



MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
FACULTAD METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA
MOA – HOLGUÍN

Trabajo de Diploma

En opción al Título de

Ingeniero Eléctrico.

Título: Estudio de la eficiencia energética y calidad de la energía en media tensión de la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

Autor: Adan Joel García Montero.

*Tutores: Dra.C Iliana González Palau.
Dr.C Secundino Marrero Ramírez.*

*Moa -2013
“Año 55 de la Revolución”*

Declaración de autoridad

Yo: Adan Joel García Montero:

Autor del Trabajo de Diploma “*Estudio de la eficiencia energética y calidad de la energía en media tensión de la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”*”, en conjunto con los Doctores en Ciencias Iliana González Palau y Secundino Marrero Ramírez, certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez” y la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, los cuales podrán hacer uso del mismo para fines científicos, docentes y educativos.

Adan Joel García Montero.
(Diplomante)

Dra.C. Iliana González Palau
(Tutor(a))

Dr.C Secundino Marrero Ramírez
(Tutor)

Pensamiento.

“...aquí está una de las tareas de la juventud: empujar, dirigir con el ejemplo la producción del hombre de mañana. Y en esta producción, en esta dirección, está comprendida la producción de sí mismos...”.

Ernesto Che Guevara.

Agradecimientos.

Porque a lo largo de la vida he sentido su guía, agradezco primeramente a Dios, a la Revolución cubana y a mi familia, de manera especial reconozco el apoyo de mis padres y mi hermana, que han hecho más fácil este largo camino de estudios y sacrificios.

A mis tutores, profesores, trabajadores de la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” y compañeros de aula, que me orientaron, ayudaron, acompañaron e inspiraron en cada paso de la realización del presente proyecto.

A todos los que por dejar su huella en mí, la han dejado también en estas páginas, y que prefiero no aventurarme a nombrarlos para evitar omisiones.

Para todos ellos, este, mi testimonio de infinita gratitud.

Dedicatoria.

Dedico este Trabajo de Diploma, mis esfuerzos y triunfos a quienes han sido responsables, en gran medida de que esté aquí: mi Madre, mi Padre y mi Hermana, a mis familiares, amigos y a todos los que creyeron en mí. Sin su comprensión ejemplo y complicidad hoy no me consideraría mejor que ayer.

Resumen.

Este trabajo, titulado: ***Estudio de la eficiencia energética y calidad de la energía en media tensión de la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”***, está compuesto por; Introducción, Tres Capítulos, Conclusiones, Recomendaciones, Bibliografía y Anexos.

En el primer capítulo, se tienen en cuenta trabajos precedentes realizados sobre el tema abordado. Además, contiene el marco teórico-conceptual de la investigación, el que tiene como objetivo; establecer las bases para el desarrollo del estudio que se realiza.

El segundo capítulo proporciona una descripción detallada del sistema de suministro de media tensión de la empresa, incluyendo conductores. Se muestran gráficos y tablas que representan el comportamiento real de algunos parámetros eléctricos de la empresa, en algún momento determinado. Se describen los instrumentos empleados y se realizan simulaciones, con el objetivo de determinar y disminuir los niveles de pérdidas existentes.

En el tercer capítulo son analizados los resultados y se realiza la valoración económica y cuantificación de pérdidas de energía. Se tiene en cuenta la viabilidad económica de la propuesta a través del Período de Recuperación.

Summary.

This work, entitled: ***Study of the energy efficiency and quality of the energy in half voltage of the Enterprise “Comandante Ernesto Che Guevara”***, is composed for; Introduction, Three chapters, Conclusions, Recommendations, Bibliography and Annexed.

In the first chapter, the keep in mind to him preceding works carried out on the topic. Moreover, it contains the theoretical-conceptual frame of the investigation, the one which has as objective; establish the bases for the development of the study that are carried out.

The second chapter provides a detailed description of the system of supply of half voltage of the enterprise, by including wires. Show graphic and tables that represent the real behavior of some electric parameters of the enterprise, in some certain moment. It describes the employee instruments and it is carried out simulations, with the objective of deciding and decrease, the levels of existent losses in the system.

In the third chapter they are analyzed the results and are carried out the economic valuation and quantization of energy losses. It is kept in mind the economic viability of the proposal through the Period of Recovery.

Índice

Declaración de autoridad	I
Pensamiento.....	II
Agradecimientos.....	III
Dedicatoria.	IV
Resumen.	V
Summary.....	VI
Índice	VII
Introducción General:	1
Fundamentación de la Investigación:	3
Capítulo I: Marco Teórico-Conceptual.....	5
1.1 Introducción.....	5
1.2 Métodos de investigación	5
1.3 Análisis Bibliográfico.....	6
1.4 Eficiencia Energética.....	9
1.4.1 El Cos φ y el factor de potencia.....	10
1.4.2 Consecuencias de un bajo factor de potencia.....	12
1.4.3 Métodos para mejorar el factor de potencia.....	13
1.4.4 Ventajas de corregir el factor de potencia.....	14
1.4.5 Comportamiento del consumo eléctrico en una instalación.....	15
1.4.6 Otros aspectos a tener en cuenta para la compensación.....	16
1.5 La calidad de la energía.....	20
1.5.1 Norma IEEE 519-1992.....	22
1.6 Filtros contra corrientes armónicas.....	24
1.6.1 Ubicación de los filtros.....	24
1.6.2 Problemas que afectan a los filtros.....	24
1.7 Corrección del factor de potencia en circuitos con contaminación armónica.....	25
Conclusiones del capítulo.....	27
Capítulo II: Materiales y Métodos.....	28
2.1 Introducción:	28

2.2	Descripción del sistema eléctrico de la empresa.....	28
2.3	Descripción del Cableado del sistema de suministro de media tensión.....	31
2.4	Descripción de las máquinas sincrónicas existentes en la empresa.	32
2.5	Software e instrumentos utilizados	33
2.6	Comportamiento del consumo eléctrico de la empresa.	35
2.7	Comportamiento del factor de potencia en los transformadores 1T y 2T del DDP y en subestaciones distribuidoras.	35
2.8	Montaje del sistema de suministro de media tensión en el Easy Power.....	37
2.9	Simulación del flujo de potencia de la empresa en condiciones actuales.....	38
2.10	Simulación de las perturbaciones armónicas, del sistema de suministro en las condiciones actuales.	41
2.11	Simulación del flujo de potencia después de propuesta la compensación.....	43
2.12	Simulación de las perturbaciones armónicas del sistema después de propuesta la compensación.	46
	Conclusiones del capítulo.	48
	Capítulo III: Análisis de los Resultados.	49
3.1	Introducción:.....	49
3.2	Evaluación de la compensación con bancos de condensadores y compensador sincrónico.	49
3.3	Gastos de Adquisición y Montaje.....	50
3.4	Otros beneficios obtenidos gracias a la compensación.	53
	Conclusiones del capítulo.....	55
	Conclusiones Generales.....	56
	Recomendaciones.....	57
	Bibliografía.....	58
	Anexos.....	60

Introducción General:

Cada país cuenta, para satisfacer sus necesidades de energía, con recursos energéticos, esta energía posibilita y facilita toda actividad humana. Las diferentes fuentes, sistemas de producción y uso de la energía utilizadas por el hombre, han marcado las grandes etapas en el desarrollo de la sociedad humana. Con el decursar del tiempo, el hombre pasó del empleo de su fuerza muscular al uso de diversas fuentes para satisfacer sus necesidades, la utilización de la tracción animal, el empleo del fuego y, finalmente, en rápida sucesión: el dominio de las tecnologías del carbón, del petróleo y el gas natural, y la producción y uso del vapor y la electricidad. Actualmente lo más utilizado para estos fines son los combustibles fósiles, que son extinguidos, contaminantes en alto grado, que están concentrados en pocas regiones de la tierra lo que hace que su costo sea elevado y que son utilizados de forma muy ineficiente. El inicio del tercer milenio representó para la humanidad la encrucijada de una nueva elección energética frente al agotamiento de los combustibles fósiles por una parte, pero sobre todo por la amenaza de una catástrofe ecológica al rebasarse los límites de la capacidad del planeta para asimilar su impacto. Cuba no está ajena a esta lucha contra el deterioro medioambiental, actualmente en la Isla se cuenta con fuentes de energía que no deterioran el medio ambiente y se está trabajando fuerte en elevar la eficiencia energética; eliminando esquemas de consumo irracionales, promoviendo en la población una conciencia de ahorro, aprovechando las fuentes secundarias de bajo potencial, utilizando sistemas de cogeneración, y empleando en general la energía de acuerdo a su calidad.

La revolución energética en Cuba, se comenzó con el objetivo de mejorar de forma substancial el desarrollo en la economía del país, en el sector residencial se implementó el uso de equipos mucho más eficientes desde el punto de vista energético, y se han obtenido hasta la fecha resultados significativos, mientras que en las instituciones productivas, el objetivo consistió en el empleo de técnica moderna, además de desarrollar un programa de ahorro de energía para disminuir los índices de consumo de la misma, pero, en muchas redes de suministro industriales actualmente existen niveles

de pérdidas superiores a lo reglamentado, estas, como es lógico, afectan fuertemente los parámetros de eficiencia, problemas de calidad en la energía suministrada y un bajo factor de potencia son las causas más comunes. Lograr disminuir estos niveles de pérdidas, es una tarea en la que se debe seguir trabajando, con la compensación de la energía reactiva, y la instalación de filtros en caso de redes con contaminación de armónicos, es posible lograr una serie de beneficios tales como: incremento del factor de potencia, eliminación de corrientes armónicas creadas por cargas industriales fluctuantes no lineales, reducción de fluctuaciones de tensión en los terminales de líneas de transmisión, aumento de la capacidad de potencia transmitida a través de una línea reduciendo la sub-utilización de los sistemas, disminución de la corriente en capacitores y bancos de capacitores, reducción de la cantidad de disparos intempestivos de interruptores y otros equipos de protección, evitar sobrecalentamientos de motores y transformadores además de que permite un mejor aprovechamiento de la infraestructura de transmisión de energía existente.

Fundamentación de la Investigación:

Situación problemática: La empresa productora de níquel y cobalto “Ernesto Che Guevara”, Recientemente ha experimentado una serie de cambios, encaminados a mantener el nivel de la producción e ir de la mano con la tecnología. Esta revolución tanto de consumidores (inserción de cargas de otra naturaleza eléctrica, como las no lineales, reparación y sustitución de los equipos existentes), como de conductores (cambio del tipo, sección y trazas), y sin tener en cuenta una paulatina actualización de las bases de datos, ha desencadenado que no se conozca actualmente cuáles son los niveles reales de pérdidas existentes en la red de suministro eléctrico de la empresa, asociados al consumo de potencia reactiva y circulación de corrientes armónicas por estas redes.

Problema: La red de suministro eléctrico de media tensión de la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, ha sufrido una serie de cambios en los últimos años, tanto de consumidores como de conductores, lo que impide obtener un flujo de potencia acertado debido a la desactualización de las bases de datos, y a su vez, imposibilita conocer el estado actual de las pérdidas asociadas al nivel de reactivo y los problemas de calidad. Todo esto ha provocado que actualmente no se tenga una valoración real de las reservas de eficiencia energética existentes en esta red.

Objeto de investigación: El sistema de suministro de media tensión de la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

Campo de acción: Eficiencia energética y calidad de la energía.

Objetivo General: Valorar las reservas de eficiencia energética, existentes en el sistema de suministro de media tensión de la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, relacionadas con el factor de potencia y calidad de la energía.

Objetivos Específicos:

1. Verificar el comportamiento de los flujos de potencias después de la actualización del esquema monolineal de la red de suministro de media tensión de la empresa.
2. Determinar valores del factor de potencia y niveles de contaminación con corrientes armónicas.
3. Evaluar el uso de medios de compensación y mejora de la calidad de la energía en la red.
4. Determinar las reservas en el sistema de suministro eléctrico desde el punto de vista energético.

Hipótesis: Si se actualizan las bases de datos existentes y se determinan adecuadamente las causas de los problemas de eficiencia energética en la red de media tensión, relacionados con el factor de potencia y problemas de calidad, entonces es posible minimizar sus efectos negativos con la utilización de medios correctores, para mejorar la eficiencia energética y la calidad de la energía en el sistema.

Resultados esperados:

1. Actualización del esquema monolineal de media tensión, teniendo en cuenta consumidores y conductores.
2. Determinación de los problemas asociados a la eficiencia energética, tanto de calidad de energía como energía reactiva en el sistema de media tensión.
3. Proponer formas de mitigar los problemas relacionados con la calidad y eficiencia del sistema de suministro, a través de la simulación de la red y la corrida de flujos de potencia.
4. Cuantificar las pérdidas asociadas al factor de potencia y la presencia de contaminación armónica.

Capítulo I: Marco Teórico-Conceptual.

1.1 Introducción.

En la actualidad el precio del petróleo, principal fuente de energía para la producción del kWh, está muy elevado, por lo que es sumamente necesario lograr ser más eficientes en todos los sistemas eléctricos, para contribuir a disminuir los efectos dañinos causados al medio ambiente. En las redes industriales debido a la gran cantidad de consumidores que cuentan con bobinas, y que necesitan producir campos magnéticos para su funcionamiento, como motores, equipos de aire acondicionado, transformadores, entre otros, y la utilización de cargas no lineales como variadores de velocidad, arrancadores suaves para motores, balastos electrónicos para lámparas fluorescentes, y uso de fuentes ininterrumpidas de tensión (UPS), es frecuente encontrar circulación de corrientes reactivas y armónicas en las redes de suministro. Estas son capaces de provocar en los conductores sobrecalentamiento lo que se traduce como pérdidas por efecto Joule, además de causar efectos indeseables sobre otros elementos del circuito. La compensación de la potencia reactiva e instalación de filtros contra corrientes armónicas, juegan un papel importante en la explotación eficiente de los sistemas eléctricos industriales. En este capítulo se realiza una revisión bibliográfica de trabajos que tratan sobre estos temas, se aborda también, gran parte de la teoría acerca de los métodos de compensación de potencia reactiva e instalación de filtros contra corrientes armónicas y los beneficios obtenidos.

1.2 Métodos de investigación

Para comenzar, desarrollar y concluir con éxito cualquier investigación se hace necesario utilizar diferentes métodos, este trabajo no fue la excepción, algunos de los métodos que se emplearon son los siguientes:

- **Inductivo-Deductivo**, para realizar el examen y evaluación de los hechos que son objetos de estudio, partiendo de un conocimiento general de los mismos, que permitan una mejor aproximación a la realidad que los originó, y luego, mediante un

proceso de síntesis, emitir una opinión profesional. Todo esto exigió la utilización de una serie de pasos realizados en forma sistemática, ordenada y lógica, que permitieron luego emitir una crítica objetiva del hecho.

- **Histórico-Lógico**, para desarrollar el análisis de las investigaciones anteriores y antecedentes que permitan continuar el estudio.
- **Análisis-Síntesis**, para lograr la descomposición de las funciones de control e información y su concreción.
- **Modelación y simulación**, para evaluar el comportamiento del sistema en estudio, con una gran precisión y sin la necesidad de realizar inversiones.

1.3 Análisis Bibliográfico.

Durante el desarrollo de la investigación se consultaron diferentes trabajos y estudios realizados en los campos de: eficiencia energética, generación de armónicos por cargas no lineales y compensación de energía reactiva en redes industriales. La revisión bibliográfica estuvo dirigida al enfoque teórico metodológico, así como al análisis de los trabajos que sobre el tema, desde el punto de vista científico, técnico y práctico, se han efectuado en los últimos años.

