre el factor de potencia de la línea de corriente alterna.

## Capítulo II. Fundamentos Sobre la compensación de la potencia Reactiva <sup>24</sup> en sistemas industriales.

---

La componente activa de la corriente y por tanto la potencia activa permanece constante.

$$I_r = I_{sen} \varphi = \frac{Q}{mU_s} \cdot \text{Variable} \quad (2.10)$$

### **Características en V.**

Para valorar la variación de la corriente de armadura al variar la corriente de excitación, se emplean las características en U o V que reflejan  $I=f(I_f)$  siendo constante la potencia activa y la tensión del sistema. Ver (Fig. 2.4).

La corriente se puede despejar de la ecuación de Fem. (2.4) Generador, (3.16) Motor y compensador, esto teniendo en cuenta la resistencia. Con máquinas grandes puede ser despreciada la resistencia. Entonces para el motor.

$$\underline{I}_m = \frac{\underline{U}_s - \underline{E}_f}{jx_s} = j \frac{\underline{E}_f}{x_s} - j \frac{\underline{U}_s}{x_s}. \quad (2.11)$$

Para el generador.

$$\underline{I} = \frac{\underline{E}_f - \underline{U}}{jx_s} = \frac{\underline{U}}{jx_s} - \frac{\underline{E}_f}{x_s}. \quad (2.12)$$

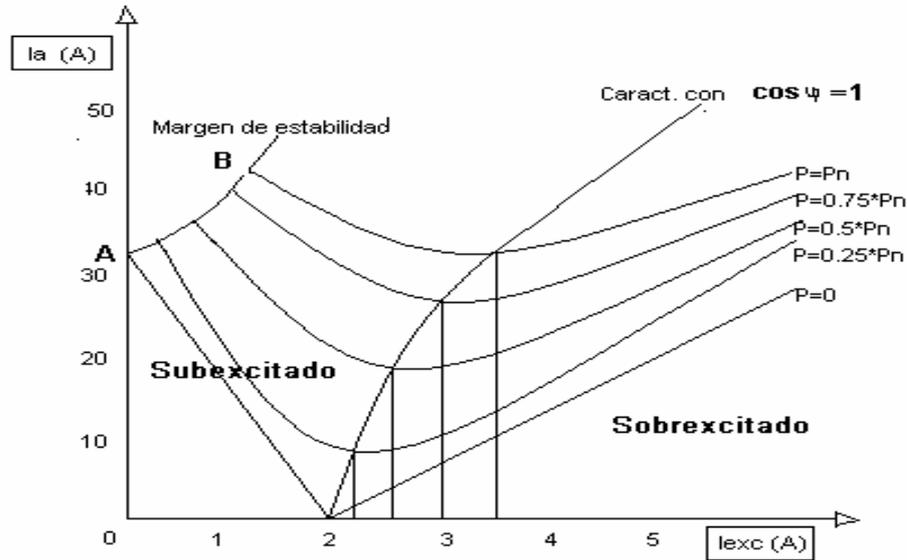


Figura 2.4 Característica en V de una máquina síncrona.

Por lo que podemos decir que la corriente de excitación solo varía la potencia reactiva.

La corriente de armadura es mínima para factor de potencia igual a uno ( $\cos\varphi = 1$ ), de lo contrario aumenta. Tiene mayor efecto la disminución, puede caer en la zona de inestabilidad o pérdida de sincronismo.

El aumento de la corriente de excitación en la zona de sobreexcitación crea una corriente de carácter capacitaba que disminuye la resultante que proviene de la fuente de alimentación, disminuyendo las pérdidas por efecto Joule en las líneas.

El incremento de las pérdidas en el motor por concepto de aumento de corriente es insignificante con la potencia reactiva generada y el efecto económico de esto último.

### **2.3 Formas de compensación de potencia reactiva.**

El factor de potencia es la relación de la potencia activa con la potencia reactiva, el mismo caracteriza la correlación de las potencias eficaces activas y reactivas. Mejorar este parámetro es una necesidad económica real. La compensación de la energía reactiva puede ser:

- ✓ Compensación del reactivo a través de la sobreexcitación de motores sincrónicos.
- ✓ Compensación del reactivo mediante la colocación de bancos de capacitores.
- ✓ Compensación del reactivo mediante la compensación activa.
- ✓ Métodos híbridos.

También pueden ser global, parcial o individual esta compensación es técnicamente ideal ya que produce la energía reactiva en el punto mismo de consumo y en cantidad rigurosamente ajustada a la demanda. A pesar de ello, esta solución es económicamente desfavorable, y conduce generalmente a una sobre compensación ya que no contempla la posibilidad de aplicación de los coeficientes de utilización y simultaneidad de las cargas.

#### **2.2.1 Ventajas generales de la compensación de potencia reactiva.**

- ✓ Reducción de descargas en las tarifas eléctricas.
- ✓ Reducción de las caídas de tensión.
- ✓ Reducción de la sección en los conductores.
- ✓ Disminución de las pérdidas y se realiza a través del efecto joule en los transformadores.

## *Capítulo II. Fundamentos Sobre la compensación de la potencia Reactiva <sup>27</sup> en sistemas industriales.*

---

### **2.2.2 Ventajas y observaciones de las diferentes compensaciones de Potencia Reactiva.**

*Compensación Global:* La compensación global trae como principal ventaja que esta suprime las penalizaciones por consumo de potencia reactiva.

Observaciones:

- ✓ La corriente reactiva esta presente en la instalación desde el 1<sup>er</sup> escalón hasta los receptores.
- ✓ Las pérdidas por efecto joules no van ha estar disminuidas.

*Compensación Parcial:* Como ventajas están entre otras

- ✓ Optimiza una parte de la instalación en cuanto a la circulación de corriente reactiva, ya que no va ha circular entre un escalón y otro.
- ✓ Se puede liberar capacidad instalada en el transformador.

Observaciones:

- ✓ Disminuye las pérdidas por efecto joule.
- ✓ La circulación de la corriente reactiva solo ocurrirá en el segundo escalón.

*Compensación individual:* Presenta las mismas ventajas antes expuestas.

*Compensación Mixta:* Es cuando utiliza o mezcla otras compensaciones.

### **2.2.3 Técnicas de compensación de Potencia Reactiva en media tensión.**

➤ *Compensación tradicional*

Las baterías de condensadores se conectan en derivación sobre la red. Pueden ser únicas o fijas: Es cuando la potencia reactiva es pequeña y la carga a compensar relativamente estable

Fraccionadas: Este tipo de compensación comúnmente se denomina en escalón (back to back en inglés y gradins en francés). Este tipo de batería es muy utilizada en grandes industrias (potencia instalada importante) y los distribuidores de energía (centrales generadoras). Permite una regulación paso a paso de la energía reactiva. La conexión o desconexión de los escalones de condensadores pueden pilotarse con relees de tipos barométrico (reguladores del factor de potencia).

➤ *Compensaciones particulares*

Compensadores estáticos instantáneos: En el caso que sea necesario una compensación variable y continua (industrias de cargas muy variables y regulación de tensión en algunas redes) se realizan instalaciones aplicando simultáneamente condensadores, inductancias variables y electrónica de potencia. El conjunto se compone generalmente de:

Una batería de condensadores fijas

Un conjunto de filtros armónicos para absorber los armónicos de la red y los propios de la instalación (electrónica de potencia)

Una inductancia variable conectada por tiristores, esta inductancia absorbe la energía reactiva excedente, generada por los condensadores. Por su parte los condensadores pueden estar conmutados por tiristores.

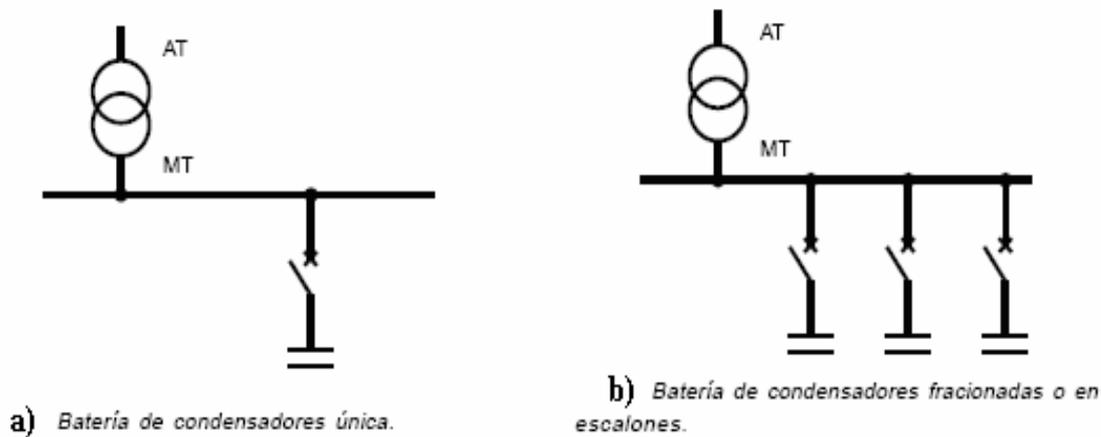


Figura 2.5 a) Batería de condensadores única, b) Batería de condensadores fraccionadas o en escalón.

➤ *Baterías en series*

En el caso de grandes redes con líneas muy largas, las baterías de condensadores pueden estar montadas en series sobre la línea. Este tipo de montaje permite una compensación adaptada permanentemente a las necesidades ya que la energía reactiva suministrada depende de la corriente que circula por la línea. Existen compensaciones de este tipo en el continente americano. Esta tecnología no se utiliza en Europa. Es necesario un sofisticado sistema de puesta en cortocircuito para evitar la descarga de los condensadores cuando por la línea circula una corriente de cortocircuito.

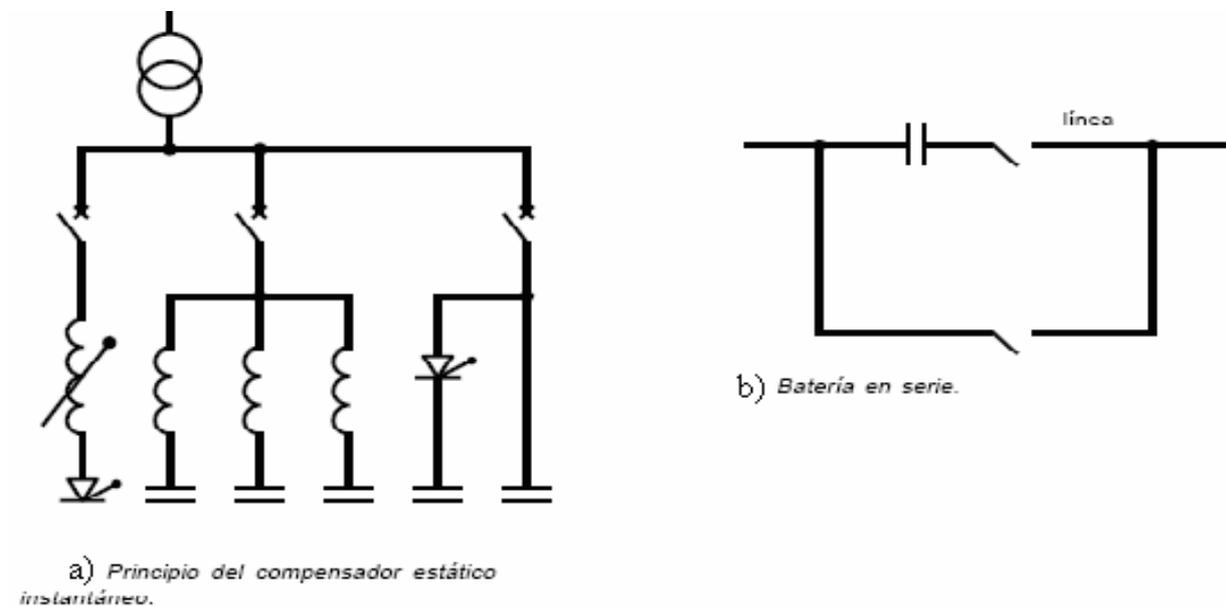


Figura 2.6 a) Principio del compensador estático instantáneo, b) Batería en serie.

## 2.4 Determinación de los principales parámetros y las pérdidas con el uso del DYCSSE.

En la empresa producto de la modernización que esta siendo objeto, se han instalado cargas con características no lineales fundamentalmente en las plantas de preparación mecánica de mineral, hornos de reducción, lixiviación y recuperación de amoníaco, lo que ha traído una serie de inconvenientes: como es el calentamiento y vibraciones en motores de inducción y en ocasiones la rotura del mismo y disparos imprevistos en las protecciones de algunos motores, ver trabajos de Tuzolana 2007 [21] y Escalona 2008 [5].