Numerosos estudios se han realizado relacionados con el origen de los armónicos y su influencia en los sistemas eléctricos, todos ellos persiguen un fin común, eliminar o atenuar sus efectos nocivos. Aunque la temática de los armónicos en los sistemas de distribución de energía toma mayor relevancia en los momentos actuales debido al desarrollo de la electrónica de potencia y cargas no lineales, no es un fenómeno nuevo. Es conocido que en 1916 se publica un libro que presta especial atención al estudio de los armónicos en los sistemas trifásicos, específicamente trata el tema del tercer armónico, relacionado con la saturación del hierro en las máquinas rotatorias y los transformadores eléctricos. Aquí se propone por primera vez la conexión delta de los transformadores para bloquear el tercer armónico de corriente.

Escalona P. O; 2008 [4] Realiza un profundo estudio para mejorar la calidad de la energía en la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” proponiendo la utilización de filtros para reducir los daños causados por la presencia de armónicas en las redes,

solo se realiza el estudio en una parte reducida de la empresa.

Tuzolana N. M; 2007 [13] Lleva a cabo la evaluación y análisis del comportamiento de las cargas no lineales en la planta de lixiviación y lavado de la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara", determinando que los armónicos del orden 5, 7, 11 y 13 son los que más problema ocasionaban al sistema, propone los filtros a utilizar y realiza una valoración económica que tiene en cuenta, inversión inicial y mantenimiento posterior.

Baldonado P. A; 2009 [1] Realiza una propuesta de compensación de la energía reactiva en el combinado lácteo en las Tunas, tiene en cuenta los aspectos técnicos y económicos, analiza el costo de la inversión y su posterior mantenimiento.

González P.I; 1999 [8] En este trabajo 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 conllevan a la realización de inversiones en el sistema.

García B. K; 2011 [7] después de un riguroso trabajo de campo y simulación propone la compensación de energía reactiva en la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara" con el ajuste de la excitación de las máquinas sincrónicas allí existente, propone además, cortocircuitar los reactores de enlace de las secciones de barra del nodo principal, cuando se desconecte la principal fuente suministradora de energía (Transformador o Generador) conectada a esa barra, para disminuir el consumo de reactivo por parte de los reactores, no tiene en cuenta la posibilidad de emplear otros métodos de compensación.

Estrada, G. H; Tovar, J. H; 2005 [5] propone una metodología para la localización óptima de condensadores en sistemas eléctricos de distribución. La metodología propuesta para la obtención del esquema de compensación considera tanto el aspecto técnico como el económico.

Viego, P.F; de Armas, M.A de; [14] En 2006 expone los factores que influyen en la calidad de la energía y cómo prevenirlos, se abarca un capítulo completo para el mejoramiento del factor de potencia, pues este es uno de los factores que más problemas ocasiona en la industria y es el más fácil de corregir, en él se abordan varios métodos para corregir el factor de potencia pero no se tiene en cuenta a la hora de realizar el balance económico el gasto por la mano de obra en la instalación del elemento compensador.

López, M.J; [9] En 2004 expone, de un bajo factor de potencia, las causas, efectos y soluciones para mejorarlo, aborda el efecto de los convertidores electrónicos y cargas no lineales en específico, no aborda mucho las cargas lineales sino que se centra en los convertidores electrónicos, los cuales son muy usados en la industria y causan un efecto indeseado en el sistema de distribución de energía de la empresa.

Viego, P.F; de Armas, M.A; [15] En 2006 exponen los problemas que causa un bajo factor de potencia sobre los conductores y transformadores; además exponen la incidencia de los motores asincrónicos sobre este, también se aborda el tema de la tarifa eléctrica y de como se ve afectada por el factor de potencia.

Carrillo, G; Gabriel, C.O; [2] En 2001 propone una metodología mediante algoritmos genéticos para la selección de capacitores, además expone el efecto de la potencia reactiva sobre conductores y transformadores. En este trabajo no se tienen en cuenta elementos como las variaciones de tensión, sino que se centra en la mejora del factor de potencia solo con fines de lograr la bonificación por parte de la empresa eléctrica.

Colectivo de autores Universidad de Cienfuegos; [3] En 2002, realizan un trabajo metodológico que tiene en cuenta el tema gestión energética empresarial donde se abarca todo lo relacionado con la teoría sobre estos términos e incluye la protección al medio ambiente.

Viego, P. F; de Armas, M. A; [16] En 2007, publican un trabajo titulado "*Eficiencia energética en sistemas de suministro eléctrico.*" el mismo aborda todos los fenómenos

que inciden en disminuir la eficiencia energética. Tienen en cuenta, mejora del factor de potencia, explotación eficiente de máquinas asincrónicas, ahorro de energía con accionamientos eficientes, mejora de la efectividad y eficiencia de los sistemas de iluminación, etc.

1.4 Eficiencia Energética.

La Eficiencia Energética implica lograr un nivel de producción o servicios, con los requisitos mínimos necesarios, con el menor gasto energético posible y la menor contaminación ambiental por este concepto. Todo equipamiento técnico creado por el hombre trabaja sobre la base de la utilización de energía, debido a esto, es natural que en muchos casos exista una gran influencia del costo energético sobre la inversión total, en el primero se incluyen los componentes relativos a la producción, distribución y uso de las diferentes formas de energía.

Problemas que afectan la Eficiencia Energética en una Industria.

La eficiencia energética en una industria está afectada mayormente por la presencia de; bajo factor de potencia, máquinas y transformadores subcargados, mal estado físico de la red eléctrica y de los equipos de la industria, sobrecalentamiento en el sistema de suministro, empleo de un gran número de cargas no lineales, etc. Para poder minimizar las afectaciones causadas por estos, es preciso conocer, cómo se generan, de qué dependen y los métodos para corregirlos. La gestión energética en el sector industrial es la principal vía para asegurar un uso eficiente y eficaz de la energía a través del mejoramiento continuo como se muestra en la figura 1.1.

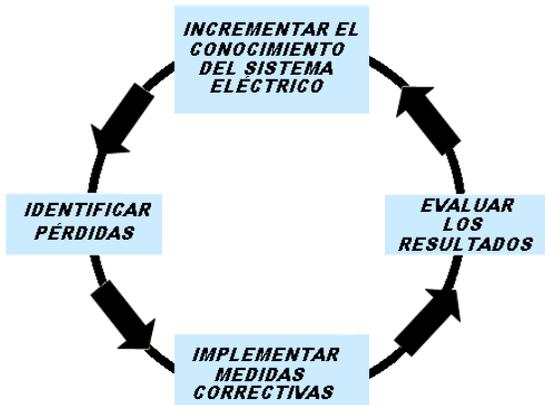


Figura 1.1: Eficiencia en el consumo de energía.

1.4.1 El Cos φ y el factor de potencia.

El Cos φ como aparece en la ecuación (1.1), no es más que la relación que existe entre la potencia activa usada en un circuito, expresada en watts o kilowatts (kW), y la potencia aparente que se obtiene de las líneas de alimentación, expresada en volts-amper o kilovolts-amper (kVA). El Cos φ siempre oscilará entre 0 y 1, y en circuitos lineales determinará el correcto aprovechamiento de la energía eléctrica.

$$\text{Cos } \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{3} * U * I} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (1.1)$$

Donde:

P: Potencia Activa, (W)

Q: Potencia Reactiva, (VAr)

S: Potencia Aparente, (VA)

U: Tensión de la red, (V)

I: Corriente demandada, (A)

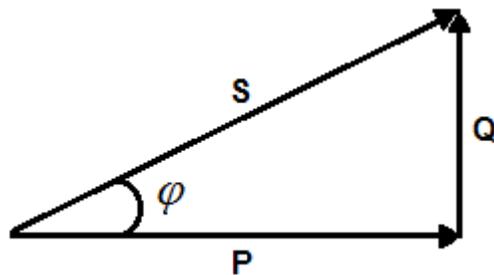


Figura 1.2: Triángulo de potencias (sin distorsión armónica)

El factor de potencia (FP) es la relación entre las Potencias Activa (P) y Aparente (S), si la onda de corriente alterna es perfectamente sinusoidal, en este caso FP y Cos φ son iguales. En el caso que la onda no sea perfectamente sinusoidal, el factor de potencia es diferente al Cos φ [17]. En la figura 1.3 se muestra el triángulo de potencias en régimen no sinusoidal el cual está compuesto por tres componentes, **P**, **Q** y **D**, esta última denominada potencia de deformación que no es más que la suma de todas las potencias que generan distorsión. La existencia de esta nueva componente surge,

debido a que la potencia aparente total, consumida en este régimen, no es igual a la suma de las potencias activa y reactiva totales, como se observa en la ecuación 1.2, sino que tiene en cuenta también la potencia de distorsión, ver ecuación 1.3.

$$S^2 \neq (P^2 + Q^2) \tag{1.2}$$

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \tag{1.3}$$

S Potencia aparente total, (VA)

P Potencia activa, (W)

Q Potencia reactiva, (VAr)

D Potencia de distorsión.

FP Factor de potencia

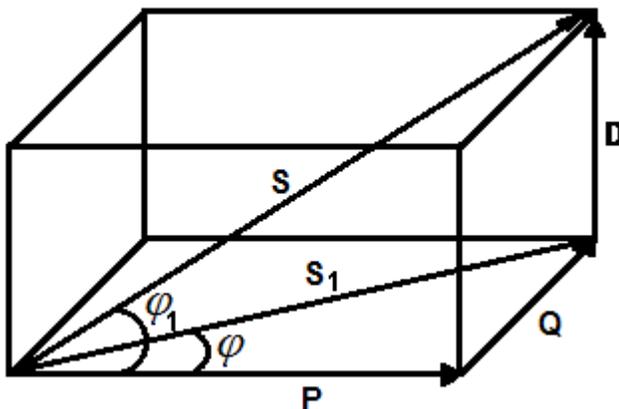


Figura 1.3: Triángulo de potencias (con distorsión armónica).

En la cara inferior del prisma se puede apreciar el triángulo rectángulo de la figura 1.2, pero ahora la hipotenusa no es S , sino S_1 , ya que la potencia aparente total (S), ha de tener en cuenta a D , en su composición. Si se observa con atención el prisma completo, se verán dos ángulos (φ y φ_1) en este caso el ángulo importante no es φ que no tiene en cuenta a D , sino φ_1 porque sí la incluye.

1.4.2 Consecuencias de un bajo factor de potencia.

Mayormente en las industrias los consumidores que existen por su naturaleza eléctrica son de carácter reactivo. Estos equipos en su mayoría cuentan con bobinas, necesarias para producir el flujo electromagnético que los pone en funcionamiento (motores, transformadores, lámparas fluorescentes, y otros similares). Este carácter reactivo obliga que junto al consumo de potencia activa P (kW) se sume el consumo de una potencia llamada reactiva Q (kVAr), las que conjuntamente determinan el comportamiento operacional de dichos equipos, hay que señalar que un alto consumo de energía reactiva produce una disminución exagerada del factor de potencia.

Mantener un bajo factor de potencia, resulta dañino y caro para una instalación, debido a que sumado a un aumento en las facturas por consumo de electricidad también se origina una circulación de corriente eléctrica excesiva en las redes de suministro, provocando daños en las mismas debido a sobrecargas, ocasionando pérdidas por efecto Joule (pérdidas de energía en forma de calor) y acortándole la vida útil al aislamiento de los conductores. Además, produce alteraciones en la regulación de la calidad técnica del suministro (variaciones de tensión), con lo cual empeora el rendimiento y funcionamiento de los consumidores y del sistema en general.

Para la empresa que suministra la energía un bajo factor de potencia en una instalación también resulta desfavorable, pues necesitará realizar mayores inversiones en los equipos de generación, ya que su capacidad en potencia aparente S (kVA) deberá ser mayor, para poder entregar esa energía reactiva adicional, tendrá que garantizar mayores capacidades en líneas de transmisión y distribución así como en transformadores para el transporte y transformación de esta energía reactiva, pueden aparecer además, problemas de estabilidad de la red eléctrica debido a elevadas caídas de tensión y baja regulación de voltaje, para evitar todo esto las empresas suministradoras de electricidad penalizan a todos los consumidores industriales que tengan un factor de potencia menor de 0.90 y bonifican a los que lo tengan por encima de 0.92 las que lo tienen entre 0.90 y 0.92 no son penalizadas ni bonificadas.

1.4.3 Métodos para mejorar el factor de potencia.

Mejorar el factor de potencia resulta práctico y económico, esto puede lograrse utilizando varios métodos, los que deben ser técnica y económicamente fundamentados, los mismos se encuentran dentro de los grupos generales siguientes:

- **Sin la utilización de medios compensadores.**

Antes de realizar cualquier inversión, si se quiere mejorar el factor de potencia en cualquier instalación será necesario realizar tareas como:

Reordenamiento del proceso tecnológico: Solamente con la aplicación de medidas organizativas del proceso de producción puede lograrse una elevación considerable del factor de potencia, siempre que ellas estén encaminadas al mejoramiento del régimen de trabajo eléctrico de la instalación. La coincidencia innecesaria en el proceso productivo de actividades que implican algún grado de subutilización de los equipos eléctricos, conducen a un mayor consumo de energía eléctrica y, casi siempre, a un empeoramiento del factor de potencia.

Selección correcta del tipo de motor: En el caso que se quiera realizar un diseño de alguna planta, (inversión inicial) es sumamente necesario que se tenga en cuenta una correcta selección de las máquinas eléctricas a utilizar, para que estén lo menos subcargadas posible, ya que las máquinas eléctricas son más eficientes cuando más próxima está su carga a la nominal.

Sustitución de los motores asíncronos subcargados por otros de menor potencia: Este método tendrá que ser estudiado cuidadosamente ya que se requiere una importante inversión en caso de implementarlo, se debe tener en cuenta la factibilidad de invertir en otro tipo de método que permita mejorar el factor de potencia sin necesidad de sustituir los motores.

Limitación del trabajo de los motores en vacío: En caso de ser posible reducir el tiempo de trabajo en vacío de motores pues como se ha dicho anteriormente, en estas condiciones son muy ineficientes y demandan una elevada potencia reactiva.

Sustitución de motores asíncronos por motores síncronos: Puede ser ésta una interesante medida para la elevación del factor de potencia y, por ende, para la reducción de las pérdidas; pero debe tenerse en cuenta que ello sólo es posible en aquellos casos en que las condiciones del proceso tecnológico así lo permitan y de que se cumplan determinados requisitos. Se llegan a justificar cuando se requieren motores nuevos y de tamaño considerable con respecto a la instalación, bajas velocidades de carácter constante y cargas poco variables. Siempre se requiere de un análisis económico para evaluar la decisión a tomar.

- **Con la utilización de medios compensadores.**

Usualmente no resultan suficientes las medidas que permiten la corrección del factor de potencia sin emplear medios compensadores y entonces, resulta imprescindible la utilización de elementos auxiliares. Estos equipos de naturaleza capacitiva, toman una corriente en adelanto con respecto a la tensión, que se opone a la corriente inductiva de las cargas de la instalación.

Los equipos empleados en la compensación de la potencia reactiva de las cargas son fundamentalmente:

- Bancos de capacitores estáticos.
- Condensadores síncronos (motores síncronos sobreexcitados).
- Compensadores activos (basados en electrónica de potencia).