Para la modelación de la red de suministro eléctrico de la empresa Ernesto Che Guevara se empleó el programa DYCSSE. Los datos para la simulación considerando valores promedios de carga recogidos en el anexo 2 tabla 2.7. En la tabla 2.4, aparece la carga

## Capítulo II. Fundamentos Sobre la compensación de la potencia Reactiva <sup>31</sup> en sistemas industriales.

---

promedio y calculada, así como las principales magnitudes obtenidas en la simulación antes de realizar el proceso de compensación de la potencia reactiva.

A continuación se realizara la compensación de la potencia reactiva en el sistema para las condiciones iniciales.

Tabla 2.1 Nodos con sus respectivos factores de potencia en las condiciones iniciales.

Nodos	Cos $\varphi$	Nodos	Cos $\varphi$
2	0.76	36	0.81
16	0.85	38	0.81
17	0.85	40	0.78
18	0.78	42	0.72
20	0.83	44	0.60
21	0.83	46	0.72
22	0.82	48	0.92
24	0.78	49	0.76
25	0.81	50	0.67
26	0.78	51	0.81
27	0.89	52	0.92
29	0.78	53	0.83
30	0.83	54	0.92
34	0.77	55	0.78
35	0.89	56	0.78

Como se puede observar existe un bajo factor de potencia en los nodos 18, 24, 26, 29, 34, 40, 42, 44, 46, 49, 50, 55, y 56 tienen un valor igual o menor a 0.78, mientras que en el nodo principal se obtiene 0.76, lo que trae consigo perdidas en el sistema.

Tabla 2.2 Cálculo de las pérdidas de energía para las condiciones iniciales

Pérdidas de energía	\$ Costo de energía
$\Delta E_i = \Delta P \text{ (MW)} * T \text{ (hanual)}$	$\Delta E_i * 0,081$
$\Delta E_i = 1.297 * 8760$	$11361,72 * 0,081$
$\Delta E_i = 11361,72 \text{ (MW/h)}$	920,30 \$

---

**Título:** *Compensación de potencia reactiva en la empresa Comandante Ernesto Che Guevara.*  
*Yorgan Alberto Sánchez Oro*

## Capítulo II. Fundamentos Sobre la compensación de la potencia Reactiva <sup>32</sup> en sistemas industriales.

---

Para reducir estas pérdidas están previstas las siguientes condiciones.

- Cambio de régimen de trabajo de los generadores.
- La sobreexcitación de los motores sincrónicos.
- Instalación de banco de capacitores en lugar de los motores sincrónicos.

En el primer caso se obtienen una  $P = 1.444$  MW lo que trae un costo de  $\Delta E_G = 12649.44$  (MW/h) con un costo asociado de 1024,60 \$

Tabla 2.3 Nodos con sus respectivos factores de potencia cambiando el régimen de trabajo de los generadores.

Nodos	Cos $\varphi$	Nodos	Cos $\varphi$
2	0.92	38	0.82
18	0.78	40	0.78
20	0.84	42	0.73
21	0.83	44	0.61
22	0.83	46	0.73
24	0.79	48	0.93
25	0.81	49	0.76
26	0.79	50	0.67
27	0.89	51	0.81
29	0.78	52	0.93
30	0.83	53	0.83
34	0.77	54	0.92
35	0.89	55	0.79
36	0.82	56	0.78

## *Capítulo II. Fundamentos Sobre la compensación de la potencia Reactiva <sup>33</sup> en sistemas industriales.*

---

En el segundo caso teniendo en cuenta que la empresa Comandante Ernesto Che Guevara tiene instalado motores sincrónicos, en accionamientos de compresores encargados de proporcionar aire comprimido para las necesidades propias, como la instrumentación y la limpieza de talleres, ellos pueden trabajar en régimen de sobreexcitación para entregar potencia reactiva capacitiva atendiendo a su nivel de carga. Esto provocaría una mejora significativa del factor de potencia en los nodos, (21, 26, 27, 29, 30 y 35) de 10.5kV y en (20, 34, 38) de 6.0 kV (ver tabla 2.5 anexo 2). En el resto de los nodos de cargas se van a mantener los capacitores previstos.

Por esta vía de compensación no se necesita de inversión alguna por parte de la empresa ya que el motor sincrónico se utiliza en el proceso tecnológico de la misma.

A continuación se muestran algunos resultados obtenidos de la sobreexcitación de los motores sincrónicos en el nivel medio de tensión.

Tabla 2.4 Factor de potencia de los motores sobreexcitados

<b>Nodos</b>	<b>Cos <math>\varphi</math></b>	<b>Nodos</b>	<b>Cos <math>\varphi</math></b>
20	0,89	30	0,94
21	0,94	34	0,82
26	0,85	35	0,94
27	0,96	38	0,83
29	0,84		

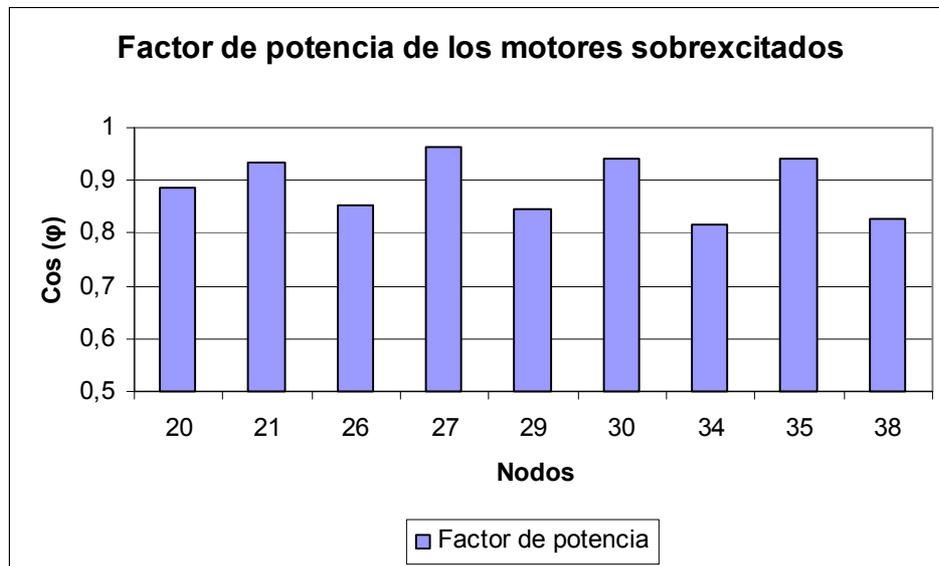


Figura 2.7 Factor de potencia de los motores sobreexcitados

Tabla 2.5 Cálculo de las pérdidas del sistema con la sobreexcitación de los motores sincrónicos.

Pérdidas de energía	\$ Costo de energía
$\Delta E_S = \Delta P \text{ (MW)} * T \text{ (anual)}$	$\Delta E_S * 0,081$
$\Delta E_S = 1.044 * 8760$	$9145.44 * 0,081$
$\Delta E_S = 9145.44 \text{ (MW/h)}$	740,78 \$

Por concepto de sobreexcitación de los motores sincrónicos se logro una disminución de  $\Delta E_S = 9145.44 \text{ (MW/h)}$  Con un costo de 740,78 \$

## Capítulo II. Fundamentos Sobre la compensación de la potencia Reactiva <sup>35</sup> en sistemas industriales.

En el tercer caso se establecerá una comparación en cuanto al ahorro entre la sobreexcitación de los motores sincrónicos y la ubicación de los bancos de capacitores en lugar de ellos. Ver tabla 2.6 del anexo 2

Tabla 2.6 Capacidad de los capacitores que se pusieron en lugar de los motores sincrónicos.

Nodos	Capacidad (MVar)	Nodos	Capacidad (MVar)
20	0.866	30	0.339
21	0.442	34	0.612
26	0.027	35	0.298
27	0.299	38	0.034
29	0.035		

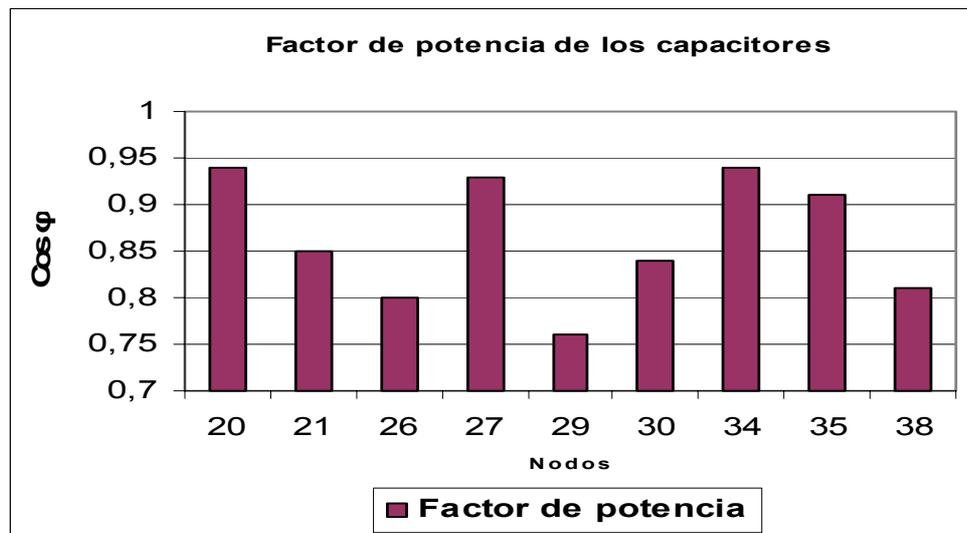


Figura 2.8 Factor de potencia de los capacitores situados en lugar de los motores sincrónicos.

*Capítulo II. Fundamentos Sobre la compensación de la potencia Reactiva <sup>36</sup> en sistemas industriales.*

---

A continuación se mostraran unas tablas de comparación entre ambas vías de solución donde se podrá observar y verificar cual de las propuestas de solución es la más rentable.

Tabla 2.7 comparación de ambas vías de solución

Vías de compensación	$\Delta$ Potencia	Pérdida anual de energía
Motores sobreexcitados	1.044 MW	9145.44 (MW/h)
Banco de capacitores	1.226 MW	10739.76 ( MW/h )

Como se puede observar en la tabla 2.7 con el empleo de los motores sincrónicos sobreexcitados se logra una reducción significativa de las pérdidas de energía. Además no se requiere realizar inversión alguna en la empresa en el sistema de media tensión.

A continuación en las tablas 2.8 y 2.9 se establece una comparación con las pérdidas existente en el sistema antes de efectuado el proceso de compensación, (condiciones iniciales) para ambos casos.

Tabla 2.8 Comportamiento del ahorro para la sobreexcitación de los motores sincrónicos

Pérdidas de energía	Ahorro
<b>Iniciales</b>	$\Delta$ ahorro= $(\Delta E_i - \Delta E_s) * 0.081$
$\Delta E_i = 11361,72$ (MW/h)=11361720 (KW/h)	$\Delta$ ahorro=(11361720 - 9145440)* 0.081
<b>Sobreexcitación</b>	$\Delta$ ahorro= 2216280* 0.081
$\Delta E_s = 9145.44$ (MW/h)= 9145440 (KW/h)	$\Delta$ ahorro= 179518,68 \$

Tabla 2.9 Comportamiento del ahorro con la instalación de los bancos de capacitores.

Pérdidas de energía	Ahorro
<b>Iniciales</b>	$\Delta$ ahorro= $(\Delta E_i - \Delta E_s) * 0.081$
$\Delta E_i = 11361,72$ (MW/h)=11361720 (KW/h)	$\Delta$ ahorro=(11361720 - 10739760 )* 0.081
<b>Banco de capacitores</b>	$\Delta$ ahorro=621970 * 0.081
$\Delta E_b = 10739.76$ (MW/h)= 10739760 (KW/h)	$\Delta$ ahorro=50378,76 \$

## Capítulo II. Fundamentos Sobre la compensación de la potencia Reactiva <sup>37</sup> en sistemas industriales.

---

Se puede notar que el ahorro debido a la reducción de las pérdidas a través de la sobreexcitación de los motores sincrónicos es 14% mayor que si consideramos bancos de capacitores con la capacidad mostrada en la tabla 2.6, sin considerar el ahorro por concepto de la no adquisición de los medios de compensación.

Una vez realizado este análisis en el sistema de media tensión teniendo en cuenta que en las subestaciones de plantas en algunos casos se tiene un factor de potencia por debajo de 0,90, en este caso se prevé la instalación de bancos de capacitores para el mejoramiento del mismo y la disminución de las pérdidas. Además de prever la instalación de filtros pasivos debido a que el total de distorsión armónica de tensión superaba el 5% reglamentado según la norma internacional IEEE-519 [17].

Tabla 2.10 Nodos propuesto para la instalación de capacitores

<b>Nodos</b>	<b>Capacidad (MVar)</b>		<b>Frecuencia de sintonía</b>
18	0.033		Capacitiva
22	0.121		Capacitiva
24	0.106		Capacitiva
25	1.513		Capacitiva
36	0.081		Capacitiva
40	0.032		Capacitiva
42	0.821		Capacitiva
44	0.418		Capacitiva
46	0.458		Capacitiva
49	0.239		Capacitiva
50	0.335		Capacitiva
51	0.434		Capacitiva
53	1.145		Capacitiva
<b>Filtros</b>	<b>Capacidad (MVar)</b>	<b>Armónico que filtra</b>	<b>Frecuencia de sintonía</b>

55	0.08167	7	420
56	0.08333	5	300
	0.1225	7	420

En el caso de los filtros atendiendo a las mediciones (la frecuencia de aparición de los armónicos) y las corridas de flujos realizadas ver tablas 2.1, 2.2 y 2.3 del anexo #2 y los valores recomendados por la norma IEEE-519[17]. Se determina su potencia  $Q_f$  a partir de la mejora admisible por el nodo del  $\cos \varphi$  y la reducción de la contaminación a valores recomendados por las normas.

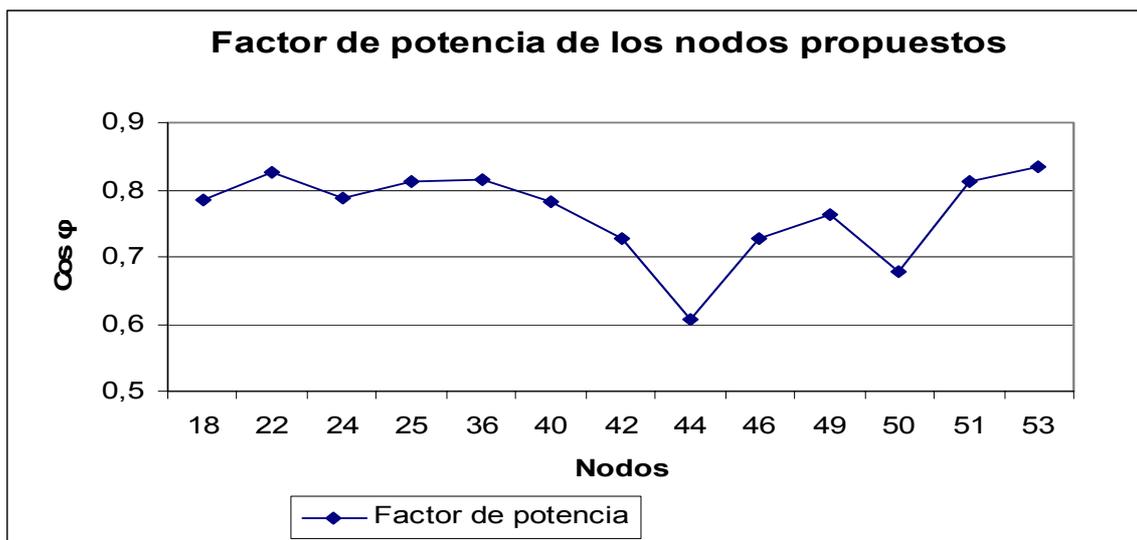


Figura 2.8 Cos ( $\varphi$ ) antes de la compensación de la potencia reactiva

Ver anexo 2 tabla 2.12 y 2.13 Valor de los THDv en % obtenido en la simulación en el DYCSSE para las condiciones iniciales sin banco de capacitores. . A continuación se muestra una grafica con los valores de THDv mayores de un 5%

*Capítulo II. Fundamentos Sobre la compensación de la potencia Reactiva <sup>39</sup> en sistemas industriales.*

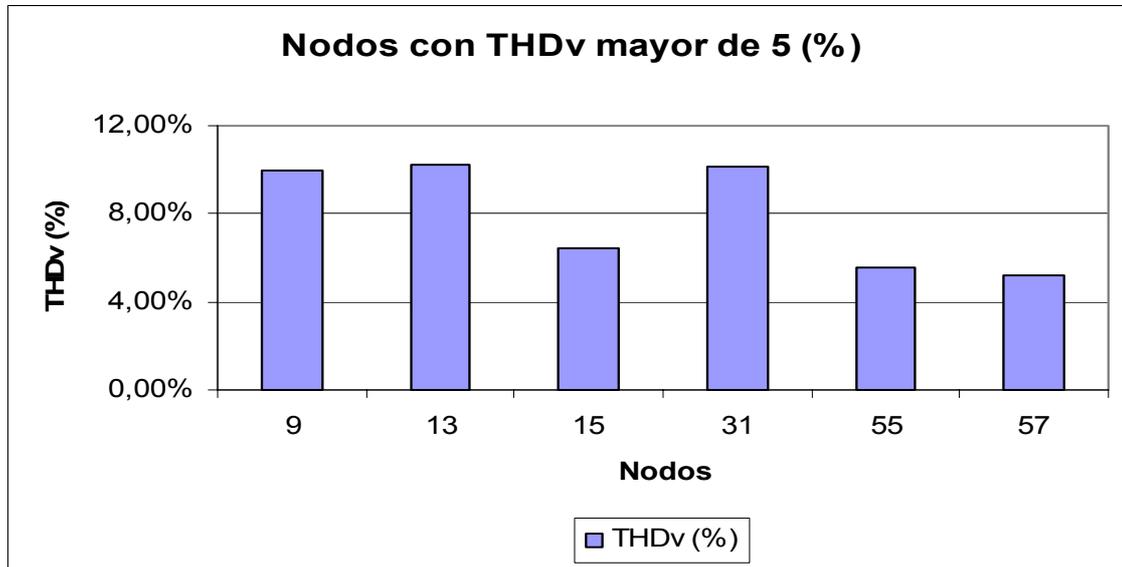


Figura 2.8 Nodos con THDv mayor de 5 (%)

Independientemente que se ha utilizado para la compensación Motores sincrónicos sobreexcitados aun en el sistema existen pérdidas asociadas fundamentalmente a la subestación de plantas. Para continuar con la reducción de estas pérdidas se procede a la colocación de bancos de capacitores en los nodos antes propuestos.

Tabla 2.11 Nodos con la instalación de los bancos de capacitores.

Nodos	Capacidad (MVar)	Cos ( $\phi$ )	Nodos	Capacidad (MVar)	Cos ( $\phi$ )
18	0.010	0.82	42	0.106	0.75
22	0.030	0.85	44	0.217	0.75
24	0.012	0.80	46	0.061	0.75
25	0.995	0.90	49	0.015	0.77
36	0.025	0.85	50	0.143	0.77
40	0.005	0.80	51	1.534	0.90
			53	0.191	0.85

*Capítulo II. Fundamentos Sobre la compensación de la potencia Reactiva <sup>40</sup> en sistemas industriales.*

Tabla 2.12 Cálculo de las pérdidas de energía con la instalación de los bancos de capacitores.

Pérdidas de energía	\$ Costo de energía
$\Delta E_S = \Delta P \text{ (MW)} * T \text{ (anual)}$	$\Delta E_S * 0,081$
$\Delta E_S = 1.271 * 8760$	$11133.96 * 0,081$
$\Delta E_S = 11133.96 \text{ (MW/h)}$	901,85 \$

Ahora se procede a realizar una comparación en cuanto al factor de potencia que presentaban los nodos propuestos para la ubicación de los bancos de capacitores antes y después de ubicados los bancos de capacitores.

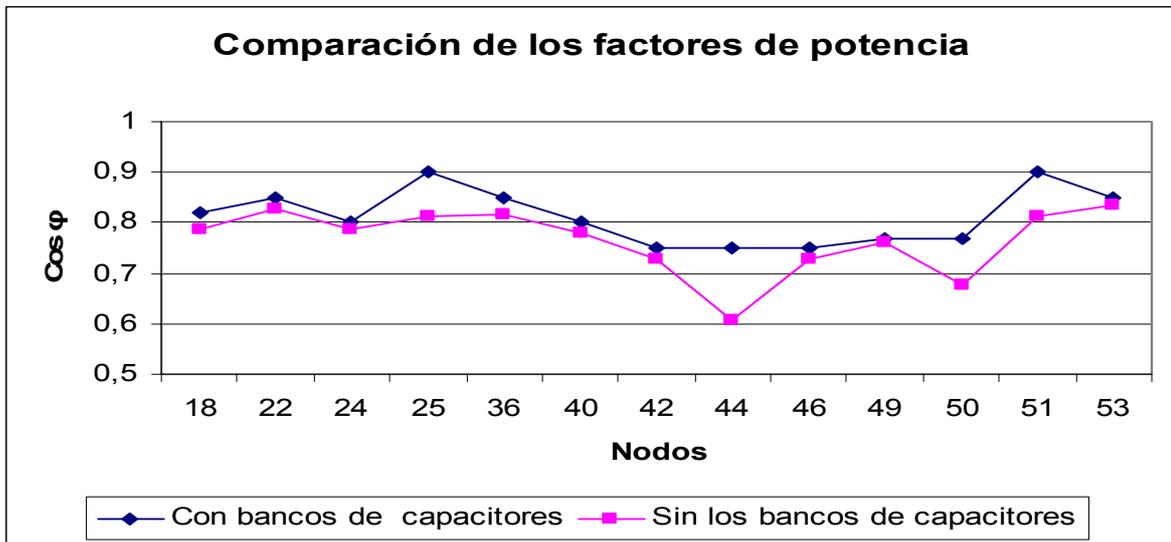


Figura 2.10 Comparación de los factores de potencia antes y después de instalados los bancos de capacitores.

*Capítulo II. Fundamentos Sobre la compensación de la potencia Reactiva <sup>41</sup> en sistemas industriales.*

Como se vio con la colocación de los bancos de capacitores se logro una disminución de  $\Delta E_s=11133.96$  (MW/h) y representa un costo de 901,85 \$.

En las tablas 2.14 y 2.15 del anexos 2 se realiza un analiza el contenido de armónico obtenidos en la simulación del sistema con la ubicación de los bancos de capacitores. A continuación se muestra una gráfica con los valores de THDv mayores de un 5%

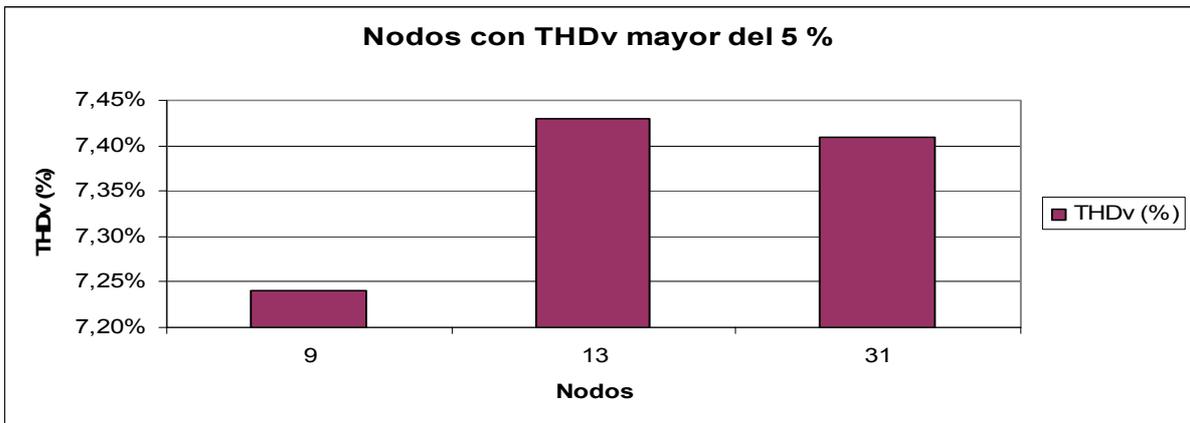


Figura 2.8 Nodos con THDv mayor de 5 (%)

Tabla 2.13 Comportamiento del ahorro con la instalación de los bancos de capacitores.