De estos, por su bajo costo, reducido mantenimiento y bajas pérdidas de energía, los bancos de capacitores son los compensadores más empleados en la industria.

1.4.4 Ventajas de corregir el factor de potencia.

Las ventajas que se obtienen al corregir correctamente el factor de potencia son múltiples entre las que se destacan:

- Reducción de la factura eléctrica.
- Liberación de capacidad en el sistema.
- Reducción de las pérdidas de potencia y energía en el sistema.
- Mejoramiento de las condiciones de tensión en el sistema.

- Reducción de pérdidas de transmisión.
- Mejorar la utilización de la capacidad de transmisión.
- Aumento de los márgenes de reserva de potencia reactiva frente a eventuales perturbaciones.
- Mejora del margen de estabilidad estacionaria y transitoria del sistema.

Aunque el factor de potencia ideal es 1, no es aconsejable compensar a más de 0.95 por problemas de sobrecompensación, es necesario aclarar que si esto ocurre lejos de lograrse beneficios, se producen consecuencias negativas como sobretensiones en el sistema, las que afectan directamente a los equipos, originando en ocasiones severos daños, además incide directamente en acortar la vida útil del aislamiento en los conductores, etc.

1.4.5 Comportamiento del consumo eléctrico en una instalación.

El consumo de potencia activa P (kW) y reactiva Q (kVAr), en una industria se mantienen inalterables, desde el punto de vista de los consumidores (excluyendo los motores sincrónicos si se les varia la corriente de excitación), antes y después de la compensación reactiva (instalación de los condensadores o compensación mediante máquinas sincrónicas), la diferencia está en que antes de la compensación, la potencia reactiva Q (kVAr) que esa planta o industria estaba requiriendo, debía ser producida, transportada y entregada por la empresa de distribución de energía eléctrica, al conectar los compensadores (bancos de capacitores y/o motores sincrónicos) la energía reactiva requerida, es producida en cada una de la instalación que lo requiera, esto permite disminuir la circulación de corriente a transportar por las redes, en la figura 1.4 se muestra el triángulo de potencias (para cargas lineales) antes y después de la compensación, véase como al agregar elementos compensadores se produce una potencia reactiva capacitiva Q_C que se opone a la potencia reactiva inductiva Q_L demandada por la carga, disminuyendo el consumo de potencia aparente S (VA) desde el sistema, lo que permite ganar en cuanto a disponibilidad eléctrica y elevar el factor de potencia.

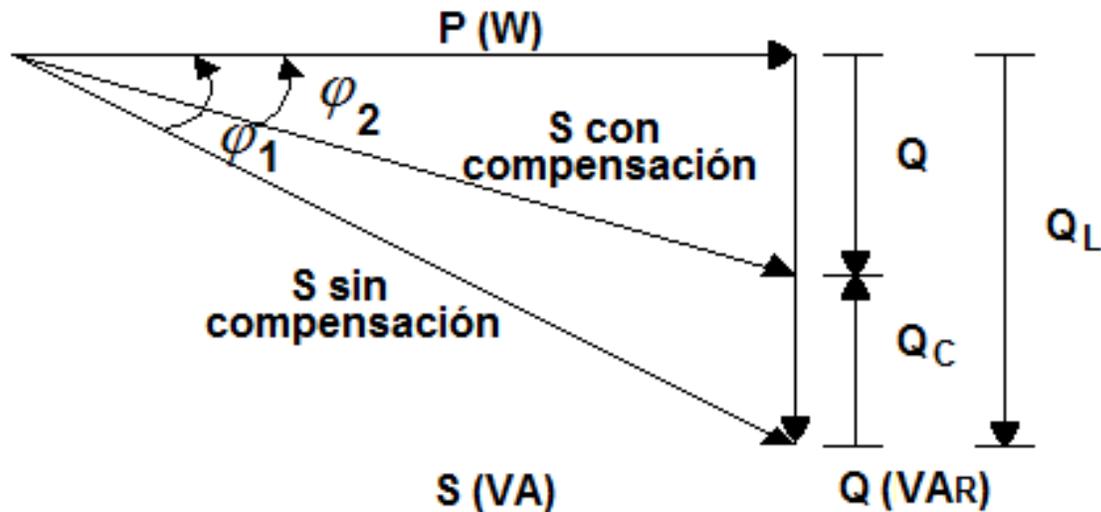


Figura 1.4: Triángulo de potencias (para cargas lineales).

1.4.6 Otros aspectos a tener en cuenta para la compensación.

En el caso que se quiera compensar utilizando bancos de condensadores será necesario conocer entre otras cosas, cómo se clasifican, cómo determinar la capacidad del banco a utilizar, qué daños provoca el efecto resonancia y dónde ubicarlo para lograr un mayor aprovechamiento de los parámetros técnicos y económicos.

- **Clasificación de los bancos de capacitores**

Los bancos de capacitores se clasifican por su modo de operación en bancos fijos y bancos automáticos o controlados.

Bancos fijos: estos se encuentran permanentemente conectados al sistema, aportando el total de su potencia reactiva en todo momento, lo que puede traer algunos inconvenientes, debido a la variabilidad de la carga en el tiempo, ya que en períodos de carga reducida, la potencia reactiva del banco, puede superar la demandada por esta y la instalación se convertiría en un generador de potencia reactiva al sistema. En estos casos, es probable la aparición sobretensiones en algunos puntos del sistema de distribución de la industria.

Bancos controlados: estos están compuestos por una o varias unidades capacitivas que se conectan o desconectan por determinada estrategia, estos bancos pueden ser:

- Controlados por tiempo.
- Controlados por tensión.
- Controlados por corriente.
- Controlados por factor de potencia.

Control por tiempo.

Este es el tipo de control más sencillo y barato. Comúnmente es un control encendido/apagado que se programa para que todos los días conecte el banco solo en el período de tiempo de máxima demanda de reactivo, evitando la sobrecompensación en el resto del día.

Control por tensión.

El control por tensión es empleado cuando la tensión en el punto de conexión del capacitor se reduce ante un incremento de la carga. Requiere una señal de tensión y tiene la ventaja de evitar cualquier tipo de sobretensión provocada por los capacitores, pero no sigue exactamente el ciclo de carga reactiva.

Control por corriente.

Se utiliza cuando la variación de tensión con el incremento de la carga es muy pequeña para utilizar un control por tensión. Es efectivo cuando la carga máxima del circuito supera dos o tres veces la carga mínima y generalmente se emplea en circuitos con grandes cargas, que funcionan intermitentemente. El sensor debe medir la corriente en el lado de la carga. Tampoco sigue el ciclo de carga reactiva.

Control por factor de potencia.

El control por factor de potencia es uno de los más empleados actualmente. Se basa en obtener señales de tensión y corriente de la red que permitan determinar el desfasaje entre ellas, como se muestra en la figura 1.5, está compuesto por una batería de varios capacitores de iguales o distintas capacidades, que al recibir la señal de control se

conectan y desconectan mediante contactores magnéticos variando la capacidad del banco, para intentar mantener el valor del factor de potencia lo más cercano posible a un valor prefijado. Este tipo de control sigue la curva de carga reactiva.

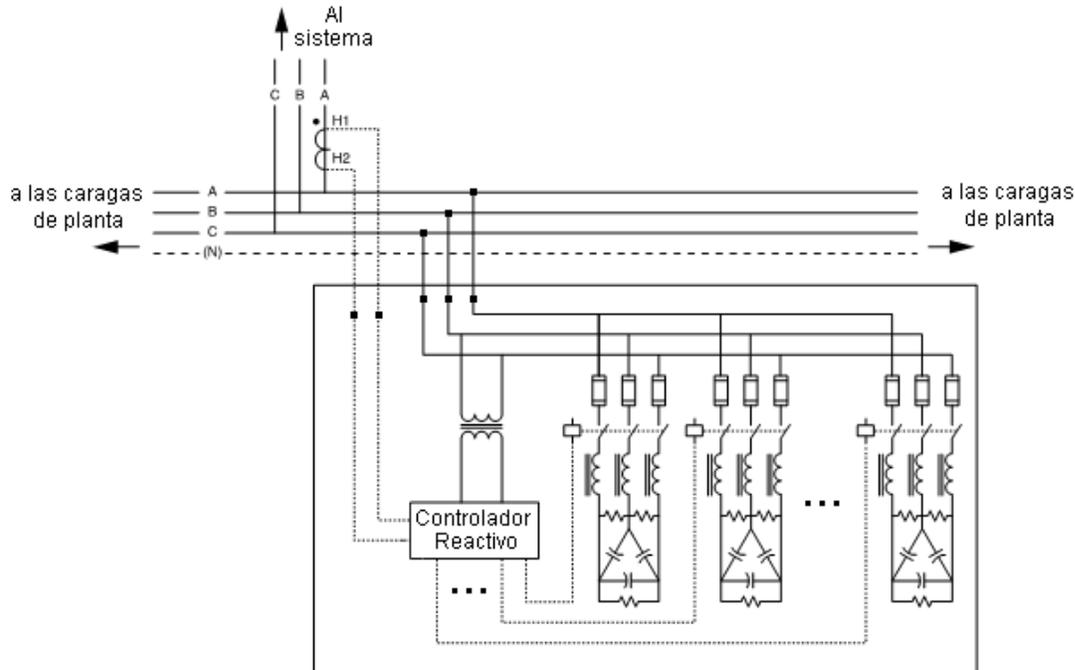


Figura 1.5: Esquema de un banco de capacitores controlado por factor de potencia.

- **Determinación de la capacidad del banco de condensadores.**

Para determinar la cantidad de condensadores o la capacidad del banco a utilizar es necesario medir la energía activa y reactiva que consumen las instalaciones existentes, se puede calcular la potencia necesaria (kVAr) que deben tener los condensadores (**Qc**) para lograr la compensación deseada, según Viego, P. F; de Armas, M. A. [16], como se muestra en la ecuación 1.4. Sin embargo, es recomendable la instalación de instrumentos registradores de potencia durante el tiempo necesario para medir por lo menos un ciclo completo de operación de la industria, incluyendo sus períodos de descanso. Por lo general se recomienda realizar registros trifásicos donde se monitoree para cada fase y para el total de la planta, Potencia Activa **P** (kW) y Reactiva **Q** (kVAr), Tensión **U** y Energía **E** (kWh), si el registrador dispone de suficiente capacidad, los valores de corriente **I**, potencia aparente **S** (kVA) y factor de potencia, podrán ser

monitoreados y leídos también. Los intervalos de medición recomendados oscilan entre cada 5 y 15 min, como máximo. Por supuesto, a menores intervalos de medición, se tendrá mayor exactitud en cuanto a la curva real de la industria, sin embargo esto dependerá de la capacidad del instrumento que se utilice y del tipo de empresa a registrar. En aquellas donde sus ciclos de carga varíen lentamente, podría extenderse aún más el intervalo de medición. De esta forma se podrá obtener una curva de carga completa la cual mostrará la máxima capacidad posible a instalar, sin el riesgo de caer en sobrecompensación reactiva.

$$Q_c = P * (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \quad (1.4)$$

Donde:

Q_c : Capacidad del banco a instalar, (kVAr).

P : Potencia activa consumida por la carga, (kW).

φ_1 : Ángulo del factor de potencia inicial.

φ_2 : Ángulo del factor de potencia deseado.

- **Afectaciones causadas por el efecto resonancia.**

También es importante, registrar con las mediciones, el grado de distorsión armónica existente, para evitar la posibilidad de resonancia después de la instalación del banco de capacitores. La batería de condensadores, con la inductancia de la red de distribución y la del transformador, forman un circuito oscilante. Dicho circuito tiene una impedancia que varía con la frecuencia, amplificando los armónicos en la red. Si las cargas no lineales generan una corriente armónica con una frecuencia igual o próxima a la frecuencia de resonancia de dicho circuito oscilante, se producirá el fenómeno de resonancia, que hace que la impedancia de dicho circuito paralelo sea muy elevada y por lo tanto también la tensión para ese armónico. Esto produce sobretensiones y sobrecorrientes que pueden provocar la perforación del dieléctrico de los condensadores, entre otras averías.

- **Determinación de la ubicación de los condensadores.**

Para la instalación de los capacitores deberán tomarse en cuenta diversos factores que influyen en su ubicación como lo son: La variación y distribución de cargas, el factor de carga, tipo de motores, uniformidad en la distribución de la carga, la disposición y longitud de los circuitos y la naturaleza de la tensión. Cuando los flujos de potencia cambian frecuentemente entre diversos sitios de la planta y cargas individuales, se hace necesario efectuar la corrección primero en una parte de la planta, verificar las condiciones obtenidas y después compensar en la otra. Sin embargo, es más ventajoso usar un capacitor de grupo ubicado lo más equidistante que se pueda de las cargas. Esto permite la desconexión de una parte de los capacitores de acuerdo a condiciones específicas de cargas variables.

Cuando la longitud de los conductores es considerable, se recomienda la instalación de capacitores individuales a los motores, los capacitores instalados cerca de las cargas pueden dejar de operar automáticamente cuando las cargas cesan, incrementan el voltaje y por ende el rendimiento del motor, pero se necesitarán varios condensadores de diferentes capacidades, resultando esto en un costo mayor. Sin embargo deberá evaluarse el beneficio económico obtenido con la compensación individual. Considerando que el costo de los capacitores para bajos voltajes es más del doble que los de alta tensión. Por esto, cuando en los circuitos de motores la tensión es pequeña, lo más económico es usar una instalación de grupo.

Se debe considerar también que, cuando los capacitores se instalan antes del banco principal de transformadores, éstos no se benefician y no se alivia su carga en kVA. Esta es una buena razón para usar capacitores de bajos voltajes a pesar de su alto costo.

1.5 La calidad de la energía.

Como se puede ver en, Anexos; Tabla 1, la calidad de la energía, está determinada por parámetros relacionados con la característica de la onda de tensión, entre los que se encuentran: frecuencia, amplitud, forma de onda y simetría del sistema trifásico,

cualquier alteración en alguno de estos parámetros la afecta directamente. Respecto a la calidad de la onda de tensión o calidad del producto, puede considerarse que la generada en las centrales eléctricas es una senoide prácticamente perfecta, manteniendo constante en el tiempo su frecuencia, su amplitud y el equilibrio y simetría de las tensiones trifásicas. En la valoración general de la calidad del suministro de energía eléctrica a los clientes, se tienen en cuenta, principalmente, los dos aspectos técnicos siguientes:

- La continuidad del suministro (existencia o no de tensión).
- La calidad de la onda de tensión (calidad del producto).

En lo que se refiere a continuidad del servicio se consideran los dos tipos de interrupciones siguientes: breves y largas.

Las interrupciones breves de tensión, incluidas entre las alteraciones que inciden directamente en la calidad de la onda de tensión, tienen una duración de hasta tres minutos y su número anual puede variar desde algunas decenas a varias centenas. La duración de aproximadamente el 70% de las mismas es inferior a un segundo y se las suele denominar en ese caso microcortes. Las interrupciones breves están provocadas por defectos fugitivos en la red, despejados por los sistemas de protección con reposición del suministro, todo ello de manera automática o con rápidas actuaciones del telecontrol. Las interrupciones largas de tensión tienen una duración superior a tres minutos y, en condiciones normales de explotación, su frecuencia anual de aparición puede ser inferior a diez o alcanzar hasta cincuenta, según las regiones, tipo de línea, entorno geográfico, etc. Las interrupciones largas están provocadas por defectos permanentes en la red que necesitan, en general, una reparación de elementos dañados antes de la reposición del suministro, con las pertinentes actuaciones de aislamiento de la zona afectada.