<b>Pérdidas de energía</b>	<b>Ahorro</b>
<b>Iniciales</b>	$\Delta \text{ ahorro} = (\Delta E_i - \Delta E_s) * 0.081$
$\Delta E_i = 11361,72$ (MW/h) = 11361720 (KW/h)	$\Delta \text{ ahorro} = (11361720 - 11133960) * 0.081$
<b>Banco de capacitores</b>	$\Delta \text{ ahorro} = 227760 * 0.081$
$\Delta E_b = 11133.96$ (MW/h) = 11133960 (KW/h)	$\Delta \text{ ahorro} = 18448.56$ \$

## **2.5 Propuesta de Optimización.**

El grado de precisión de los estudios, para la compensación de la potencia reactiva, depende de los efectos tomados en consideración, así como de las herramientas aplicadas para su solución. Es por eso, que durante el proceso de la compensación de la potencia reactiva, se recomienda involucrar indicadores técnico-económicos, que permitan hallar soluciones que aporten un compromiso razonable entre ellos, logrando una mayor eficiencia y un mejor desempeño en el funcionamiento de la red.

Este problema de la compensación de la energía reactiva, ha sido tratado por un grupo considerable de autores de forma multicriterial, los cuales han considerado, un conjunto de restricciones que dependen fundamentalmente de las características del sistema y de los costos asociados a la compensación, otros han incluido en su análisis la distorsión armónica de las cargas no lineales. En la actualidad se observa una tendencia al uso de técnicas evolutivas que permiten abordar el problema desde toda su complejidad a través de funciones multicriteriales (ver González en 2007 [11]). Dentro de los métodos heurísticos más utilizados relacionados a la compensación de la potencia reactiva han sido los Algoritmos Genéticos (AG).

El método empleado en la presente tesis es el método de integración de variables y basa su funcionamiento en utilizar no necesariamente un código variable para describir las posibles soluciones, sino cualquier cantidad de ellos y cualquier conjunto de operadores para actualizar los miembros de la población ver González, 2008[ 12 ].

## **2.6 Conclusiones parciales.**

- Se establecieron los métodos de compensación de la potencia reactiva en sistemas industriales, así como sus principales ventajas.
- Fue utilizado el programa DYCSSE para la simulación del esquema de suministro de la Che Guevara para la obtención de los flujos de potencia así como sus principales magnitudes eléctricas en la simulación se obtuvo pérdidas anuales de energía en el orden de  $\Delta E_i = 11361,72$  (MW/h) antes de realizada la compensación.
- Se procedió a la sobreexcitación de los motores sincrónicos en el sistema de media tensión y la colocación de bancos de capacitores en el sistema de baja tensión.
- Se realizó una comparación entre la ubicación de bancos de capacitores y con la sobreexcitación de los motores sincrónicos, donde se obtuvo ahorros superiores a un 14% en comparación con los bancos de capacitores.

---

*Capítulo III*

---

## **Valoración Económica de las propuestas de trabajo**

- 3.1** Introducción.
- 3.2** Comentarios sobre el VAN, el TIR, y el Periodo de Recuperación.
- 3.3** Cálculo económico de la propuesta y Tiempo de recuperación.
- 3.4** Conclusiones parciales.

### **3.1 Introducción.**

Este capítulo tiene como objetivo principal realizar la cuantificación económica del proyecto de eficiencia energética en la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara. El análisis económico es una condición totalmente necesaria para el funcionamiento exitoso de cualquier sistema económico de una empresa y de la economía nacional.

---

### 3.2 Comentarios sobre el VAN, el TIR, y el Periodo de Recuperación.

#### **Valor Actual Neto (VAN).**

Para calcular el VAN de un proyecto cualquiera se calcula simplemente el valor actual de las entradas futuras al costo apropiado de capital y del resultado se resta el desembolso original. El criterio para aceptar o rechazar de acuerdo con el VAN es el siguiente. *Acéptese si el VAN del proyecto que se propone es positivo y Rechácese si es negativo.* Expresado por medio de símbolos.

$$VAN \geq 0 \text{ Aceptar}$$

$$VAN < 0 \text{ Rechazar}$$

#### **Tasa Interna de Rendimiento (TIR).**

La Tasa Interna de Rendimiento, o tasa de rendimiento como se le llama a veces para abreviar, es la tasa de descuento capaz de igualar la serie de ingresos futuros con el desembolso original. Dicho de otro modo, es aquella tasa de descuento que da al proyecto un VAN de cero. Expresado en símbolo, la TIR vendría a ser lo que la empresa recupera por cada peso invertido, si la TIR calculado resulta ser por ejemplo 35 % eso significa que la empresa recuperara 35 centavos por cada peso invertido

#### **Periodo de Recuperación (PR).**

El periodo de recuperación es una medida de la rapidez con que el proyecto reembolsara el desembolso original de capital. Este periodo es el número (#) de años que la empresa tarda en recuperar el desembolso original mediante las entradas de efectivo que produce el proyecto.

*Los proyectos que ofrezcan un periodo de recuperación inferior a cierto número de año(N) determinado por la empresa, se aceptarán. Los que ofrezcan un periodo mayor que el # de años determinado se rechazarán. .*

---

### **3.3 Cálculo económico de la propuesta.**

El cálculo económico se realizará teniendo en cuenta las medidas propuestas que nos conllevan a inversiones por parte de la empresa, a demás del análisis teniendo en cuenta la inversión que se realizará si se toma la decisión de la implantación de los bancos de capacitores para la compensación de la potencia reactiva.

En primer caso se plantea la utilización de los motores sincrónicos sobreexcitados que se encuentran instalados en la empresa Comandante Ernesto Che Guevara, para los cuales se hicieron las simulaciones pertinentes con la ayuda del DYCSE. Con la sobreexcitación de estos motores se reducen las pérdidas y se alcanzan valores de factor de potencia aceptables, esta medida no requiere ninguna inversión por parte de la empresa.

Por lo contrario la instalación de los bancos de capacitores a demás de reducir considerablemente las pérdidas en el sistema y mejorar grandemente el factor de potencia, esta si conllevaría a una inversión por parte de la empresa.

El cálculo económico se realizó con la ayuda del DYCSE, en el cual se calcularon el VAN, TIR, y período de recuperación de la empresa. Para el cálculo se tomo el valor de 1 KW como (0.081) según Escalona 2008 [5].

A continuación se presenta un estudio del impacto que produce la compensación de la potencia reactiva en los sistemas eléctricos, para ello se han cuantificado las pérdidas actuales que se tienen en el sistema, el costo que representa la implementación de las inversiones necesarias, el valor del Valor Actual Neto, la Tasa de Rendimiento Interno y el tiempo de recuperación para cada proyecto analizado.

Los indicadores dinámicos para la evaluación de las inversiones, parten del desarrollo de un modelo, en el que se consideran las entradas (ingresos) y las salidas (gastos) de efectivo a causa de realizar el proyecto, calculando el flujo resultante para varios años.

El Valor Actualizado Neto es el resultado de sumar todos los años del proyecto para tener cual es la masa de dinero que se tendrá al término de la vida útil del proyecto, evaluada en el día de hoy. Esto resultaría una suma algebraica, teniendo en cuenta que el dinero pierde valor en el tiempo, y a cada año se afecta por un factor decreciente, que depende de la tasa de actualización que se estime. Esta tasa con frecuencia se toma entre un 10 a 15 %.

La tasa de descuento tomada en el trabajo es de 13 %, para un período de 5 años y un 45 % de interés.

Para la determinación de los costos indirectos de cada proyecto o solución, se consideraron los siguientes factores: depreciación generalmente es de un 6 %, contingencias 12 %, escalamiento 5 %, flete de un 4 un 8%. Por lo general cuando se carece de una información detallada para determinar los costos indirectos se puede asumir un 30 % de los costos directos del proyecto.

El costo de los capacitores se considera según el manual de la General Eléctric [8] entre 11.340 y 50.00 \$ /kVAr instalado, mientras que el reactivo se cotiza según la oferta de la firma suministradora Viroex, S.L, a 89 \$/ kVAr.

Tabla 3.1 indicadores económicos de la propuesta

Parámetros económicos	Solución de la propuesta de trabajo
Costo total Qc (CUC)	84147.46
Costo total Filtros ( CUC)	39349.00
Costo Operación ( CUC)	37078.93
VAN (CUC)	206674.06
TIR (%)	48.29
Tiempo de recuperación (Años)	2.52

### **3.4 Conclusiones parciales.**

- En este capítulo se trató la cuantificación económica del proyecto de eficiencia energética en la empresa Comandante Ernesto Che Guevara.
- También se desarrollaron algunos comentarios sobre el VAN, TIR, y Periodo de recuperación.
- Se desarrollaron los cálculos pertinentes para la solución económica con la ayuda del DYCSE. Donde se lograron valores significativos como un 206674.06 \$ de VAN y un TIR de 48.29 %.
- Se logró un tiempo de recuperación de 2.52 años acorde con las exigencias de la empresa las cuales oscilan entre 2.52 y 4.32 años.

Con este trabajo se alcanzaron las siguientes conclusiones:

- ✓ En el trabajo se trató la influencia en el sistema con la compensación de la potencia reactiva.
- ✓ Con la ayuda del régimen de trabajo de los generadores se obtiene 0.92 en el nodo principal lo que conlleva a un incremento de las pérdidas en el sistema que están en el orden de los 1,444 MW.
- ✓ Con este régimen de trabajo las pérdidas de energía anuales se encuentran en el orden de los 12649.44 (MW\*h).
- ✓ Con la ayuda de la sobreexcitación de los motores sincrónicos se obtiene una reducción en las pérdidas anuales de energía de 9145.44 (MW\*h), representando un 72 % de las existentes en las condiciones iniciales.
- ✓ Con esta reducción de las pérdidas por concepto de sobreexcitación de los motores se obtuvo un ahorro de 179518,68 CUC.
- ✓ Se instalaron filtros pasivos, para contrarrestar los sobrecalentamiento en cables y transformadores, disparo de interruptores. Estos deben ser capaces de soportar la presencia reactiva necesaria en la red y además absorber las corrientes armónicas, evitando su propagación hacia el resto de las cargas.
- ✓ Para la reducción de las pérdidas aun existentes en el sistema se procedió a la colocación de bancos de capacitores. Con la colocación de estos bancos se redujeron considerablemente las pérdidas en el sistema en comparación con las existentes en las condiciones iniciales.
- ✓ Con el cálculo económico de la propuesta de trabajo se alcanzaron los valores esperados, se logró que el tiempo de recuperación oscilara entre los valores exigidos por la empresa, así como los Valores del VAN, y el TIR.

- ✓ Es necesario la capacitación, motivación y crear una cultura energética que contribuya de forma eficiente a los programas de ahorro de energía.
- ✓ Valorar la introducción paulatina de los motores sincrónicos como compensadores de potencia reactiva en el sistema de media tensión.

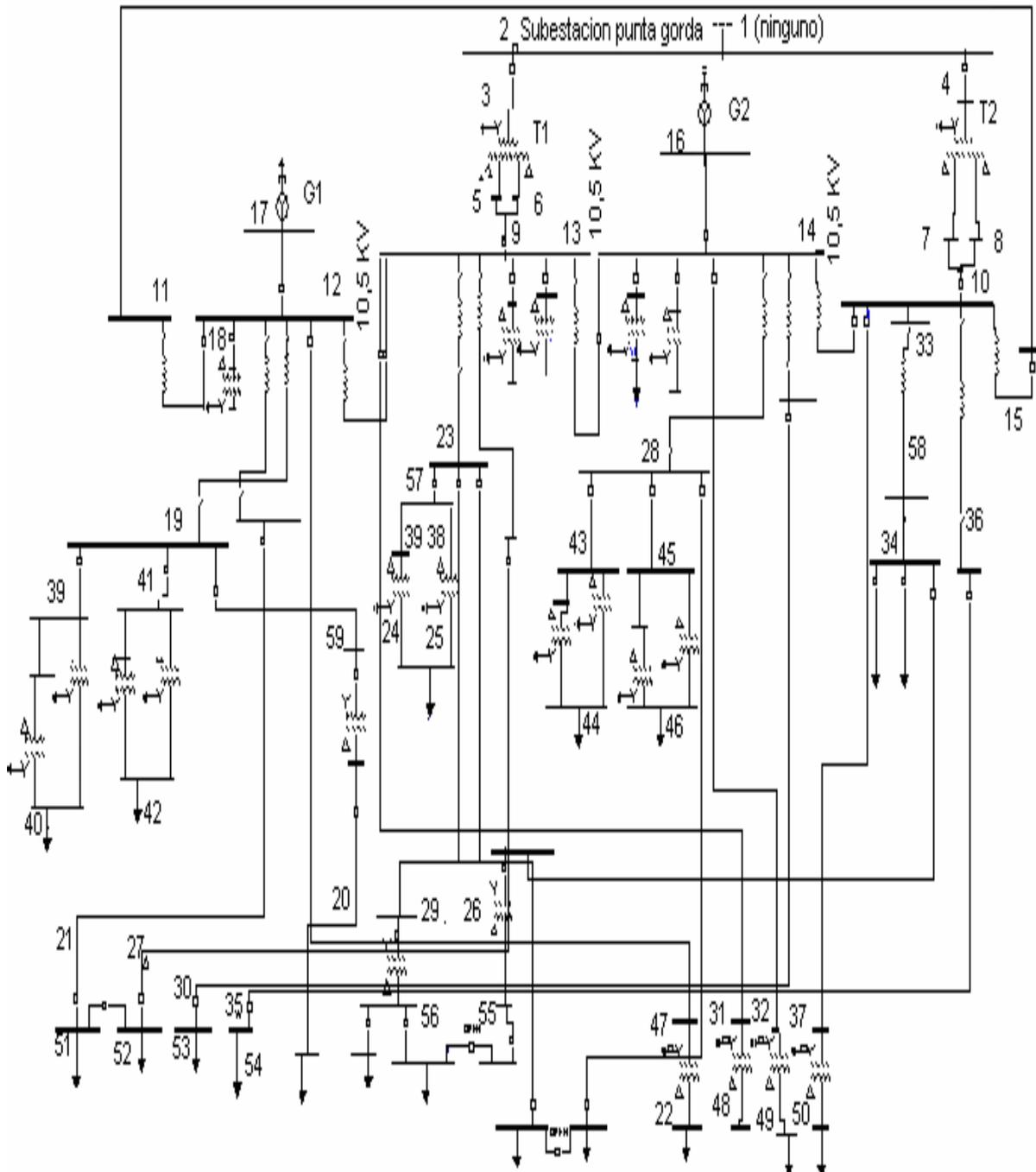
- 
1. Aníbal E. Borroto Nordelo y José P. Monteagudo Yanes. Centro de Estudio de Energía y Medio Ambiente. *GESTIÓN ENERGÉTICA* en el Sector Productivo y los Servicios. Cienfuegos 2006.
  2. Crespo, Infante, E. Compensación de potencia reactiva en presencia de convertidores. Revista Ingeniería Electro energética. No 3, 1988
  3. Colome Arias R. Eficiencia y reestructuración de cargas en las subestaciones de baja tensión de la empresa Mecánica del Níquel. Trabajo de diploma. Año 2000-2001.
  4. De Quesada, Martínez, A. Optimización de reactivos en circuitos eléctricos industriales. Revista Ingeniería Electro energética. No 3, 1988.
  5. Escalona P. O. Análisis de Armónicos en la Empresa Cmte Ernesto Che Guevara. Tesis de Maestría. 2008.
  6. Gómez. C. Noider. Estudios del consumo de portadores energéticos en la empresa Mecánica del Níquel. Trabajo de diploma. Año 1999-2000
  7. González P.I. Estudio de portadores energéticos de la planta hornos de reducción en la Empresa Ernesto Che Guevara. Tesis de Maestría. ISMM. Moa 1999 b.
  8. González P.I, Ramírez M. S., Legrá L A. Metodología para el control de la calidad en sistemas de suministro eléctricos en redes industriales. Santiago de Cuba. FIE 2002.
  9. González P.I, Legrá L A, Ramírez M. S.,” Diseño y desarrollo del software DYCSSE Versión 1.0”. Simposio Internacional Eléctrica 2003. Villa Clara.

- 
10. González P.I, Marrero R.S. "Optimización y control de la compensación de potencia reactiva con el uso de la programación dinámica". Revista Energética, Vol. XXV, No. 2-2004.
  11. González P. I, Legrá L. A., Marrero R. S., Arzola R. J. "Optimización de la Compensación de la Potencia Reactiva en Redes de Suministro Eléctrico Industriales con el empleo de un algoritmo de criterios múltiples". Parte I. Revista Energética, Volumen XXVII, No. 2/2006.
  12. González P. I, Legrá L. A., Marrero R. S., Arzola R. J. "Optimización de la Compensación de la Potencia Reactiva en Redes de Suministro Eléctrico Industriales con el empleo de un algoritmo de criterios múltiples". Parte II. Revista Energética, Volumen XXVIII No. 1/2007
  13. Hernández. R. Gabriel. Eficiencia en los suministros eléctricos industriales de baja tensión. Trabajo de diploma al título de Master. Año 1999-2000.
  14. Maldonado. J, F. Instalación de capacitor en circuitos eléctricos. Revista Tecnología. 1968.
  15. Manual de capacitores. General Eléctric 2005.
  16. Mazorra, Soto. J. Metodología para la minimización técnico económico de las pérdidas de energía en los sistemas eléctricos industriales. Revista Energía. No 1, 1986.
  17. Norma IEEE 519-1992. Recomendaciones Prácticas y Requerimientos de la IEEE para el Control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia. IEEE. New York. 1993.

- 
18. Parodi. Gretel Trabajo de diploma. Año 1999-2000.
  19. Rivera. Hinojosa. H. Evaluación de la eficiencia energética de la empresa Comandante “Ernesto Che Guevara”. Trabajo de diploma en Opción al título de master en Ciencia Técnicas. Año 2007-2008.
  20. Schneider Electric. Biblioteca Técnica.
  21. Tuzolana M. Evaluación del Comportamiento de las cargas no lineales en la Planta de Lixiviación y Lavado de la Empresa Cmdt. Ernesto Guevara. Tesis de Grado. ISMM. 2007.
  22. <http://www.schneiderelectric.com> Página principal de Schneider Electric.
  23. <http://eclipse.modicon.com> Página de servicio y apoyo a aplicaciones de automatización industrial.
  24. <http://preventa.schneiderelectric.es> Presentación e información acerca de sistemas de seguridad de máquinas Preventa de Telemecanique.
  25. Internet Web Site: [www.ge.com/capacitor](http://www.ge.com/capacitor)

# Anexo #1

Tabla 1.1 Esquema simplificado de la red de suministro para un total de 59 nodos.



## Anexo #2

Tabla 2.1: Límites de la distorsión armónica para sistemas de distribución según la norma IEEE 519- 1992.

Tensión	Distorsión de tensión individual, THI %	Distorsión de tensión total, THD%
$U \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < U \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$U > 161 \text{ kV}$	1.0	1.5

Tabla 2.2: Bases para la limitación de corrientes armónicas en IEEE 519 – 1992.

$R_{\text{H}}$ (en el PCC)	Máxima en las armónicas individuales de la tensión <sup>(1)</sup> (%)	Suposición relacionada
10	2.50 – 3.00	Sistema dedicado
20	2.00 – 2.50	1 – 2 consumidores grandes
50	1.00 – 1.50	Algunos consumidores relativamente grandes
100	0.50 – 1.00	5 – 20 consumidores de tamaño medio
1000	0.05 – 0.10	Muchos consumidores pequeños

<sup>(1)</sup> Porcentaje de la tensión de frecuencia fundamental

Tabla 2.3: Límites de inyección de corriente armónico según la IEEE 519 – 1992.

<b>Sistemas de distribución (120 V – 69 kV)</b>						
$\frac{I_h}{I_L}$	Tasa individual admisible en relación a $I_L$ (%)					TDD (%)
	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	
< 20 <sup>(1)</sup>	4.00	2.00	1.50	0.60	0.30	5.00
20 – 50	7.00	3.50	2.50	1.00	0.50	8.00
50 – 100	10.00	4.50	4.00	1.50	0.70	12.00
100 – 1000	12.00	5.50	5.00	2.00	1.00	15.00
> 1000	15.00	7.00	6.00	2.50	1.40	20.00
<b>Sistemas de distribución (69 kV – 161 kV)</b>						
< 20 <sup>(1)</sup>	2.00	1.00	0.75	0.30	0.15	2.50
20 – 50	3.50	1.75	1.25	0.50	0.25	4.00
50 – 100	5.00	2.25	2.00	0.75	0.35	6.00
100 – 1000	6.00	2.75	2.50	1.00	0.50	7.50
> 1000	7.00	3.50	3.00	1.25	0.70	10.00
<b>Sistemas de distribución (&gt; 161 kV)</b>						
< 50 <sup>(1)</sup>	2.00	1.00	0.75	0.30	0.15	2.50
$\geq 50$	3.00	1.50	1.15	0.45	0.22	3.75
<i>(1) Todos los equipos de generación están limitados a estos valores de distorsión de corriente, con independencia del valor de <math>\frac{I_h}{I_L}</math>.</i>						
<i>(*) Los armónicos pares están limitados a un 25 % de los límites para los armónicos impares.</i>						
<i>(**) No está permitida la inyección de componentes de corriente continua.</i>						

Tabla 2.4: Principales magnitudes obtenidas en la simulación antes de realizar el proceso de compensación de la potencia reactiva.

<b>Nodos</b>	<b>P(MW)</b>	<b>Q (MVar)</b>	<b>S (MVA)</b>	<b>UnR</b>	<b>UnI</b>	<b>Un</b>	<b>% Caída U</b>	<b>Cos (φ)</b>
2	17.294	14.647	22.663	1.000	0.000	110.000	0.000	0.763
18	-0.110	-0.087	0.140	0.971	-0.013	0.466	2.918	0.785
20	-5.004	-3.290	5.989	0.948	-0.037	5.695	5.091	0.836
21	-2.500	-1.349	2.841	0.960	-0.008	10.077	4.028	0.832
22	-0.473	-0.323	0.573	0.967	-0.018	0.464	3.254	0.826
24	-0.354	-0.277	0.449	0.956	-0.026	0.459	4.413	0.788
25	-4.272	-3.064	5.257	0.910	-0.046	5.468	8.873	0.813
26	-0.132	-0.091	0.160	0.974	-0.007	10.226	2.607	0.787
27	-1.164	-0.721	1.369	0.976	-0.008	10.251	2.367	0.891
29	-0.250	-0.156	0.295	0.976	-0.007	10.245	2.426	0.783
30	-2.500	-1.549	2.941	0.963	-0.006	10.116	3.662	0.830
34	-1.322	-1.092	1.715	0.964	-0.021	5.784	3.605	0.771
35	-1.160	-0.719	1.365	0.971	-0.020	10.200	2.858	0.898
36	-0.287	-0.203	0.352	0.961	-0.024	0.461	3.871	0.816
38	-0.132	-0.082	0.155	0.935	-0.049	5.618	6.363	0.815
40	-0.100	-0.080	0.128	0.974	-0.010	0.468	2.598	0.781
42	-1.800	-1.693	2.471	0.943	-0.032	0.453	5.613	0.728
44	-0.506	-0.663	0.834	0.958	-0.016	0.460	4.192	0.607
46	-0.997	-0.940	1.371	0.948	-0.029	0.455	5.164	0.727
48	-0.050	-0.020	0.054	0.977	-0.008	0.469	2.294	0.928
49	-0.651	-0.554	0.855	0.961	-0.020	0.461	3.861	0.762
50	-0.556	-0.604	0.821	0.959	-0.021	0.461	4.034	0.677
51	-6.545	-4.704	8.060	0.922	-0.005	5.530	7.832	0.812
52	-1.425	-0.577	1.537	0.969	-0.022	0.465	3.043	0.927
53	-4.344	-2.884	5.214	0.942	-0.032	0.453	5.728	0.833
54	-6.699	-2.790	7.257	0.948	-0.060	0.456	5.009	0.923
55	-0.951	-0.744	1.207	0.966	-0.016	0.464	3.410	0.788
56	-1.713	-1.358	2.186	0.961	-0.022	0.461	3.904	0.784

Tabla 2.5: Principales magnitudes obtenidas en la simulación después de realizado el proceso de compensación de la potencia reactiva con los motores sincrónicos sobrecitado.