El desarrollo de la electrónica de potencia y el uso de equipos electrónicos modernos (fundamentalmente los que trabajan a base de conmutaciones) han cambiado la vida actual, pero han cambiado también la característica de carga de las instalaciones que

cuentan con estos equipos. Las cargas electrónicas han ganado el nombre de “Cargas no lineales”, debido a su particular característica de consumir una corriente no sinusoidal aunque se alimente de una señal sinusoidal, esto produce una distorsión de las señales de tensión y corriente a lo largo del sistema de distribución de energía eléctrica.

Cuando la presencia de armónicos es importante, se provocan alteraciones que pueden ocasionar daños a la instalación eléctrica y a los equipos conectados a ella. Estas se clasifican en dos grandes grupos:

- Consecuencias a corto plazo (disparos intempestivos de las protecciones, vibraciones y ruidos anormales, etc.).
- Consecuencias a largo plazo (calentamiento progresivo de conductores, transformadores, bancos de capacitores, etc.).

1.5.1 Norma IEEE 519-1992.

En 1981, el Instituto de Ingenieros en Electricidad y Electrónica (IEEE) elaboró el estándar IEEE 519-1992 titulado “*Recomendaciones Prácticas y Requerimientos de la IEEE para el Control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia*” [10]. El documento establece los niveles de distorsión de tensión aceptables en sistemas de distribución al mismo tiempo que establece límites en la distorsión armónica de corriente que los usuarios pueden “inyectar” al sistema. En este artículo se presenta una explicación simplificada sobre la aplicación de este estándar desde el punto de vista del usuario industrial.

- Distorsión armónica total (THD–*Total Harmonic Distortion*): es el índice más utilizado para cuantificar la distorsión armónica.

$$THD(\%) = \frac{100}{V_1} \sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} (V_h)^2} \quad (1.5)$$

Donde:

v_h : Armónicos de tensión, (V).

v_1 : Tensión real, (V).

Este índice presenta la ventaja de que es fácil y rápido de calcular, pero no permite la obtención del espectro total de la señal. Un valor comúnmente utilizado como frontera entre alta y baja distorsión es el correspondiente a un THD igual a 5%. Sin embargo, este valor es demasiado alto para ser permitido en sistemas de transmisión, pero para algunos sistemas de distribución es válido. El estándar IEEE 519-1992 establece límites para los niveles de distorsión de tensión para las compañías suministradoras de energía. Estos límites están en función del nivel de la tensión del sistema de suministro, tal y como lo muestra en la tabla 1.1.

Tabla 1.1: Límites de los niveles de distorsión de tensión.

Voltaje	Armónicas Individuales (%)	THD(%)
$V < 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 < V < 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$V > 161 \text{ kV}$	1.0	1.5

La distorsión total por armónicos se denomina distorsión total de demanda y debería calcularse asimismo hasta infinito. Muchos autores limitan el cálculo de los componentes individuales y la TDD a 50.

- Tasa de distorsión en la demanda (TDD–*Total Demand Distortion*): Es la suma de la raíz cuadrada total de las distorsiones de corrientes armónicas expresada en por ciento de la máxima corriente de carga demandada, ver ecuación 1.6 [10] en Anexos, Tabla 2 se encuentran los valores límites de TDD establecidos por la IEEE 519-1992.

$$TDD(\%) = \frac{100}{I_L} \sqrt{\sum_{h=2}^{h \max} (I_h)^2} \quad (1.6)$$

Donde:

I_h : Corrientes armónicas, (A).

I_L : Corriente máxima demandada, (A).

1.6 Filtros contra corrientes armónicas.

Con la utilización de filtros se logra:

- Mejorar el factor de potencia.
- Reducir armónicos.
- Reducir corrientes de retorno por el neutro en sistemas trifásicos.
- Minimizar el impacto sobre los transformadores de distribución.
- Liberar capacidad en el sistema de distribución.

1.6.1 Ubicación de los filtros.

- Cuando existen cargas altamente contaminantes, el filtro debe ubicarse en el lado de baja tensión; de esta forma el transformador de potencia sirve de amortiguador, tanto de corrientes armónicas provenientes de otras cargas, como de las corrientes armónicas generadas por su propia carga, aislándose el problema.
- Cuando las cargas de armónicos están distribuidas, los filtros deben ser ubicados en media tensión y en lugares estratégicos para evitar la excesiva circulación de corrientes armónicas por el sistema.

1.6.2 Problemas que afectan a los filtros.

El mayor problema que puede presentar en un filtro es que se desintonice. Las desintonizaciones más comunes en los filtros están causadas por:

- Deterioro de los condensadores, esto provoca la disminución de la capacitancia total, aumentando la frecuencia a la cual el filtro fue sintonizado.
- Tolerancia de fabricación tanto en el reactor como en los condensadores.
- Variación de temperatura.
- Variación en el sistema.

De estas, las tres primeras ocurren por variaciones propias de los elementos constructivos de los filtros, mientras que el último depende de las variaciones del equivalente del sistema. Típicamente, los filtros se sintonizan aproximadamente entre un 3% y un 10% por debajo de la frecuencia deseada, para tener la opción de una buena operación.

1.7 Corrección del factor de potencia en circuitos con contaminación armónica.

Hoy, y cada día más, para compensar la energía reactiva en una instalación no sólo se debe tener presente los datos tradicionales, es decir potencia activa factor de potencia inicial, y final, índice de carga, etc., sino que también hay que tener en cuenta la presencia de posibles consumidores que pueden contaminar la instalación con armónicos. Actualmente es posible encontrar en una instalación cargas tanto lineales como no lineales.

Las cargas lineales son aquellas en las que se obtiene como respuesta a una señal de tensión sinusoidal, una corriente también sinusoidal, por ejemplo: resistencias, motores, transformadores, etc.

Las cargas no lineales, son las principales causantes de la contaminación armónica en un sistema cualquiera y también afectan el valor del factor de potencia, en estas la corriente absorbida no tiene la misma forma que la tensión que la alimenta, lo que provoca que desde la red se tome una corriente retrasada de su tensión, o lo que es lo mismo, posee un factor de potencia inductivo, exactamente igual que en el caso de introducir una inductancia verdadera en serie con la carga.

Los condensadores son componentes del sistema que por sus características propias influyen en la distorsión armónica de la instalación, estos aunque no generan armónicos son capaces de amplificar los existentes agravando el problema, y al mismo tiempo, son elementos muy sensibles y fuertemente afectados por las perturbaciones que los armónicos ocasionan. En caso de compensar la energía reactiva, con el empleo de condensadores, en instalaciones con presencia de armónicos, debe tenerse en cuenta que los condensadores presentan una baja impedancia a frecuencias elevadas. Como se puede ver en la ecuación 1.6, la reactancia capacitiva X_C , es inversamente proporcional a la frecuencia angular ω , por lo que absorben las intensidades armónicas mucho más fácil que otras cargas, esto provoca que se reduzca considerablemente su vida útil en caso de existir armónicos, por tal motivo siempre que se va a compensar

energía reactiva en presencia de ellos, se recomienda eliminarlos o disminuirlos, antes de llevar a cabo la compensación.

$$X_C = \frac{1}{\omega * C} \quad (1.6)$$

$$\omega = 2 * \Pi * f \quad (1.7)$$

Donde :

X_C : Reactancia capacitiva, (Ω).

ω : Frecuencia angular, (rad/seg).

C : Capacitancia del banco, (Farad).

f : Frecuencia cíclica, (Hz).

Π : 3,14159265

Conclusiones del capítulo.

1. La eficiencia energética en un sistema de suministro industrial, está determinada fundamentalmente por: bajo factor de potencia, máquinas y transformadores subcargados, mal estado físico de la red eléctrica y de los equipos de la industria, sobrecalentamiento en el sistema de suministro, etc.
2. El factor de potencia de una instalación eléctrica es una medida de la eficiencia de la misma y siempre va a oscilar entre 0 y 1, sin embargo, cuando existen armónicos no es igual al $\cos \varphi$, y las formas de medirlo tradicionalmente pueden ser erróneas.
3. El factor de potencia puede mejorarse sin la utilización de medios compensadores o con el empleo de los mismos, el uso de condensadores para compensarlo puede acarrear problemas de resonancia, fundamentalmente ante la presencia de armónicos.
4. La calidad de la energía se ve afectada mayormente por la utilización de elementos de conmutación (circuitos de electrónica de potencia), estas cargas reciben el nombre de “cargas no lineales”.

Capítulo II: Materiales y Métodos.

2.1 Introducción:

En este capítulo se describe la red de suministro de la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, se muestran los resultados arrojados después de realizar un levantamiento del sistema de distribución de media tensión de la empresa desde conductores hasta consumidores, se realizan pruebas a los conductores, mediciones en diferentes puntos del sistema de suministro y se simula el comportamiento de la red utilizando el software Easy Power, antes de compensar y después de propuesta la compensación de potencia reactiva, para comparar los resultados y verificar si la propuesta es factible o no.

2.2 Descripción del sistema eléctrico de la empresa.

El Dispositivo de Distribución Principal (DDP), como se muestra en la figura 2.1, es el nodo principal de la empresa, este cuenta con cinco secciones de barras distribuidas de la siguiente forma: se enlaza con el Sistema Electroenergético Nacional (SEN) a través de dos transformadores de fabricación Soviética tipo TRDH-40000/115 17.6 T-Y, de 40MVA, La conexión proveedora principal llega a estos transformadores procedente de la subestación 220/110 kV ubicada en Punta Gorda, por medio de dos líneas aéreas de 110 kV con cables AC-185 mm². La salida de los dos transformadores están conectadas a la 2^{da} y 4^{ta} sección de barra respectivamente, las tres secciones restantes están conectadas a un generador cada una, las secciones 1^{ra}, 3^{ra} cuentan individualmente con un generador de 12 MW marca Skoda de producción checa y la 5^{ta} con un generador de 25 MW tipo BDAX62-195ERH, estas cinco secciones de barra forman un lazo cerrado mediante reactores, enlazándose las secciones I con II, II con III, III con IV, IV con V y V con I.

Desde el Dispositivo de Distribución Principal se le suministra energía a la propia CTE, así como las subestaciones de distribución 1SD, 2SD, 5SD y las subestaciones transformadoras ST6, ST7, ST8, ST12, ST14.

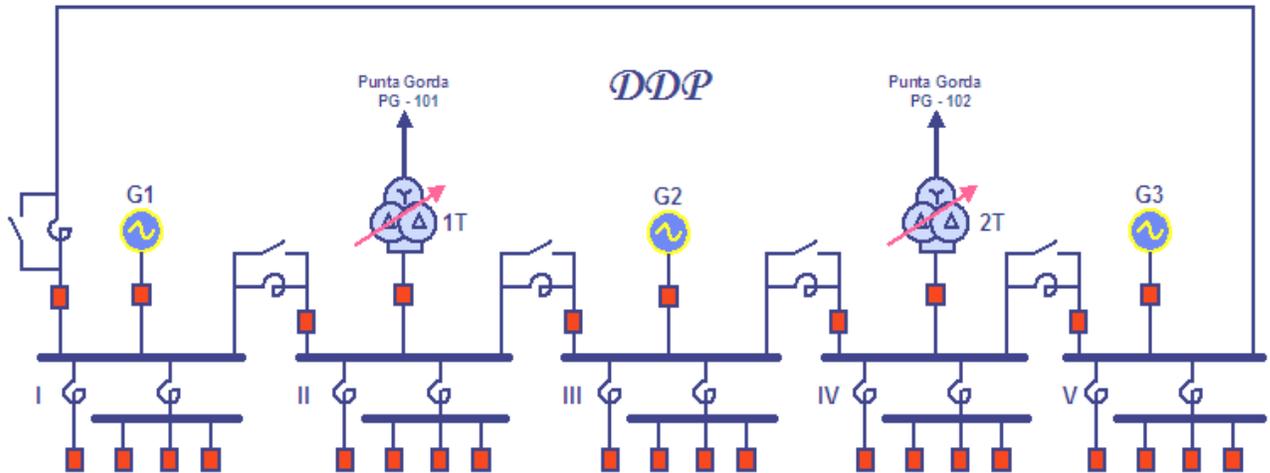


Figura 2.1: (DDP) nodo principal de la empresa.

La subestación 1SD está localizada en la casa de compresores, consta de cuatro secciones de barra que permiten enlazarse entre ellas (I con II y III con IV), estas son alimentadas con una tensión de 10.5 kV, independientemente desde el Dispositivo de Distribución Principal (DDP). La subestación suministra energía a los motores más potentes de la empresa (los motores sincrónicos de 2500 y 1600 kW y los asincrónicos de 1700 kW), entre ellos se encuentran; cuatro molinos, seis motores sincrónicos para la producción de aire de servicio y transporte neumático, cinco motores asincrónicos, tres de ellos para la producción de los compresores de aire tecnológico y dos ventiladores, además, desde esta subestación se alimentan todas las subestaciones de alumbrado, así como las subestaciones de fuerza de la planta de Hornos de Reducción, Lixiviación, Calcinación y Sínter, Recuperación de Amoníaco, Servicio Energético, el área de laboratorios, talleres y edificios administrativos.

La subestación 2SD se localiza también en la casa de compresores, consta de cuatro secciones de barra que permiten ser enlazadas entre ellas por medio de interruptores, (I con II y III con IV), cada sección es alimentada por los transformadores 1T, 2T, 3T y 4T de 6300 kVA, los que se encargan de transformar la tensión proveniente del DDP de 10.5 kV a 6.3 kV, que es la tensión nominal de esta subestación. Desde aquí se le suministra energía a los motores asincrónicos y sincrónicos de 6,3 kV, (excavadoras, ventiladores,

compresores), entre ellos se encuentran; tres compresores de aire de instrumento, cuatro ventiladores de circulación de los molinos, dos ventiladores de los silos, un ventilador de gases de los secaderos, la mina y dos Centros de Control de Motores (CCM) de media tensión denominados 3SD y 4SD.

La subestación 3SD está ubicada en la planta de secaderos y es alimentada con una tensión de 6.3 kV desde la 2SD, la misma consta de dos secciones de barra que permiten ser enlazadas entre ellas mediante un interruptor. Desde aquí se le suministra energía a los transportadores, motores asíncronos de las trituradoras, extractores de gases de los secaderos (exhauster) y a la planta de preparación de mineral.

La subestación 4SD se alimenta con una tensión de 6,3 kV proveniente desde la 2SD, la misma consta de dos secciones de barra que permiten ser enlazadas entre ellas mediante un interruptor. Esta se encarga de alimentar a los motores sincrónicos que accionan las bombas de agua de la torre de enfriamiento y a los motores asíncronos que accionan a los extractores de gases de la planta Calcinación y Sínter.

La subestación 5SD se encuentra ubicada en la planta de secaderos y se alimenta con una tensión de 10,5 kV desde la Central Termoeléctrica, la misma está compuesta por dos secciones de barra que permiten ser enlazadas entre ellas mediante un interruptor. Desde aquí se le suministra energía a varias subestaciones transformadoras, tales como: 5TP-6, 5TP-13, 5TP-19, 5TP-1y2, 5TP-4y5 y 5TP-21.

Nota aclaratoria: Aunque el generador de 25 MW ya está montado, por razones de trabajo en el montaje y ajuste de las protecciones, etc, aún no está entregando energía, por lo que la fábrica en estos momentos sigue alimentándose de las otras cuatro secciones de barra del Dispositivo de Distribución Principal.