<b>Nodos</b>	<b>P(MW)</b>	<b>P.RealAcum</b>	<b>S (MVA)</b>	<b>Cos (φ)</b>
2	14.295	0.000	16.062	0.890
16	15.000	-0.000	17.649	0.850
17	15.000	0.000	17.649	0.850
18	-0.110	-0.110	0.140	0.785
20	-5.004	-5.004	5.989	0.836
21	-2.500	-9.320	2.841	0.935
22	-0.473	-0.473	0.573	0.826
24	-0.354	-0.354	0.449	0.788
25	-4.272	-4.272	5.257	0.813
26	-0.132	-1.084	0.160	0.787
27	-0.233	-1.659	0.274	0.964
29	-0.250	-1.967	0.295	0.783
30	-1.500	-5.857	1.765	0.940
34	-1.322	-1.322	1.715	0.771
35	-0.696	-7.420	0.819	0.940
36	-0.287	-0.287	0.352	0.816
38	-0.132	-4.527	0.155	0.815
40	-0.100	-0.100	0.128	0.781
42	-1.800	-1.800	2.471	0.728
44	-0.506	-0.506	0.834	0.607
46	-0.997	-0.997	1.371	0.727
48	-0.050	-0.050	0.054	0.928
49	-0.651	-0.651	0.855	0.762
50	-0.556	-0.556	0.821	0.677
51	-6.545	-6.545	8.060	0.812
52	-1.425	-1.425	1.537	0.927
53	-4.344	-4.344	5.214	0.833
54	-6.699	-6.699	7.257	0.923
55	-0.951	-0.951	1.207	0.788
56	-1.713	-1.713	2.186	0.784
Unidades	MW	MW	MVA	

Pérdidas Calculadas del Sistema:		
P = 1.044 MW		
Q = 2.288 MVar		
S = 2.524 MVA		

Tabla 2.6: Principales magnitudes obtenidas en la simulación y pérdidas calculadas con la colocación de bancos de condensadores.

Nodos	P(MW)	P.Real	S (MVA)	Cos ( $\phi$ )
2	9.412	0.000	9.463	0,96
16	15.000	-0.000	17.649	0,85
17	15.000	0.000	17.649	0,85
18	-0.110	-0.110	0.117	0,82
20	-5.004	-5.004	5.989	0,84
21	-2.500	-9.325	2.660	0,85
22	-0.473	-0.473	0.503	0,85
24	-0.354	-0.354	0.377	0,8
25	-4.272	-4.272	4.545	0,9
26	-0.132	-1.084	0.160	0,79
27	-1.164	-2.591	1.238	0,93
29	-0.250	-1.967	0.295	0,78
30	-2.500	-6.857	2.778	0,84
34	-1.322	-1.322	1.715	0,77
35	-1.160	-7.884	1.234	0,91
36	-0.287	-0.287	0.305	0,85
38	-0.132	-4.527	0.155	0,94
40	-0.100	-0.100	0.106	0,8
42	-1.800	-1.800	1.915	0,75
44	-0.506	-0.506	0.538	0,75
46	-0.997	-0.997	1.061	0,75
48	-0.050	-0.050	0.054	0,93
49	-0.651	-0.651	0.693	0,77
50	-0.556	-0.556	0.591	0,77
51	-6.545	-6.545	6.963	0,9
52	-1.425	-1.425	1.537	0,93
53	-4.344	-4.344	4.621	0,85
54	-6.699	-6.699	7.257	0,92
55	-0.951	-0.951	1.207	0,79
56	-1.713	-1.713	2.186	0,78
Unidades	MW	MW	MVA	

Pérdidas Calculadas del Sistema:		
P =	1.226 MW	
Q =	2.709 MVar	
S =	2.993 MVA	

Tabla 2.7 Algunos datos y gráficos para la simulación considerando los diferentes regímenes de carga (mínimo, promedio y máxima).

THD: Van (%)	THD: Vbn (%)	THD: Vcn (%)
10,8	11,8	10,2
11,5	10,7	9
10,1	12,3	11,1
9,5	9,7	9,9
10,4	9,9	9,5
9,8	10,7	9,8
9,8	11,6	11
11,7	11,5	10,7
10,3	11,1	10,7
13,2	13,3	10,9
11,7	11,2	11,1
9,9	10,1	9,8
10,5	11,1	10,3

THD: Van (%)	THD: Vbn (%)	THD: Vcn (%)
9,9	9,2	9,1
9,5	9,8	8,9
10,6	13,3	9,3
13,8	12,4	12
9,4	12	9,9
9,6	12,1	11,3
11,3	12,3	9,9
10,1	11	9,7
10,7	10,1	11,2
10,4	10,7	9,8
9,4	11,2	10,6
11,5	10,7	9,8

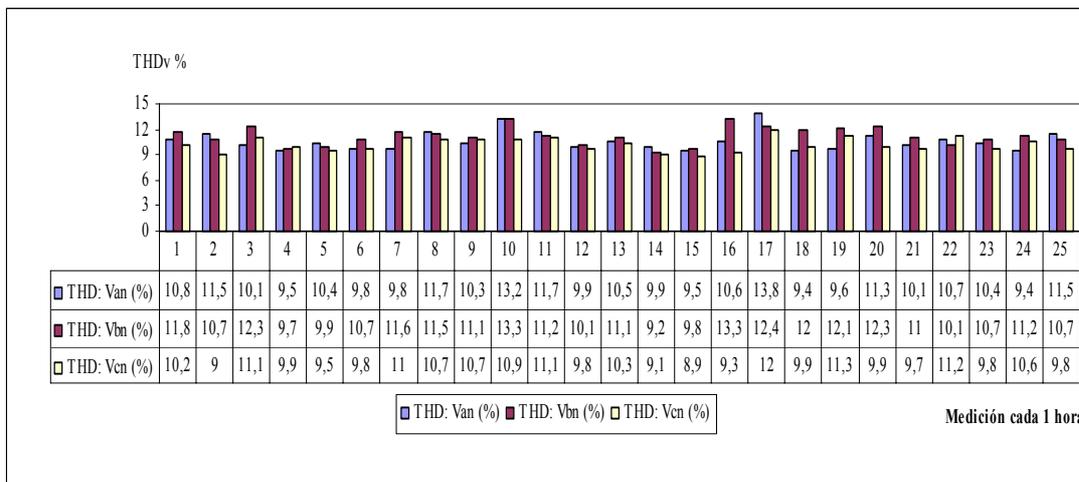


Figura #1 Comportamiento de los THD (%) cada 1 hora

Tabla 2.8: Mediciones de potencia en (KW) cada 60 segundos.

Time (s)	Power: P3 (kW)	Time (s)	Power: P3 (kW)
0	632,07	721	741,63
1	668,62	781	670,15
61	660,75	841	685,51
121	681,14	901	553,32
181	763,58	961	709,74
241	690,56	1021	697,27
301	728,32	1081	645,69
361	700,2	1141	687,11
421	681,26	1201	721,03
481	661,48	1261	786,65
541	629,93	1321	784,57
601	624,55	1381	619,01
661	617	1401	754,75

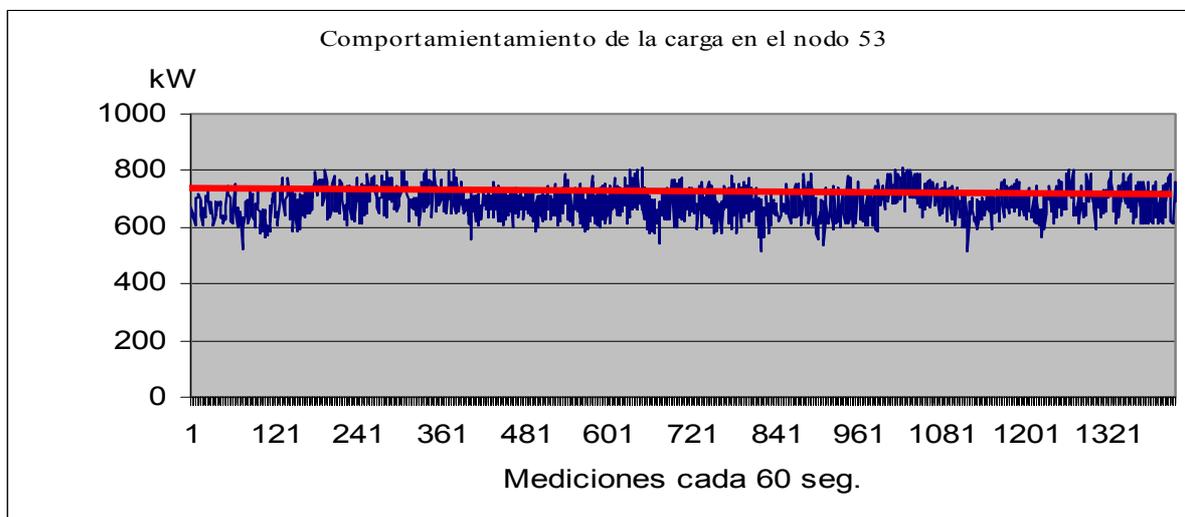


Figura #1: Comportamiento de carga en el nodo 53

Tabla 2.9: Mediciones de potencia en (KW) en 24 horas.

Time (s)	Power: P3 (kW)
0	632,07
1	668,62
98	652,45
195	716,51
292	694,16
389	716,71
486	676,91
583	608,06
680	711,3
770	671,12
874	754,24
971	674,57
1068	725,85
1165	761,35

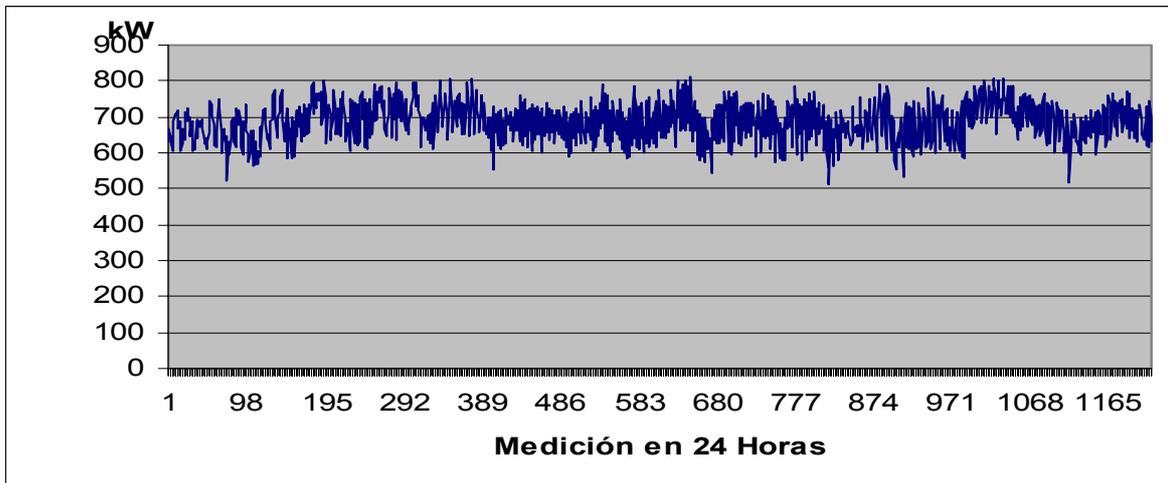


Figura #2: Mediciones en 24 horas en el nodo 53

Tabla 2.10 Valores de catalogo que se utilizaron en el calculo de las capacidades de los capacitores de 480 volts.

30.0	65L817	TA1	\$357.00	TC1	\$401.00	TE1	\$431.00	TR1	\$357.00	TS1	\$377.00	TT1	\$397.00	2	19	8.6
32.5	65L818	TA1	\$379.00	TC1	\$423.00	TE1	\$453.00	TR1	\$379.00	TS1	\$399.00	TT1	\$419.00	2	19	8.6
35.0	65L819	TA1	\$397.00	TC1	\$441.00	TE1	\$471.00	TR1	\$397.00	TS1	\$417.00	TT1	\$437.00	2	19	8.6
37.5	65L820	TA1	\$419.00	TC1	\$463.00	TE1	\$493.00	TR1	\$419.00	TS1	\$439.00	TT1	\$459.00	2	19	8.6
40.0	65L821	TA1	\$441.00	TC1	\$485.00	TE1	\$515.00	TR1	\$441.00	TS1	\$461.00	TT1	\$481.00	2	22	10.0
42.5	65L822	TA1	\$467.00	TC1	\$511.00	TE1	\$541.00	TR1	\$467.00	TS1	\$487.00	TT1	\$507.00	2	22	10.0
45.0	65L823	TA1	\$489.00	TC1	\$533.00	TE1	\$563.00	TR1	\$489.00	TS1	\$509.00	TT1	\$529.00	2	22	10.0
47.5	65L824	TA1	\$496.00	TC1	\$540.00	TE1	\$570.00	TR1	\$496.00	TS1	\$516.00	TT1	\$536.00	2	22	10.0
50.0	65L825	TA1	\$503.00	TC1	\$547.00	TE1	\$577.00	TR1	\$503.00	TS1	\$523.00	TT1	\$543.00	2	22	10.0
55.0	65L826	TA1	\$536.00	TC1	\$580.00	TE1	\$610.00	TR1	\$536.00	TS1	\$556.00	TT1	\$576.00	3	32	14.5
60.0	65L827	TA1	\$565.00	TC1	\$609.00	TE1	\$639.00	TR1	\$565.00	TS1	\$585.00	TT1	\$605.00	3	32	14.5
65.0	65L828	TA1	\$610.00	TC1	\$654.00	TE1	\$684.00	TR1	\$610.00	TS1	\$630.00	TT1	\$650.00	3	32	14.5
70.0	65L829	TA1	\$657.00	TC1	\$701.00	TE1	\$731.00	TR1	\$657.00	TS1	\$677.00	TT1	\$697.00	3	33	15.0
75.0	65L830	TA1	\$705.00	TC1	\$749.00	TE1	\$779.00	TR1	\$705.00	TS1	\$725.00	TT1	\$745.00	3	33	15.0
80.0	65L831	TA1	\$752.00	TC1	\$796.00	TE1	\$826.00	TR1	\$752.00	TS1	\$772.00	TT1	\$792.00	3	38	17.2
85.0	65L832	TA1	\$804.00	TC1	\$848.00	TE1	\$878.00	TR1	\$804.00	TS1	\$824.00	TT1	\$844.00	3	38	17.2
90.0	65L833	TA1	\$840.00	TC1	\$884.00	TE1	\$914.00	TR1	\$840.00	TS1	\$860.00	TT1	\$880.00	3	38	17.2
95.0	65L834	TA1	\$886.00	TC1	\$930.00	TE1	\$960.00	TR1	\$886.00	TS1	\$906.00	TT1	\$926.00	3	38	17.2
100.0	65L835	TA1	\$932.00	TC1	\$976.00	TE1	\$1006.00	TR1	\$932.00	TS1	\$952.00	TT1	\$972.00	3	38	17.2

kVAR	Basic Product No.	480 Volt, 3-phase Delta						480 Volt, 1-phase						Fig. No. (See pg. 19-24)	Approx. Weight	
		No Fuses <sup>1</sup>		3 Fuses <sup>1</sup>		3 Fuses, 3 Lights <sup>1</sup>		No Fuses		Fuses		Fuses & Lights			Lbs	Kg
		Suffix	List Price	Suffix	List Price	Suffix	List Price	Suffix	List Price	Suffix	List Price	Suffix	List Price			
110.0	65L914	TA2	\$1095.00	TC2	\$1183.00	TE2	\$1243.00	TR2	\$1095.00	TS2	\$1135.00	TT2	\$1175.00	4	87	39.5
120.0	65L915	TA2	\$1170.00	TC2	\$1258.00	TE2	\$1318.00	TR2	\$1170.00	TS2	\$1210.00	TT2	\$1250.00	4	87	39.5
125.0	65L916	TA2	\$1210.00	TC2	\$1298.00	TE2	\$1358.00	TR2	\$1210.00	TS2	\$1250.00	TT2	\$1290.00	4	87	39.5
130.0	65L917	TA2	\$1250.00	TC2	\$1338.00	TE2	\$1398.00	TR2	\$1250.00	TS2	\$1290.00	TT2	\$1330.00	4	87	39.5
140.0	65L918	TA2	\$1330.00	TC2	\$1418.00	TE2	\$1478.00	TR2	\$1330.00	TS2	\$1370.00	TT2	\$1410.00	4	89	40.8
150.0	65L919	TA2	\$1390.00	TC2	\$1478.00	TE2	\$1538.00	TR2	\$1390.00	TS2	\$1430.00	TT2	\$1470.00	4	89	40.8
160.0	65L920	TA2	\$1485.00	TC2	\$1573.00	TE2	\$1633.00	TR2	\$1485.00	TS2	\$1525.00	TT2	\$1565.00	4	99	44.9
170.0	65L921	TA2	\$1565.00	TC2	\$1653.00	TE2	\$1713.00	TR2	\$1565.00	TS2	\$1605.00	TT2	\$1645.00	4	99	44.9
175.0	65L922	TA2	\$1605.00	TC2	\$1693.00	TE2	\$1753.00	TR2	\$1605.00	TS2	\$1645.00	TT2	\$1685.00	4	99	44.9
180.0	65L923	TA2	\$1640.00	TC2	\$1728.00	TE2	\$1788.00	TR2	\$1640.00	TS2	\$1680.00	TT2	\$1720.00	4	99	44.9
190.0	65L924	TA2	\$1720.00	TC2	\$1808.00	TE2	\$1868.00	TR2	\$1720.00	TS2	\$1760.00	TT2	\$1800.00	4	99	44.9
200.0	65L925	TA2	\$1790.00	TC2	\$1878.00	TE2	\$1938.00	TR2	\$1790.00	TS2	\$1830.00	TT2	\$1870.00	4	99	44.9
210.0	65L926	TA2	\$1860.00	TC2	\$1992.00	TE2	\$2082.00	TR2	\$1860.00	TS2	\$1920.00	TT2	\$1980.00	5	136	61.7
220.0	65L927	TA2	\$1935.00	TC2	\$2067.00	TE2	\$2157.00	TR2	\$1935.00	TS2	\$1995.00	TT2	\$2055.00	5	136	61.7
230.0	65L928	TA2	\$2015.00	TC2	\$2147.00	TE2	\$2237.00	TR2	\$2015.00	TS2	\$2075.00	TT2	\$2135.00	5	136	61.7
240.0	65L929	TA2	\$2095.00	TC2	\$2227.00	TE2	\$2317.00	TR2	\$2095.00	TS2	\$2155.00	TT2	\$2215.00	5	138	62.6
250.0	65L930	TA2	\$2165.00	TC2	\$2297.00	TE2	\$2387.00	TR2	\$2165.00	TS2	\$2225.00	TT2	\$2285.00	5	138	62.6
260.0	65L931	TA2	\$2250.00	TC2	\$2382.00	TE2	\$2472.00	TR2	\$2250.00	TS2	\$2310.00	TT2	\$2370.00	5	142	64.4
270.0	65L932	TA2	\$2330.00	TC2	\$2462.00	TE2	\$2552.00	TR2	\$2330.00	TS2	\$2390.00	TT2	\$2450.00	5	143	64.9
280.0	65L933	TA2	\$2410.00	TC2	\$2542.00	TE2	\$2632.00	TR2	\$2410.00	TS2	\$2470.00	TT2	\$2530.00	5	148	67.1

Tabla 2.11 Valores de catalogo que se utilizaron en el calculo de las capacidades de los capacitores de 480 y 600 volts.

290.0	65L934	TA2	\$2490.00	TC2	\$2622.00	TE2	\$2712.00	TR2	\$2490.00	TS2	\$2550.00	TT2	\$2610.00	5	148	67.1
300.0	65L935	TA2	\$2565.00	TC2	\$2697.00	TE2	\$2787.00	TR2	\$2565.00	TS2	\$2625.00	TT2	\$2685.00	5	148	67.1
325.0	65L936	TA2	\$2833.00	TC2	\$3009.00	TE2	\$3129.00	TR2	\$2833.00	TS2	\$2913.00	TT2	\$2993.00	6	181	82.1
350.0	65L937	TA2	\$3120.00	TC2	\$3296.00	TE2	\$3416.00	TR2	\$3120.00	TS2	\$3200.00	TT2	\$3280.00	6	186	84.4
375.0	65L938	TA2	\$3350.00	TC2	\$3526.00	TE2	\$3646.00	TR2	\$3350.00	TS2	\$3430.00	TT2	\$3510.00	6	191	86.6
400.0	65L939	TA2	\$3580.00	TC2	\$3756.00	TE2	\$3876.00	TR2	\$3580.00	TS2	\$3660.00	TT2	\$3740.00	6	196	88.9
425.0	65L940	TA2	\$3788.00	TC2	\$4008.00	TE2	\$4158.00	TR2	\$3788.00	TS2	\$3888.00	TT2	\$3988.00	7	230	104.3
450.0	65L941	TA2	\$4015.00	TC2	\$4235.00	TE2	\$4385.00	TR2	\$4015.00	TS2	\$4115.00	TT2	\$4215.00	7	235	106.6
475.0	65L942	TA2	\$4180.00	TC2	\$4400.00	TE2	\$4550.00	TR2	\$4180.00	TS2	\$4280.00	TT2	\$4380.00	7	240	108.9
500.0	65L943	TA2	\$4345.00	TC2	\$4565.00	TE2	\$4715.00	TR2	\$4345.00	TS2	\$4445.00	TT2	\$4545.00	7	245	111.1

kVAR	Basic Product No.	600 Volt, 3-phase Wye						Fig. No. (See pg. 19-24)	Approx. Weight	
		No Fuses <sup>1</sup>		3 Fuses <sup>1</sup>		3 Fuses, 3 Lights <sup>1</sup>			Lbs	Kg
		Suffix	List Price	Suffix	List Price	Suffix	List Price			
110.0	65L914	TF3	\$1095.00	TH3	\$1183.00	TK3	\$1243.00	4	87	39.5
120.0	65L915	TF3	\$1170.00	TH3	\$1258.00	TK3	\$1318.00	4	87	39.5
125.0	65L916	TF3	\$1190.00	TH3	\$1322.00	TK3	\$1412.00	4	87	39.5
130.0	65L917	TF3	\$1230.00	TH3	\$1362.00	TK3	\$1452.00	4	87	39.5
140.0	65L918	TF3	\$1310.00	TH3	\$1442.00	TK3	\$1532.00	4	89	40.5
150.0	65L919	TF3	\$1370.00	TH3	\$1502.00	TK3	\$1592.00	4	99	45.0
160.0	65L920	TF3	\$1465.00	TH3	\$1597.00	TK3	\$1687.00	4	99	45.0
170.0	65L921	TF3	\$1545.00	TH3	\$1677.00	TK3	\$1767.00	4	99	45.0
175.0	65L922	TF3	\$1585.00	TH3	\$1717.00	TK3	\$1807.00	4	99	45.0
180.0	65L923	TF3	\$1620.00	TH3	\$1752.00	TK3	\$1842.00	4	99	45.0
190.0	65L924	TF3	\$1680.00	TH3	\$1856.00	TK3	\$1976.00	4	99	45.0
200.0	65L925	TF3	\$1750.00	TH3	\$1926.00	TK3	\$2046.00	4	99	45.0
210.0	65L926	TF3	\$1840.00	TH3	\$2016.00	TK3	\$2136.00	5	136	61.8
220.0	65L927	TF3	\$1915.00	TH3	\$2091.00	TK3	\$2211.00	5	136	61.8
230.0	65L928	TF3	\$1995.00	TH3	\$2171.00	TK3	\$2291.00	5	136	61.8
240.0	65L929	TF3	\$2075.00	TH3	\$2251.00	TK3	\$2371.00	5	138	62.7
250.0	65L930	TF3	\$2125.00	TH3	\$2345.00	TK3	\$2495.00	5	138	62.7
260.0	65L931	TF3	\$2210.00	TH3	\$2430.00	TK3	\$2580.00	5	142	64.5
270.0	65L932	TF3	\$2290.00	TH3	\$2510.00	TK3	\$2660.00	5	143	65.0
280.0	65L933	TF3	\$2370.00	TH3	\$2590.00	TK3	\$2740.00	5	148	67.3
290.0	65L934	TF3	\$2450.00	TH3	\$2670.00	TK3	\$2820.00	5	148	67.3
300.0	65L935	TF3	\$2525.00	TH3	\$2745.00	TK3	\$2895.00	6	148	67.3
325.0	65L936	TF3	\$2768.00	TH3	\$2988.00	TK3	\$3138.00	6	181	82.3
350.0	65L937	TF3	\$3011.00	TH3	\$3231.00	TK3	\$3381.00	6	186	84.5
370.0	65L938	TF3	\$3254.00	TH3	\$3474.00	TK3	\$3624.00	6	191	86.8
400.0	65L939	TF3	\$3497.00	TH3	\$3717.00	TK3	\$3867.00	6	196	89.1
425.0	65L940	TF3	\$3740.00	TH3	\$3960.00	TK3	\$4110.00	7	230	104.5
450.0	65L941	TF3	\$3983.00	TH3	\$4203.00	TK3	\$4353.00	7	235	106.8
475.0	65L942	TF3	\$4226.00	TH3	\$4446.00	TK3	\$4596.00	7	240	109.1
500.0	65L943	TF3	\$4469.00	TH3	\$4689.00	TK3	\$4839.00	7	245	111.4

Tabla 2.12 Análisis del contenido armónico obtenidos en la simulación del sistema antes de ubicados los condensadores.