2.3 Descripción del Cableado del sistema de suministro de media tensión.

El sistema de suministro de media tensión de la fábrica cuenta fundamentalmente con dos tipos de conductores, véase figura 2.2, mayormente conductores trefilares de aluminio (trenzado), de la compañía GENERAL CABLE de 6/10kV (Secos), estos poseen buenas cualidades en cuanto a la no propagación del fuego y la no contaminación del medio ambiente. El nivel máximo de tensión para el que fueron fabricados es menor de 10.5 kV que es la tensión nominal de gran parte del sistema de suministro, lo que provoca la ocurrencia ocasional de averías, además de estos, en menor grado, cuenta con conductores trefilares de aluminio (Barras), de fabricación soviética, del tipo AAΨB-T (En aceite). El aislamiento de estos conductores está hecho con papel especial, impregnado en aceite, debido a su deterioro paulatino han sido sustituidos casi en su totalidad. Es válido destacar que estos conductores (AAΨB-T) cuentan aproximadamente con 30 años de explotación, por lo que en estos tipos de cables son muy frecuentes las fallas, debido, entre otros aspectos, a la pérdida del aceite y daños físicos, además de haber superado ya el tiempo máximo de explotación que otorga el fabricante, en Anexos; Tabla 3, se muestran tablas por subestaciones con datos actualizados de los conductores, se tiene en cuenta, armario del que se conecta, consumidor que alimenta, sección transversal, longitud en metros y tipo de conductor.



Figura 2.2: Secciones de los conductores, AAΨB-T y GENERAL CABLE.

2.4 Descripción de las máquinas sincrónicas existentes en la empresa.

En la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” existen instaladas 29 máquinas sincrónicas, agrupadas de la siguiente forma:

- 3 Turbogeneradores.
- 2 Compresores K-500.
- 4 Compresores 5HK.
- 4 Motores de los Mecanismos Principales de los Molinos de Bolas.
- 9 Bombas de Agua.
- 4 Motores de los Mecanismos Principales de las Excavadoras.
- 3 Compresores BM.

Según el tipo de rotor se clasifican en máquinas de polos salientes, o polos interiores:

De polos interiores están instalados nueve: tres turbogeneradores (dos de 12000 y uno de 25000) kW, dos compresores K-500 de 2500 kW y cuatro compresores 5HK de 1600 kW.

De polos salientes están instaladas: cuatro motores de los mecanismos principales del Sistema Ward-Leonard de las Excavadoras de 500 kW, cuatro motores de los mecanismos principales de los Molinos de Bolas de 800 kW, tres Compresores BM de 320 kW y nueve bombas de agua de 630 kW

Los Compresores BM y las bombas son de ejecución abierta. Los turbogeneradores, los restantes compresores y los molinos son de ejecución cerrada con enfriamiento por aire. En el caso de los generadores poseen intercambiadores agua-aire para el enfriamiento del devanado del estator, el aire es producido por los ventiladores montados en el rotor.

En Anexos, Tabla 4 aparecen las características de chapa de todas estas máquinas.

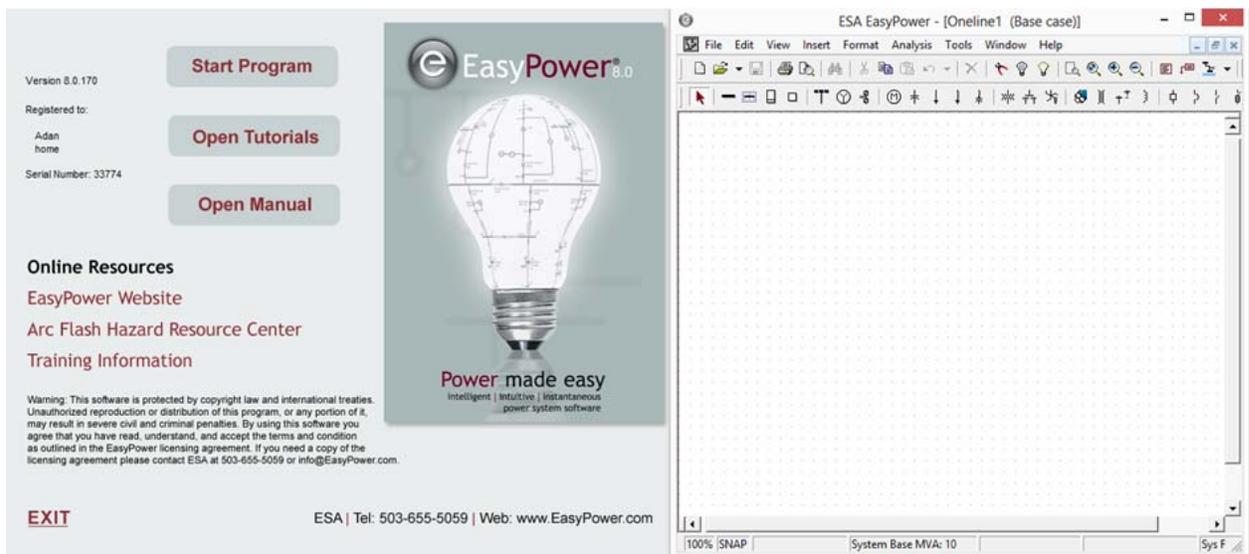
2.5 Software e instrumentos utilizados

Para lograr tener una referencia de los problemas existentes en el sistema de suministro, fue necesario una monitorización del comportamiento de la carga, para ello se empleó el analizador de redes “Portable Power Quality Meter” (de Multilin), conocido por sus siglas como (PPQM) (ver figura 2.3), ideal si se necesita realizar un muestreo de forma continua en un sistema trifásico. El equipo ofrece medida de intensidad, tensión, potencia activa, reactiva y aparente, factor de potencia, frecuencia y THD de corriente y tensión. Sus ajustes programables permiten añadir funciones de control para aplicaciones específicas, las que pueden incluir alarmas de sobre y mínima tensión e intensidad. El PQM puede utilizarse como dispositivo de recogida de datos para un sistema de automatización. El puerto frontal RS-232 puede conectarse a una computadora personal para ofrecer acceso instantáneo a la información. La opción de análisis de energía incluida en el PQM permite mostrar cualquier intensidad o tensión de fase y calcular el contenido de armónicos. Ver en Anexos, Figura 1 otras características del PQM.



Figura 2.3: Portable Power Quality Meter (PPQM).

Para las simulaciones se empleó el software Easy Power ver figura 2.4, esta es una herramienta informática muy potente que permite realizar; corridas de flujo de potencia, coordinación de protecciones, análisis de armónicos, entre otras aplicaciones útiles para consumidores industriales con complejos circuitos de suministro el programa está avalado y cuenta con un elevado nivel de precisión.



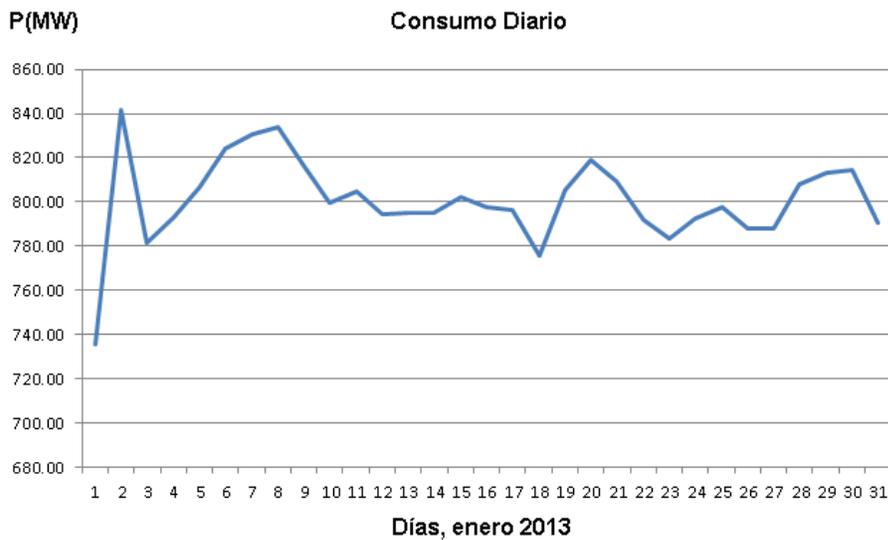
Easy Power

Ventana Principal

Ventana de Trabajo

Figura 2.4: Software Easy Power simulador de sistemas eléctricos de suministro.

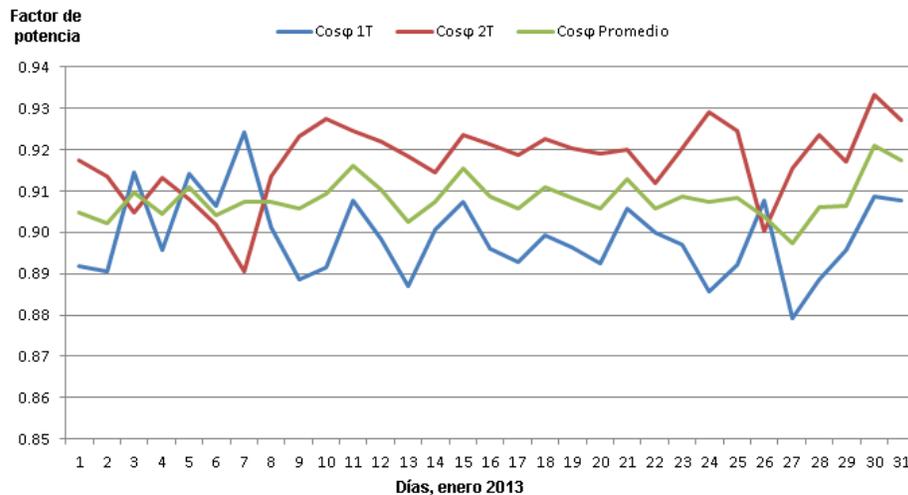
2.6 Comportamiento del consumo eléctrico de la empresa.



Gráfica 2.1 Consumo eléctrico total de la empresa, mes de enero, 2013.

Como se puede apreciar en la gráfica 2.1 el consumo diario de la empresa actualmente tiene un valor promedio de aproximadamente 805 MW, por lo que, en una hora consume alrededor de 33 MW. Este consumo incluye todas las pérdidas dentro del sistema de suministro de la fábrica.

2.7 Comportamiento del factor de potencia en los transformadores 1T y 2T del DDP y en subestaciones distribuidoras.



Gráfica 2.2 Comportamiento del factor de potencia en los transformadores 1T y 2T, en el mes de enero de 2013.

Como se puede apreciar en la gráfica 2.2 el comportamiento del factor de potencia en los transformadores 1T y 2T ubicados en el Dispositivo de Distribución Principal, tiene un valor promedio de aproximadamente 0.91. Para lograr este factor de potencia es necesario variar la corriente de excitación en los generadores de forma tal que le suministren a la fábrica gran parte de la potencia reactiva que la misma demanda y por lo tanto, esta potencia reactiva no es consumida del Sistema Electroenergético Nacional (SEN). Aunque con mantener el factor de potencia cercano a este valor, se evita la penalización por parte de la empresa eléctrica, en términos de eficiencia, no es factible, pues las pérdidas continúan internamente en la red de suministro eléctrico de la empresa, desde el nodo principal hasta los consumidores.

El comportamiento del factor de potencia en la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara", no tiene valores óptimos en todas las subestaciones distribuidoras, para demostrarlo, con el desarrollo del proyecto se realizaron mediciones que permitieron identificar los puntos que presentan mayores problemas en relación al factor de potencia, a modo de resumen se muestra la tabla 2.1 donde se encuentran los valores de; potencia activa, reactiva, aparente, y factor de potencia para cada sección de barra de las principales subestaciones distribuidoras en las condiciones actuales.

Tabla 2.1 Parámetros por secciones de barra, (principales subestaciones).

Subestación/Sección	P (MW)	Q (MVAr)	S (MVA)	FP
1SD1	6.179	4.429	7.602	0.813
1SD2	4.411	2.807	5.228	0.844
1SD3	5.753	2.343	6.212	0.926
1SD4	5.663	2.842	6.336	0.894
2SD1	2.598	1.74	3.127	0.831
2SD2	2.578	1.758	3.120	0.826
2SD3	2.099	0.374	2.132	0.984
2SD4	3.097	0.224	3.105	0.997
3SD1	1.266	1.039	1.638	0.773
3SD2	1.441	1.106	1.817	0.793
4SD1	1.731	0.289	1.755	0.986
4SD2	2.835	0.105	2.837	0.999
5SD1	1.014	0.893	1.351	0.750
5SD2	0.862	0.783	1.165	0.740

Nótese que en las secciones 1 y 2 de la 1SD y 2SD, el factor de potencia registrado tiene valores por debajo de 0.85, lo que puede estar asociado a que desde estas secciones de barra, (en el caso de la 1SD) se abastecen subestaciones que alimentan un gran número de cargas no lineales, como la 1TP-17, y la sección 1 de la 1TP-1 y 1TP-2 respectivamente, (en el caso de la 2SD) se alimentan las secciones 1 y 2 del centro de control de motores (CCM) de media tensión 3SD, el cual entrega energía en su totalidad a motores asíncronos y como se puede ver en la tabla también posee un factor de potencia desfavorable, en este caso menor de 0.8 para ambas secciones de barra. Por último secciones 1 y 2 de la 5SD que también abastece a subestaciones que alimentan a cargas no lineales como la 5TP-6. Las causas de que en las restantes secciones de las diferentes subestaciones, no exista un bajo factor de potencia pueden estar asociadas a que desde ellas, aunque se alimentan motores asíncronos, se alimentan también máquinas síncronas que son capaces de autoabastecerse de energía reactiva y aportar a otros consumidores conectados a esa sección de barra, por lo que la demanda de reactivo de la sección en general es muy pequeña y por tanto el factor de potencia estará cercano a 1.

2.8 Montaje del sistema de suministro de media tensión en el Easy Power.

Para poder realizar cualquier simulación es necesario montar el esquema a simular con todos los componentes bien interconectados en el software a utilizar, para lograr que la simulación sea lo más acertada posible hay que tener en cuenta que los parámetros de los consumidores y los conductores deben ser los reales. La figura 2.5, muestra cómo queda conformado el esquema monolineal de media tensión de la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara", montado en la ventana de trabajo del Easy Power.

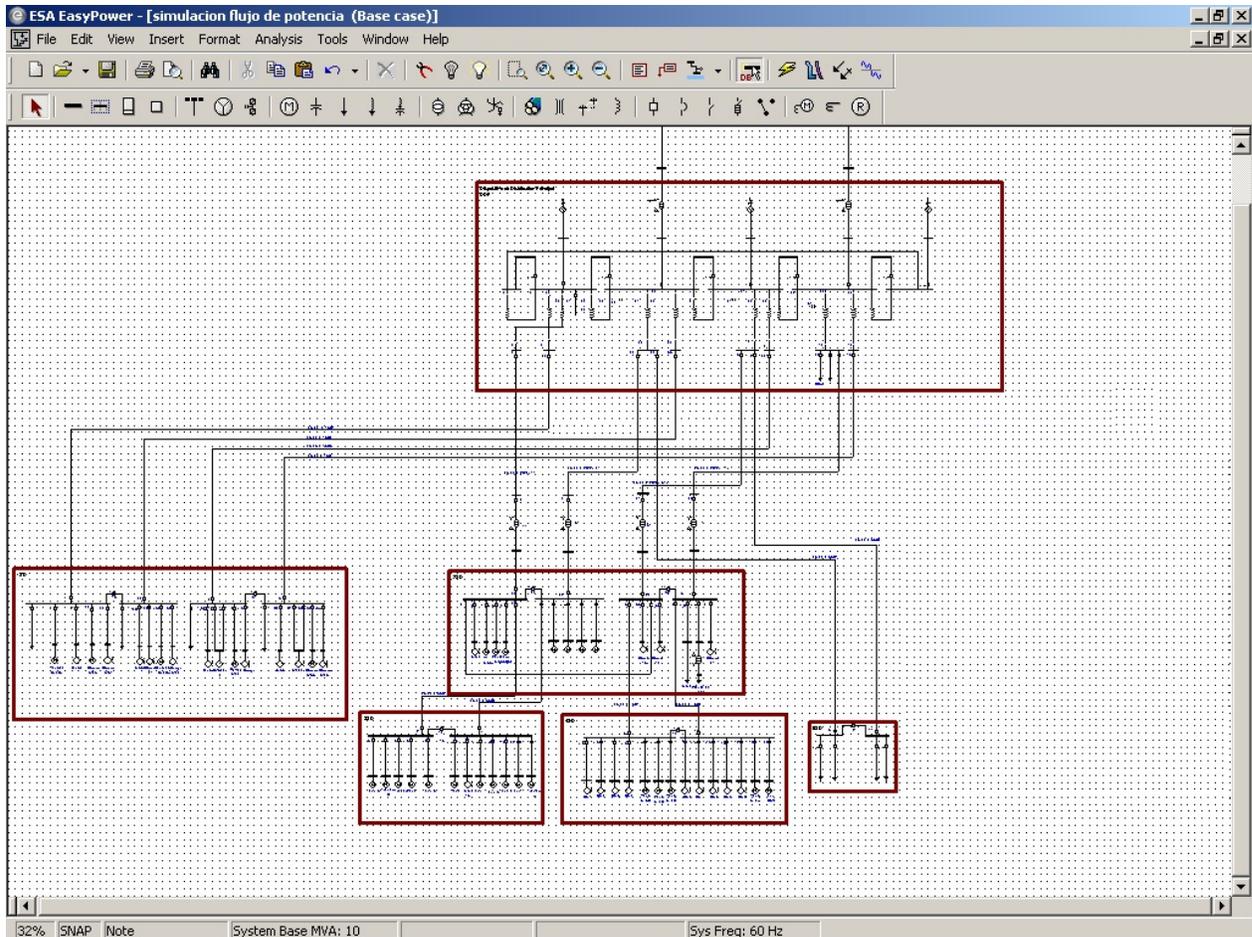


Figura 2.5: Esquema de suministro de media tensión en el Software Easy Power.

2.9 Simulación del flujo de potencia de la empresa en condiciones actuales.

Después de montado el esquema con los datos actualizados, y correr la simulación, el programa proporciona un reporte detallado que permite analizar el comportamiento real del sistema de suministro, las tabla 2.2 y 2.3 muestran un resumen del reporte obtenido después de la corrida de flujo de potencia en condiciones actuales, la figura 2.6 muestra el nodo principal de la empresa para esta corrida, nótese que; se encuentra trabajando con un solo generador y el sistema, (Así se encontraba la alimentación de la empresa en el tiempo que fueron obtenidas las mediciones), los reactores que enlazan las secciones de barra del (DDP), no están cortocircuitados. En los reportes mostrados en las tablas 2.4 y 2.5 se observa cómo disminuyen las pérdidas de potencia reactiva, pérdidas de potencia activa y mejora el factor de potencia, con solo cortocircuitar los

reactores de enlace entre las secciones de barra (II y III) y (IV y V), del Dispositivo de Distribución Principal (DDP). Ver figura 2.7.

- Antes de la compensación, reactores de enlace sin cortocircuitar.

Tabla 2.2: Resumen del reporte del sistema.

System Summary Report				
Total	kW	kVAR	kVA	PF
Generation in System	34667	18285	39194	0.884
Load in System	34453	16808	38335	0.899
Shunt Load in System	0	0		
Losses in System	214	1477		
Check of Balance	0	0		

Tabla 2.3: Resumen del reporte de los generadores.

Generator		Solution							
Name	Type	kW	kVAR	kVA	Pf	Vpu	Deg	Eq'pu	Deg
GEN-1	PQG	12000	9000	15000	0.8	1.004	-1.45	1.148	6.89
UTIL-1	Sw	22667	9285	24495	0.925	1	0	1.012	1.55

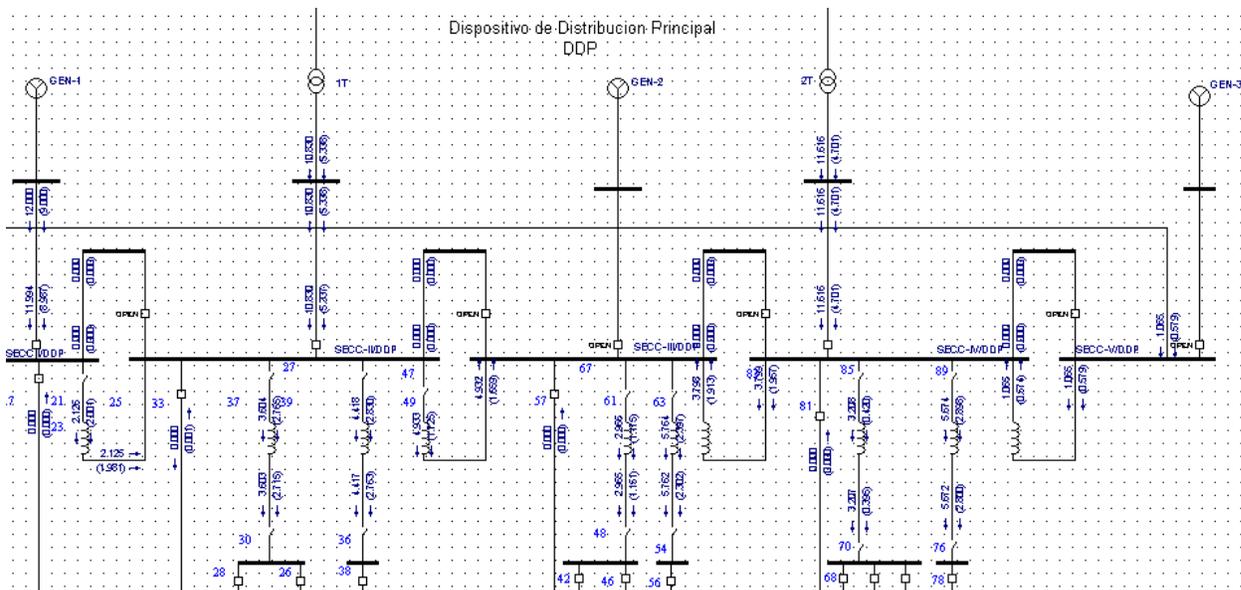


Figura 2.6: Dispositivo de Distribución Principal (DDP), reactores de enlace sin cortocircuitar.

- Antes de la compensación, reactores de enlace entre las secciones de barra (II y III) y (IV y V) cortocircuitados.

Tabla 2.4: Resumen del reporte del sistema.

System Summary Report				
Total	kW	kVAR	kVA	PF
Generation in System	34665	18195	39151	0.885
Load in System	34453	16808	38335	0.899
Shunt Load in System	0	0		
Losses in System	212	1387		
Check of Balance	0	0		

Tabla 2.5: Resumen del reporte de los generadores.

Generator		Solution							
Name	Type	kW	kVAR	kVA	Pf	Vpu	Deg	Eq'pu	Deg
GEN-1	PQG	12000	9000	15000	0.8	1.003	-1.58	1.148	6.77
UTIL-1	Sw	22666	9195	24460	0.927	1	0	1.012	1.55

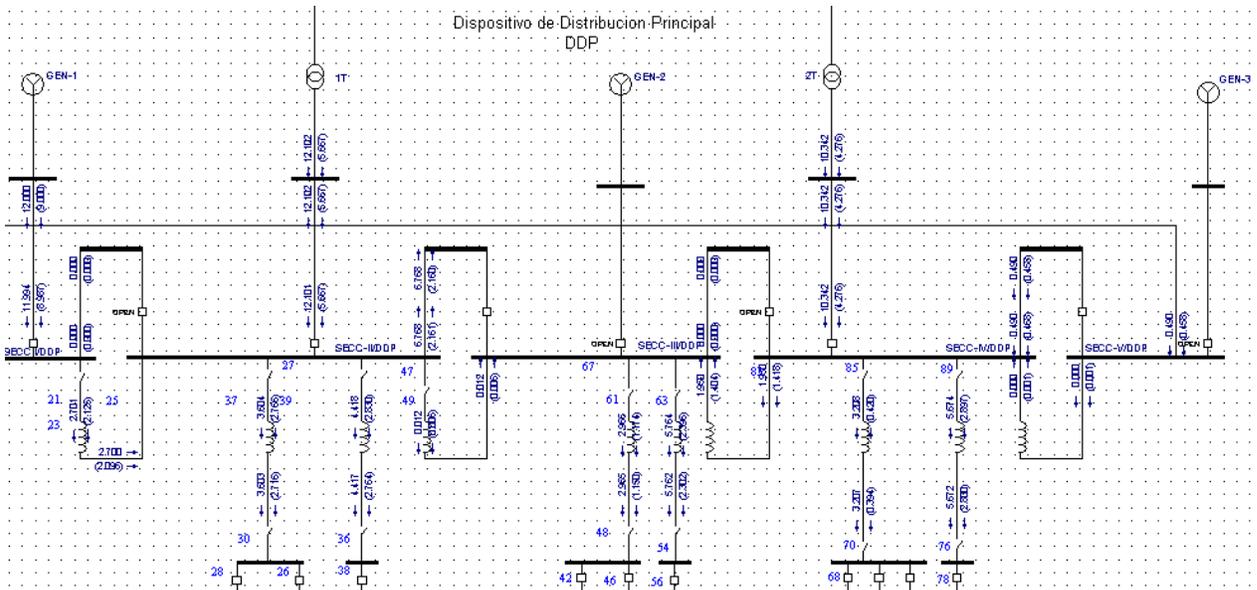


Figura 2.7: Dispositivo de Distribución Principal (DDP), reactores de enlace cortocircuitados.

2.10 Simulación de las perturbaciones armónicas, del sistema de suministro en las condiciones actuales.

Para simular el efecto de las perturbaciones armónicas, fue necesario recurrir a estudios anteriores, desarrollados en las subestaciones 1TP-17 [13] y 5TP-6 [4] estas se alimentan desde las subestaciones 5SD y 1SD respectivamente, aunque los estudios fueron realizados en baja tensión, a través del simulador permite tener una referencia bastante aproximada del comportamiento de los mismos en media tensión es necesario señalar que aunque los estudios realizados fueron bastante profundos, no se han implementado las propuestas de los mismos, por lo que los valores de contaminación armónica, según expertos, se mantienen bastante cercanos a los registrados anteriormente, en las tablas 2.6 y 2.7 se muestran los valores de mediciones realizadas en baja tensión a las subestaciones mencionadas.

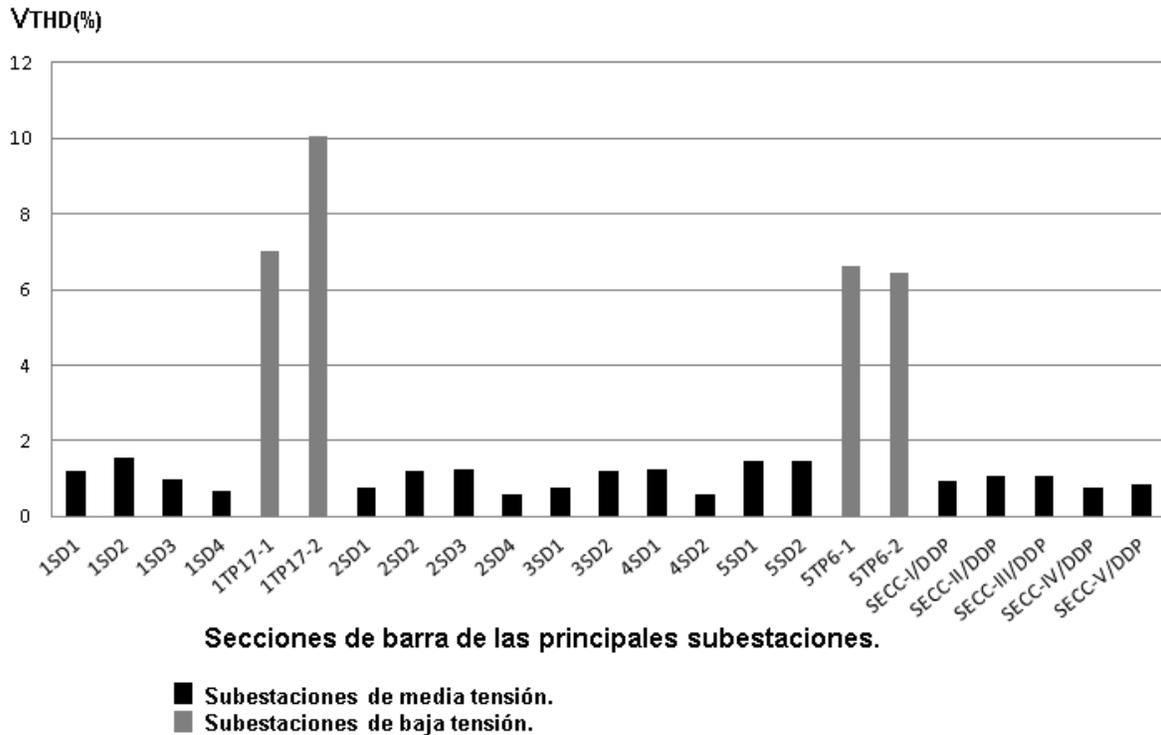
Tabla 2.6: Mediciones realizadas en las secciones I y II de la subestación 1TP-17 tomadas del trabajo de Tuzolana N. M; [13].

Consumo Eléctrico, Primera sección 1TP-17.									
Valor	P (kW)			Q(kVAr)	S (kVA)			FP	
Máximo	192.59			92.71	265.41			0.90	
Promedio	110.34			69.10	130.35			0.84	
Mínimo	77.58			53.71	94.61			0.73	
Consumo Eléctrico, Segunda sección 1TP-17.									
Valor	P (kW)			Q(kVAr)	S (kVA)			FP	
Máximo	173.85			87.64	194.69			0.90	
Promedio	101.30			61.85	118.69			0.85	
Mínimo	68.52			46.59	82.86			0.72	
Primera sección 1TP-17.					Segunda sección 1TP-17.				
h	THDi (%)			THDi (%) Promedio	h	THDi (%)			THDi (%) Promedio
	Ia	Ib	Ic			Ia	Ib	Ic	
1	100	100	100	100	1	100	100	100	100
5	21	21	22	21.33	5	19	15	17	17
7	10	10	10	10	7	6.9	7.5	8	7.46
11	3	3	3	3	11	2.7	2.2	2.5	2.46
13	2	3	2	2.33	13	1.85	2.1	1.9	1.95

Tabla 2.7: Mediciones realizadas en las secciones I y II de la subestación 5TP-6 tomadas del trabajo de Escalona P. O; [4].