	1	5	7	11	13	17	19	
2	[V = 110.000]	[V = 1.264]	[V = 0.913]	[V = 0.364]	[V = 0.415]	[V = 0.343]	[V = 0.313]	THD U = 1.56 %
3	[V = 110.000]	[V = 1.335]	[V = 0.965]	[V = 0.384]	[V = 0.438]	[V = 0.362]	[V = 0.331]	THD U = 1.65 %
4	[V = 110.000]	[V = 1.335]	[V = 0.965]	[V = 0.384]	[V = 0.439]	[V = 0.362]	[V = 0.331]	THD U = 1.65 %
5	[V = 10.500]	[V = 0.195]	[V = 0.141]	[V = 0.056]	[V = 0.064]	[V = 0.053]	[V = 0.048]	THD U = 2.53 %
6	[V = 10.500]	[V = 0.195]	[V = 0.141]	[V = 0.056]	[V = 0.064]	[V = 0.053]	[V = 0.048]	THD U = 2.53 %
9	[V = 10.500]	[V = 0.768]	[V = 0.555]	[V = 0.221]	[V = 0.253]	[V = 0.209]	[V = 0.191]	THD U = 9.95 %
12	[V = 10.500]	[V = 0.148]	[V = 0.107]	[V = 0.028]	[V = 0.024]	[V = 0.021]	[V = -0.020]	THD U = 1.80 %
13	[V = 10.500]	[V = 0.787]	[V = 0.570]	[V = 0.227]	[V = 0.259]	[V = 0.214]	[V = 0.196]	THD U = 10.20 %
14	[V = 10.500]	[V = 0.036]	[V = 0.026]	[V = 0.010]	[V = 0.012]	[V = 0.010]	[V = 0.009]	THD U = 0.47 %
15	[V = 10.500]	[V = 0.495]	[V = 0.357]	[V = 0.144]	[V = 0.164]	[V = 0.135]	[V = 0.123]	THD U = 6.42 %
16	[V = 10.500]	[V = 0.287]	[V = 0.201]	[V = 0.081]	[V = 0.090]	[V = 0.073]	[V = 0.066]	THD U = 3.65 %
23	[V = 10.500]	[V = 0.148]	[V = 0.107]	[V = 0.043]	[V = 0.049]	[V = 0.040]	[V = 0.037]	THD U = 1.92 %
24	[V = 0.480]	[V = 0.015]	[V = 0.009]	[V = 0.002]	[V = 0.002]	[V = 0.001]	[V = 0.001]	THD U = 3.66 %
26	[V = 10.500]	[V = 0.116]	[V = 0.087]	[V = 0.036]	[V = 0.042]	[V = 0.036]	[V = 0.033]	THD U = 1.54 %
27	[V = 10.500]	[V = 0.163]	[V = 0.118]	[V = 0.047]	[V = 0.053]	[V = 0.044]	[V = 0.040]	THD U = 2.11 %
29	[V = 10.500]	[V = 0.132]	[V = 0.098]	[V = 0.046]	[V = 0.055]	[V = 0.048]	[V = 0.044]	THD U = 1.82 %
31	[V = 10.500]	[V = 0.786]	[V = 0.568]	[V = 0.227]	[V = 0.259]	[V = 0.214]	[V = 0.195]	THD U = 10.18 %
32	[V = 10.500]	[V = 0.290]	[V = 0.203]	[V = 0.081]	[V = 0.091]	[V = 0.073]	[V = 0.066]	THD U = 3.69 %
38	[V = 6.000]	[V = 0.074]	[V = 0.010]	[V = 0.004]	[V = 0.005]	[V = 0.004]	[V = 0.004]	THD U = 1.26 %
42	[V = 0.480]	[V = 0.005]	[V = 0.003]	[V = 0.001]	[V = 0.001]	[V = 0.000]	[V = 0.000]	THD U = 1.12 %

45	[V = 10.500]	[V = 0.155]	[V = 0.115]	[V = 0.014]	[V = 0.017]	[V = 0.014]	[V = 0.013]	THD U = 1.86 %
46	[V = 0.480]	[V = 0.012]	[V = 0.007]	[V = 0.000]	[V = 0.000]	[V = 0.000]	[V = 0.000]	THD U = 2.84 %
47	[V = 10.500]	[V = 0.002]	[V = 0.001]	[V = 0.000]	[V = 0.000]	[V = 0.000]	[V = -0.000]	THD U = 0.02 %
48	[V = 0.480]	[V = 0.000]	THD U = 0.02 %					
49	[V = 0.480]	[V = 0.000]	THD U = 0.01 %					
50	[V = 0.480]	[V = 0.000]	THD U = 0.00 %					
51	[V = 6.000]	[V = 0.093]	[V = 0.068]	[V = 0.025]	[V = 0.026]	[V = 0.019]	[V = 0.016]	THD U = 2.05 %
52	[V = 0.480]	[V = 0.011]	[V = 0.008]	[V = 0.003]	[V = 0.004]	[V = 0.003]	[V = 0.003]	THD U = 3.12 %
53	[V = 0.480]	[V = 0.010]	[V = 0.006]	[V = 0.002]	[V = 0.002]	[V = 0.001]	[V = 0.001]	THD U = 2.47 %
54	[V = 0.480]	[V = 0.005]	[V = 0.004]	[V = 0.001]	[V = 0.002]	[V = 0.001]	[V = 0.001]	THD U = 1.45 %
55	[V = 0.480]	[V = 0.019]	[V = 0.014]	[V = 0.006]	[V = 0.007]	[V = 0.006]	[V = 0.006]	THD U = 5.55 %
56	[V = 0.480]	[V = 0.029]	[V = 0.022]	[V = 0.010]	[V = 0.012]	[V = 0.010]	[V = 0.009]	THD U = 8.77 %
57	[V = 10.500]	[V = 0.399]	[V = 0.292]	[V = 0.115]	[V = 0.132]	[V = 0.110]	[V = 0.101]	THD U = 5.20 %
58	[V = 10.500]	[V = 0.051]	[V = 0.036]	[V = 0.014]	[V = 0.016]	[V = 0.013]	[V = 0.012]	THD U = 0.65 %
59	[V = 10.500]	[V = 0.021]	[V = 0.013]	[V = 0.004]	[V = 0.003]	[V = 0.002]	[V = 0.002]	THD U = 0.25 %

Tabla 2.13 Análisis del contenido armónico obtenidos en la simulación del sistema, cuyos nodos presentan un THD mayor de 5%

Nodos	THDv (%)
9	9.95 %
13	10.21 %
15	6.42 %
31	10.18 %
55	5.55 %
57	5.20 %

Tabla 2.14 Análisis del contenido armónico obtenidos en la simulación del sistema después de la ubicados los condensadores

2	[V = 110.000]	[V = 0.984]	[V = 0.272]	[V = 0.364]	[V = 0.414]	[V = 0.343]	[V = 0.313]	THD U = 1.14 %
3	[V = 110.000]	[V = 1.040]	[V = 0.287]	[V = 0.385]	[V = 0.438]	[V = 0.362]	[V = 0.330]	THD U = 1.20 %
4	[V = 110.000]	[V = 1.040]	[V = 0.287]	[V = 0.384]	[V = 0.437]	[V = 0.361]	[V = 0.331]	THD U = 1.20 %
5	[V = 10.500]	[V = 0.153]	[V = 0.040]	[V = 0.056]	[V = 0.064]	[V = 0.053]	[V = 0.048]	THD U = 1.84 %
6	[V = 10.500]	[V = 0.153]	[V = 0.040]	[V = 0.056]	[V = 0.064]	[V = 0.053]	[V = 0.048]	THD U = 1.84 %
7	[V = 10.500]	[V = 0.005]	[V = 0.004]	[V = 0.002]	[V = 0.002]	[V = 0.002]	[V = 0.002]	THD U = 0.07 %
8	[V = 10.500]	[V = 0.005]	[V = 0.004]	[V = 0.002]	[V = 0.002]	[V = 0.002]	[V = 0.002]	THD U = 0.07 %
9	[V = 10.500]	[V = 0.601]	[V = 0.157]	[V = 0.221]	[V = 0.252]	[V = 0.209]	[V = 0.191]	THD U = 7.24 %
10	[V = 10.500]	[V = 0.036]	[V = 0.025]	[V = 0.014]	[V = 0.016]	[V = 0.013]	[V = 0.012]	THD U = 0.50 %
11	[V = 10.500]	[V = 0.022]	[V = 0.016]	[V = 0.011]	[V = 0.013]	[V = 0.011]	[V = 0.010]	THD U = 0.34 %
12	[V = 10.500]	[V = 0.116]	[V = 0.030]	[V = 0.051]	[V = 0.012]	[V = 0.019]	[V = 0.071]	THD U = 1.43 %
13	[V = 10.500]	[V = 0.616]	[V = 0.162]	[V = 0.227]	[V = 0.259]	[V = 0.215]	[V = 0.196]	THD U = 7.43 %
14	[V = 10.500]	[V = 0.020]	[V = 0.014]	[V = 0.010]	[V = 0.012]	[V = 0.010]	[V = 0.009]	THD U = 0.31 %
15	[V = 10.500]	[V = 0.280]	[V = 0.200]	[V = 0.144]	[V = 0.164]	[V = 0.135]	[V = 0.123]	THD U = 4.25 %
16	[V = 10.500]	[V = 0.111]	[V = 0.070]	[V = 0.081]	[V = 0.090]	[V = 0.073]	[V = 0.066]	THD U = 1.94 %
17	[V = 10.500]	[V = 0.002]	[V = 0.003]	[V = 0.000]	[V = 0.000]	[V = 0.000]	[V = 0.000]	THD U = 0.04 %
18	[V = 0.480]	[V = 0.000]	THD U = 0.03 %					
19	[V = 10.500]	[V = 0.033]	[V = 0.004]	[V = 0.028]	[V = 0.011]	[V = 0.006]	[V = 0.015]	THD U = 0.45 %



	10.500]	0.006]	0.004]	0.014]	0.017]	0.014]	0.013]	0.29 %
44	[V = 0.480]	[V = 0.000]	THD U = 0.00 %					
45	[V = 10.500]	[V = 0.016]	[V = 0.009]	[V = 0.014]	[V = 0.017]	[V = 0.014]	[V = 0.013]	THD U = 0.33 %
46	[V = 0.480]	[V = 0.007]	[V = 0.004]	[V = 0.000]	[V = 0.000]	[V = 0.000]	[V = 0.000]	THD U = 1.71 %
47	[V = 10.500]	[V = 0.003]	[V = 0.003]	[V = 0.000]	[V = -	[V = 0.000]	[V = -	THD U = 0.04 %
48	[V = 0.480]	[V = 0.000]	THD U = 0.02 %					
51	[V = 6.000]	[V = 0.089]	[V = 0.058]	[V = 0.025]	[V = 0.032]	[V = 0.021]	[V = 0.016]	THD U = 1.95 %
52	[V = 0.480]	[V = 0.009]	[V = 0.004]	[V = 0.003]	[V = 0.004]	[V = 0.003]	[V = 0.003]	THD U = 2.53 %
53	[V = 0.480]	[V = 0.010]	[V = 0.006]	[V = 0.002]	[V = 0.002]	[V = 0.001]	[V = 0.001]	THD U = 2.53 %
54	[V = 0.480]	[V = 0.004]	[V = 0.003]	[V = 0.001]	[V = 0.002]	[V = 0.001]	[V = 0.001]	THD U = 1.17 %
55	[V = 0.480]	[V = 0.019]	[V = 0.000]	[V = 0.006]	[V = 0.007]	[V = 0.006]	[V = 0.006]	THD U = 4.68 %
56	[V = 0.480]	[V = 0.000]	[V = 0.000]	[V = 0.010]	[V = 0.012]	[V = 0.010]	[V = 0.009]	THD U = 4.25 %
57	[V = 10.500]	[V = 0.399]	[V = 0.000]	[V = 0.115]	[V = 0.132]	[V = 0.110]	[V = 0.101]	THD U = 4.39 %
58	[V = 10.500]	[V = 0.033]	[V = 0.024]	[V = 0.014]	[V = 0.016]	[V = 0.013]	[V = 0.012]	THD U = 0.47 %
59	[V = 10.500]	[V = 0.016]	[V = 0.003]	[V = 0.004]	[V = 0.028]	[V = 0.006]	[V = 0.002]	THD U = 0.32 %

Tabla 2.15 Análisis del contenido armónico obtenidos en la simulación del sistema, cuyos nodos presentan un THD mayor de 5%

Nodos	THDv (%)
9	7.24 %
13	7.43 %
31	7.41 %