Consumo Eléctrico, Primera sección 5TP-6.									
Valor	P (kW)			Q(kVAr)	S (kVA)			FP	
Máximo	734.78			449.88	857.18			0.89	
Promedio	659.45			407.77	775.34			0.85	
Mínimo	619.29			386.80	730.21			0.67	
Consumo Eléctrico, Segunda sección 5TP-6.									
Valor	P (kW)			Q(kVAr)	S (kVA)			FP	
Máximo	728.14			460.75	861.80			0.89	
Promedio	674.46			419.20	794.12			0.87	
Mínimo	616.61			368.71	734.06			0.85	
Primera sección 5TP-6.					Segunda sección 5TP-6.				
h	THDi (%)			THDi (%) Promedio	h	THDi (%)			THDi (%) Promedio
	la	lb	lc			la	lb	lc	
1	100	100	100	100	1	100	100	100	100
5	28.14	28.63	28.03	28.27	5	28.04	27.83	27.34	27.74
7	8.81	8.97	8.38	8.72	7	8.3	8.67	8.31	8.426667
11	9.66	10.11	9.93	9.90	11	8.56	8.22	9.18	8.65
13	4.95	4.7	5.25	4.97	13	5.27	5.26	5.2	5.24

Después de introducirle correctamente los datos al simulador se obtuvo un reporte que proporciona los niveles de contaminación con armónicos de tensión para cada sección de barra del sistema, en Anexos, Tabla 5, se muestran los valores de contaminación en las secciones de barra de las subestaciones principales. A modo de resumen se muestra la Gráfica 2.3, véase que aunque los niveles de contaminación en las subestaciones de baja tensión están por encima del 5%, (límite de distorsión armónica total de tensión, para voltajes menores de 69 kV, según lo establecido por la Norma IEEE 519-1992) en las subestaciones de media tensión los valores alcanzados continúan por debajo del límite.



Gráfica 2.3: Comportamiento de la contaminación armónica antes de la compensación.

2.11 Simulación del flujo de potencia después de propuesta la compensación.

Para mejorar el factor de potencia es necesario determinar cuáles serán los puntos donde se va a compensar y la capacidad del banco a utilizar, en el caso del sistema de suministro de media tensión de la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara", según la tabla 2.1 las secciones de barra con mayores dificultades son: las secciones 1 y 2 de las subestaciones 1SD, 2SD, 3SD, y 5SD respectivamente.

De estas, en las secciones 1 y 2 de la 1SD existen máquinas sincrónicas instaladas, por lo que la compensación se puede lograr ajustando la corriente de excitación de las mismas, hasta lograr un factor de potencia igual al deseado o cercano a este.

En el caso de las secciones 1 y 2 de la subestación 2SD ocurre diferente, desde estas secciones se alimentan en su mayoría máquinas asincrónicas y las secciones 1 y 2 de la subestación 3SD que abastece en su totalidad a motores asincrónicos. Si se mejora

el factor de potencia en la subestación 3SD, en las secciones 1 y 2 de la 2SD también mejorará por lo que la compensación en esta última pudiera ser innecesaria.

Las secciones 1 y 2 de la subestación 5SD no alimentan máquinas sincrónicas, por lo que en esta subestación la compensación deberá realizarse mediante condensadores.

- Cálculo de la Q_c necesaria para elevar el factor de potencia en las subestaciones señaladas.

Según la ecuación 1.4, para determinar la capacidad Q_c en kVAr que debe tener el banco a instalar, es necesario conocer la potencia activa consumida en el punto de conexión del banco, el factor de potencia inicial y el factor de potencia deseado, con estos valores se procede al cálculo de la siguiente manera:

$$Q_c = P * (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)$$

$$\varphi_1 = \cos^{-1}(\text{FP}_{\text{INICIAL}})$$

$$\varphi_2 = \cos^{-1}(\text{FP}_{\text{DESEADO}})$$

Sustituyendo:

$$Q_{c_{3SD1}} = 1.266 * (\tan(\cos^{-1}(0.773)) - \tan(\cos^{-1}(0.95))) \approx 0.62 \text{MVA}r$$

$$Q_{c_{3SD2}} = 1.441 * (\tan(\cos^{-1}(0.793)) - \tan(\cos^{-1}(0.95))) \approx 0.63 \text{MVA}r$$

$$Q_{c_{5SD1}} = 1.014 * (\tan(\cos^{-1}(0.75)) - \tan(\cos^{-1}(0.95))) \approx 0.55 \text{MVA}r$$

$$Q_{c_{5SD2}} = 0.862 * (\tan(\cos^{-1}(0.74)) - \tan(\cos^{-1}(0.95))) \approx 0.50 \text{MVA}r$$

La compensación se hará mediante bancos controlados y la capacidad deberá ser mayor que la obtenida en los cálculos anteriores asumiendo que los mismos fueron realizados para valores promedio de la demanda. Controlando la regulación del banco de forma automática se obtienen valores de Q_c aproximados a los obtenidos mediante los cálculos estos valores se introducen al programa y se corre la simulación para observar el comportamiento del factor de potencia en todo el circuito, en el caso de las

secciones de barra 1 y 2 de la subestación 1SD, se propone ajustar la corriente de excitación de los compresores 21 y 25 de 1600 kW hasta lograr el nivel de reactivo deseado, sin superar los valores admisibles por las máquinas. Las tablas 2.8, 2.9 y 2.10 muestran los resúmenes del reporte del sistema, de los generadores y el valor del factor de potencia en las principales secciones de barra de las diferentes subestaciones, respectivamente.

Tabla 2.8: Resumen del reporte del sistema.

System Summary Report				
Total	kW	kVAR	kVA	PF
Generation in System	34646	13203	37077	0.934
Load in System	34453	14018	37196	0.926
Shunt Load in System	0	-2118		
Losses in System	193	1303		
Check of Balance	0	0		

Tabla 2.9: Resumen del reporte de los generadores.

Generator		Solution							
Name	Type	kW	kVAR	kVA	Pf	Vpu	Deg	Eq'pu	Deg
GEN-1	PQG	12000	9000	15000	0.8	1.006	-1.50	1.149	6.82
UTIL-1	Sw	22646	4203	23033	0.983	1	0	1.013	1.54

Tabla 2.10: Parámetros por secciones de barra, (principales subestaciones).

Subestación/Sección	P (MW)	Q (MVAr)	S (MVA)	FP
1SD1	6.354	2.817	6.950	0.914
1SD2	4.41	1.713	4.731	0.932
1SD3	5.753	2.343	6.212	0.926
1SD4	5.663	1.44	5.843	0.969
2SD1	2.598	1.163	2.846	0.913
2SD2	2.578	1.186	2.838	0.908
2SD3	2.099	0.374	2.132	0.984
2SD4	3.097	0.224	3.105	0.997
3SD1	1.266	0.46	1.347	0.940
3SD2	1.441	0.544	1.540	0.936
4SD1	1.731	0.289	1.755	0.986
4SD2	2.835	0.105	2.837	0.999
5SD1	1.014	0.395	1.088	0.932
5SD2	0.862	0.286	0.908	0.949

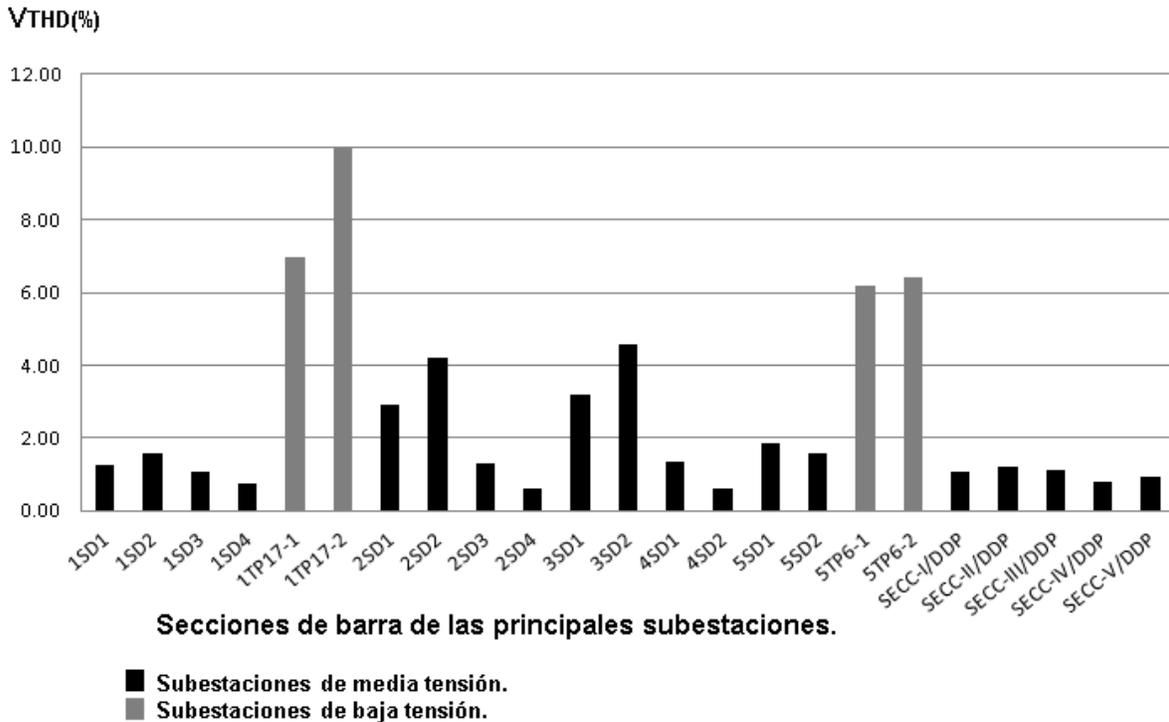
Véase como mediante la compensación de la energía reactiva el valor del factor de potencia aumenta, no solo en las subestaciones sino también en el nodo principal de la empresa, los niveles de pérdidas disminuyen y se libera capacidad en el sistema.

2.12 Simulación de las perturbaciones armónicas del sistema después de propuesta la compensación.

Como aparece en el epígrafe 1.7, compensar energía reactiva con capacitores en circuitos con presencia de armónicos puede acarrear problemas, debido a que los capacitores pueden amplificar los armónicos existentes en las redes, véase en Anexos, Tabla 6 el reporte de distorsión armónica total de tensión (VTHD) en las principales secciones de barra del sistema, después de la compensación, a modo de resumen se muestra en la gráfica 2.4 cómo los niveles de contaminación en las secciones 1 y 2 de las subestaciones 2SD y 3SD, aumentaron respecto al análisis de las perturbaciones armónicas antes de la compensación. Aunque continúan por debajo de lo establecido por la norma IEEE 519-1992, están muy próximas al límite, por lo que es recomendable la utilización de filtros para la absorción de los armónicos contaminantes en baja tensión que es donde se encuentran las principales fuentes de armónicos del sistema. El orden del armónico causante de la mayor perturbación en cada sección de barra se muestra en el reporte (tabla 2.11) en este caso coincide para todas las secciones y es el armónico de orden 11.

Tabla 2.11: Reporte del espectro armónico.

Bus Name:	2SD1	2SD2	3SD1	3SD2
VTHD % =	2.858	4.076	3.139	4.429
Harmonic	Volts	Volts	Volts	Volts
1	6202	6134	6167	6098
5	45	70	45	70
7	36	53	37	55
11	169	234	187	256
13	26	58	30	67



Gráfica 2.4: Comportamiento de la contaminación armónica después de la compensación.

Tabla 2.12: Reporte de VSUM % de los capacitores.

Branch	From Bus		Results		
Name	Name	Base (V)	MVAR	Rated (V)	VSUM (%)
CAP-3SD1	3SD1	6300	0.6	6300	102.60%
CAP-3SD2	3SD2	6300	0.6	6300	103.90%
CAP-5SD1	5SD1	10500	0.5	10500	102.40%
CAP-5SD2	5SD2	10500	0.5	10500	101.90%

De la tabla 2.12 se puede deducir que los capacitores de los bancos de compensación estarán sometidos a una tensión mayor que la nominal, pero en este caso la tensión está dentro de los límites admisibles por el capacitor, por lo que no serán afectados por esta.

Conclusiones del capítulo.

1. Se logró realizar la actualización de las bases de datos de la totalidad de los conductores de media tensión del sistema de suministro de la empresa, teniendo en cuenta sección transversal, longitud y tipo.
2. Para el montaje y simulación del esquema de media tensión en el software Easy Power fue necesario la actualización de los datos, de cargas y conductores, además de realizar una serie de mediciones en diferentes puntos del sistema.

Capítulo III: Análisis de los Resultados.

3.1 Introducción:

En este capítulo se realiza análisis técnico económico de la propuesta, se determina si la inversión a realizar será factible o no considerando los principales costos relacionados con la adquisición y montaje de los condensadores, se analiza la potencia liberada luego de la compensación, la reducción de pérdidas de potencia activa y se calcula el período de recuperación de la inversión.

3.2 Evaluación de la compensación con bancos de condensadores y compensador sincrónico.

El empleo de bancos de capacitores, y máquinas sincrónicas sobrecitadas permiten elevar el factor de potencia y mejorar la eficiencia energética en el sistema de suministro de la empresa.

La utilización de cuatro bancos de capacitores controlados ubicados individualmente en las dos secciones de barra de las subestaciones 3SD y 5SD respectivamente, y la compensación de energía reactiva mediante motores sincrónicos sobrecitadas en las secciones uno y dos de la subestación 1SD, permitió elevar el factor de potencia en estas secciones de barra a valores por encima de 0.94, lográndose una disminución de las pérdidas de potencia activa en el sistema, equivalentes a 21 kWh, que en un año representen un total de 183.960 MWh, ahorrados.

A través de las simulaciones se demostró la viabilidad de la utilización de máquinas sincrónicas sobrecitadas, para la compensación del factor de potencia en el sistema de suministro de media tensión de la empresa. Debido a que no se requiere la realización de inversiones, este método garantiza a la entidad el aporte de gran parte del reactivo demandado y por consiguiente un ahorro económico significativo.

3.3 Gastos de Adquisición y Montaje.

Los gastos de adquisición y montaje relacionan todos los costos en los que es necesario incurrir para la adquisición del equipamiento que se pretende instalar, los gastos de salario del personal encargado del montaje, ajuste y puesta en marcha, así como los gastos parciales para reparación y mantenimientos.

➤ Gastos de adquisición.

Descripción.	kVAr/kV	Cantidad	Pecio (CUC)	Total (CUC)
Bancos de condensadores. (Se incluyen fusibles).	800/6.3	2	6400	12800
	600/10.5	2	4800	9600
Regulador.		4	210	840
Total.				23240

➤ Gastos de materiales.

Para la conexión del banco de capacitares es necesario la compra de varios accesorios (Cinta aislante, Cables de cobre con recubrimiento de PVC, otros insumos) con un costo total aproximado de \$980 (CUC).

➤ Gastos de Salario del personal de montaje:

Para evaluar los gastos relacionados con el montaje, ajuste y puesta en marcha, se estima un tiempo aproximado de 4 días, empleando de 3 trabajadores, entre los que se encuentran 1 técnico superior, 1 técnico medio, 1 electricista (categoría B), con un importe por costos de salario de aproximadamente \$158.96 (CUC).

El cálculo de la inversión total parcial se determina por la ecuación 3.1.

$$C_m = C_e + C_a + C_s \quad (3.1)$$

Donde:

C_m : Costo de montaje.

C_e : Costo total del equipamiento

C_a : Costo total de los accesorios.

C_s : Costo total de salario.

Sustituyendo:

$$C_m = 23240 + 980 + 158.96 = \$ 24378.96 \text{ (CUC)}$$

➤ Gastos de reparación parcial:

Para garantizar el buen funcionamiento en la instalación de los bancos de condensadores es necesario realizar un mantenimiento preventivo, este mantenimiento debe ser planificado para un tiempo mínimo de funcionamiento de 6 meses.

El mantenimiento estándar de una instalación de este tipo requiere el cumplimiento de los siguientes requisitos:

- Realizar las pruebas de nivel de aislamiento a tierra y de alta tensión, para los niveles de tensión recomendados por el fabricante.
- Revisar que la circulación de aire no se vea restringida dentro del gabinete.
- Remover el polvo y la tierra acumulada, así como el exceso de óxido en la superficie de los conectores.
- Limpiar el área de contacto de los fusibles y los conjuntos portadores.

El costo de mantenimiento se evalúa por el costo del salario del personal que lo realiza, así como el de los materiales necesarios para su ejecución. La duración del mantenimiento es de aproximadamente cuatro horas. El personal calificado para esta operación lo constituyen un técnico superior especialista en mediciones eléctricas y un electricista categoría B, con un importe total en el costo de salario de aproximadamente \$12 (CUC). Los materiales utilizados en la reparación parcial (Cinta aislante, Estopa, limpiador de contactos), tienen un costo total aproximado de \$10 (CUC). El total de los costos por reparación está dado por la ecuación 3.2.

$$C_{rep} = C_{mat} + C_{sal} \quad (3.2)$$

Donde:

C_{rep} : Costo de las reparaciones.

C_{mat} : Costo de materiales para la reparación.

C_{sal} : Costo de salario para la reparación.

Sustituyendo:

$$C_{\text{rep}} = 10 + 12 = \$ 22 \text{ (CUC)}$$

Inversión Total.

El costo general de la inversión para un año de explotación se determina a partir de la sumatoria de todos los gastos anteriores, para ello se aplica la ecuación 3.3.

$$I_{\text{TOTAL}} = C_m + C_{\text{rep}} \quad (3.3)$$

Sustituyendo:

$$I_{\text{TOTAL}} = 24378.96 + 22 = \$ 24401.96 \text{ (CUC)}.$$

- Ahorro por concepto de reducción de pérdidas eléctricas.

Ahorro por disminución de pérdidas en los conductores, según los reportes obtenidos después de la corrida del flujo de potencia.

Pérdidas antes de la compensación: 0.214 MWh.

Pérdidas después de la compensación: 0.193 MWh.

Reducción de pérdidas: 0.021 MWh.

Reducción de pérdidas en un año: $0.021 * 8760 = 183.960 \text{ MWh/Año}$.

Para la producción de 1 MWh se necesita aproximadamente 0.272 T de petróleo.

El precio de la tonelada de petróleo en el mercado mundial en los momentos actuales tiene un valor aproximado de \$ 125 (CUC).

Ahorro de T de combustible por año = $183.960 * 0.272 = 50.04 \text{ T}$.

Por lo que:

Ahorro total en un año = $125 * 50.04 = \$ 6255 \text{ (CUC)}$.

Tiempo de amortización de la inversión (T_{AI}):

$$T_{\text{AI}} = I_{\text{Total}} / \text{Ahorro por año}.$$

Sustituyendo:

$$T_{\text{AI}} = 24400.96 / 6255 = 3.8 \text{ años}.$$

3.4 Otros beneficios obtenidos gracias a la compensación.

Además del ahorro económico obtenido por la reducción de pérdidas, se obtienen gracias a la compensación otros beneficios en el sistema de suministro de media tensión de la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” entre los que se encuentran:

- Liberación de potencia aparente.

La potencia aparente liberada (SL) no es más que la diferencia entre la potencia aparente demandada antes de la compensación y después de la misma, el valor de la potencia aparente liberada en el sistema de suministro de la empresa después de la compensación se muestra a continuación.

$$SL = S1 - S2$$

$$S2 = S1 * (\cos \varphi1 / \cos \varphi2)$$

$$SL = S1 - S1 * (\cos \varphi1 / \cos \varphi2)$$

Donde:

SL: Potencia aparente liberada, (kVA).

S1: Potencia aparente antes de la compensación, (kVA).

S2: Potencia aparente después de la compensación, (kVA).

$\cos \varphi1$: Factor de potencia antes de la compensación.

$\cos \varphi2$: Factor de potencia después de la compensación.

Sustituyendo:

$$SL = 18285 - 18285 * (0.89 / 0.934) = 861,391863 \text{ (kVA)}$$

La potencia aparente total liberada en el sistema es de aproximadamente 861 kVA.

- Liberación de potencia activa.

La potencia activa liberada (PL) no es más que la diferencia entre la potencia activa disponible antes de la compensación y después de la misma, el valor de la potencia activa liberada en el sistema de suministro de la empresa después de la compensación se muestra a continuación.

$$PL = P1 - P2$$

$$P2 = P1 * (\cos \varphi1 / \cos \varphi2)$$

$$PL = P1 - P1 * (\cos \varphi1 / \cos \varphi2)$$

Donde:

PL: Potencia aparente liberada, (kW).

P1: Potencia aparente antes de la compensación. (kW)

P2: Potencia aparente después de la compensación. (kW)

$\cos \varphi1$: Factor de potencia antes de la compensación.

$\cos \varphi2$: Factor de potencia después de la compensación.

Sustituyendo:

$$SL = 34667 - 34667 * (0.89 / 0.934) = 1633.1349 \text{ (kW)}.$$

La potencia activa total liberada en el sistema es de aproximadamente 1633 kW.

- Disminución de la corriente demandada.

De acuerdo con la siguiente expresión, la corriente que se deja de consumir (IL) es la diferencia entre la corriente consumida antes de la compensación y la consumida después de la misma.

$$IL = I1 - I1 * (\cos \varphi1 / \cos \varphi2) \text{ (A)}$$

En el sistema de suministro de media tensión de la empresa la corriente demandada después de la compensación representa aproximadamente el 95.3 % de la demandada antes de la misma.

Conclusiones del capítulo.

1. La compensación de la energía reactiva mediante el empleo de máquinas sincrónicas es factible debido a que no se necesita realizar inversiones por parte de la empresa.
2. Según los resultados arrojados el empleo de capacitores para la compensación del factor de potencia aunque necesita la realización de una inversión inicial, suele ser económicamente viable, debido a los múltiples beneficios que aporta y la segura recuperación del capital invertido.

Conclusiones Generales.

Se actualizaron todas las bases de datos de los conductores asociados al circuito de media tensión de la empresa, teniendo en cuenta sección transversal, longitud y tipo.

Se obtuvieron los flujos de potencia a frecuencia fundamental y armónica a través del software Easy Power.

Se demostró la viabilidad del empleo de las máquinas sincrónicas y condensadores para la compensación de potencia reactiva y mejora del factor de potencia en el sistema de media tensión de la empresa.

Se determinó que aunque existe contaminación armónica en el sistema de suministro de media tensión los niveles registrados están por debajo de lo establecido por la norma IEEE 519-1992.

El período de recuperación de la inversión desarrollada es de aproximadamente tres años y nueve meses, teniendo en cuenta solo el ahorro por disminución de pérdidas en el sistema.

Recomendaciones.

- Compensar el factor de potencia en niveles más próximos a la carga para lograr una mayor reducción de pérdidas y mejorar la eficiencia energética del sistema.
- Continuar el estudio de la influencia de los armónicos de tensión y corriente en el sistema de suministro de media tensión de la empresa.
- Recalcular los niveles de sobreexcitación que deben tener las máquinas sincrónicas y la capacidad de los bancos de capacitores instalados en media tensión, al mismo tiempo que se le vayan dando solución a los problemas relacionados con el factor de potencia y la calidad de la energía en baja tensión.

Bibliografía

- [1] Baldonado P. A. *Compensación de potencia reactiva en el Combinado Lácteo de las Tunas. Trabajo de diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 2009.*
- [2] Carrillo, G; Gabriel, C. O. *Metodología integral para la compensación de la potencia ficticia en sistemas de distribución de energía eléctrica. Simposio Internacional sobre Calidad de Energía Eléctrica celebrado en Bogotá, Colombia. 2001.*
- [3] Colectivo de Autores; *Gestión Energética Empresarial. Universidad de Cienfuegos. 2002.*
- [4] Escalona P. O; *Análisis de armónicos en la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara". Tesis de Maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 2008.*
- [5] Estrada, G. H; Tovar, J. H. *Metodología para la localización óptima de condensadores Mediante Sensibilidades Lineales. Revista del IEEE América Latina. 2005.*
- [6] Feodorov A. A; *Suministro Eléctrico de Empresas Industriales. Editorial Pueblo y Educación. La Habana. 1980.*
- [7] García B. K; *Análisis de la potencia Reactiva en la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara". Trabajo de diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 2011.*
- [8] González P. I; *Compensación de la potencia reactiva en sistemas eléctricos. Revista Geología y Minería. 1999.*
- [9] López, M. J; *Las perturbaciones armónicas y los niveles de CEM en relación a la corrección del factor de potencia. [s.l]: [s.n], [s.a].*

[10] 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.

[11] Schneider Electric; *Artículos sobre corrección del factor de potencia y reducción de armónicos*. Canadá. 2000.

[12] Stevenson, W. D; *Análisis de sistemas eléctricos de potencia*. La Habana; Editorial Pueblo y Educación, 1982.

[13] Tuzolana N. M; *Evaluación del comportamiento de las cargas no lineales en la planta de lixiviación y lavado de la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara"*. Trabajo de diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 2007.

[14] Viego, P. F; de Armas, M. A; *Sistemas Eléctricos Industriales*. Universidad de Cienfuegos: Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente. 2006.

[15] Viego, P. F; de Armas, M. A; *Temas Especiales de Sistemas Eléctricos Industriales*. Universidad de Cienfuegos: Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente. 2006.

[16] Viego, P. F; de Armas, M. A; *Eficiencia energética en sistemas de suministro eléctrico*. Universidad de Cienfuegos: Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente. 2007.

[17] Internet. (Sitios más consultados)

<http://www.energuia.com>

www.cumminspower.com

www.elecond.com.ar

www.eurocopper.org

www.ecamectecnologia.com

Anexos

Tabla 1: Principales perturbaciones de la característica de tensión.

Características de la onda de tensión.	Perturbaciones correspondientes a alteraciones de las características.	
	Denominación	Descripción
Frecuencia	Variaciones de frecuencia	Variaciones de la frecuencia respecto a la nominal de 60 Hz.
Amplitud	Variaciones lentas de tensión	Variaciones del valor eficaz de la tensión cuya duración es superior a 10 segundos.
	Variaciones rápidas de tensión	Variaciones del valor eficaz de la tensión entre dos niveles contiguos, manteniéndose cada uno de ellos durante un tiempo superior a 30 milisegundos. La duración de estas variaciones es inferior a 10 segundos y el valor de la tensión no desciende por debajo del 90% de la nominal. Aparecen, tanto de manera esporádica como repetitiva. Un caso particular de las variaciones repetitivas es el que origina el fenómeno del parpadeo.
	Huecos de tensión	Bajadas bruscas del valor eficaz de la tensión, por debajo del 90% de la tensión nominal y hasta el 1%, seguidas de un restablecimiento después de un lapso de tiempo comprendido entre un semiperíodo y algunos segundos. Cuando la bajada brusca termina en una tensión inferior al 1% el hueco de tensión se considera como interrupción breve. Se denomina microcorte a la interrupción breve que no excede 1 segundo.
Forma de onda	Impulsos de tensión	Variaciones bruscas del valor instantáneo de la tensión, de amplitudes que pueden llegar a ser varias veces el valor de la tensión nominal, con duración comprendida entre algunos microsegundos y muy pocos milisegundos.
	Distorsión armónica	Deformación de la onda sinusoidal que puede ser descompuesta en ondas sinusoidales, una de ellas de 60 Hz (componente fundamental) y otras de frecuencias armónicas.
Simetría del sistema trifásico	Desequilibrios y Asimetrías	Desigualdades de módulos en las fases y/o de sus desfases relativos en el sistema trifásico considerado.

Tabla 2: Límites de distorsiones de corriente para sistemas de distribución según IEEE 519-1992.

Sistemas de distribución (120 V – 69 kV)						
Máxima Distorsión de Corriente Armónica en Porcentaje de IL						
Orden Armónico Individual (Armónicos Impares)						
I_{sc} / I_L	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<20*	4	2	1.5	0.6	0.3	5
20<50	7	3.5	2.5	1	0.5	8
50<100	10	4.5	4	1.5	0.7	12
100<1000	12	5.5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2.5	1.4	20
Sistemas de distribución (69 kV – 161 kV)						
Máxima Distorsión de Corriente Armónica en Porcentaje de IL						
Orden Armónico Individual (Armónicos Impares)						
I_{sc} / I_L	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<20*	2	1	0.75	0.3	0.15	2.5
20<50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4
50<100	5	2.25	2	0.75	0.35	6
100<1000	5	2.75	2.5	1	0.5	7.5
>1000	7.5	3.5	3	1.25	0.7	10
Sistemas de distribución (> 161 kV)						
Máxima Distorsión de Corriente Armónica en Porcentaje de IL						
Orden Armónico Individual (Armónicos Impares)						
I_{sc} / I_L	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<50	2	1	0.75	0.3	0.15	2.5
≥ 50	3	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75
Los armónicos pares están limitados a un 25 % de los límites para los armónicos impares. No está permitida la inyección de componentes de corriente continua. *Todo equipo de generación de potencia está limitado a estos valores de distorsión de corriente, sin tener en cuenta la relación I_{sc}/I_L real.						
Donde I_{sc} = máxima corriente de cortocircuito en el PCC. I_L = máxima corriente de carga demandada (componente de frecuencia fundamental) en el Punto de Acoplamiento Común (PCC).						

Tabla 3: Datos actualizados de los conductores.

DDP					
Arm.	Consumidor	S(mm²)	# de C/fase	Long(m)	Tipo cable
Primera sección					
2	TP-7	3x70	1	1100	Aceite
	TP-20	3x70	1	450	
4	TP-6-1T	3x95	2	950	Seco
	TP-8-1T	3x95	1	200	
6	2RP-1-1T	3x185	2	600	Aceite
7	Trans. 41T	3x50	1	100	Seco
16	1RP-1	3x185	3	650	Aceite
17	Trans. 21T	3x120	1	30	Seco
18	Trans de tensión 1180	3x185	2	650	Aceite
19	Generador1	1x400	6	110	Aceite Unifilares
Segunda sección					
24	TP-14-1T	3x150	1	500	Aceite
	TP-12-1T	3x70	1	120	
26	5RP-1	3x185	3	1000	2Aceite 1Seco
27	Trans-1T	3x150	4	50	Barra
28	2RP-2-2T	3x185	2	600	Seco
33	Trans. 20T	3x120	1	30	Seco
38	1RP-2	3x185	3	650	Aceite
40	Trans de tensión 2400	3x185	2	650	Aceite
43	Trans 40T	3x50	1	100	Aceite
45	Trans. 80T	3x50	1	100	Seco

Tabla 3: Continuación.

DDP					
Arm.	Consumidor	S(mm²)	# de C/fase	Long(m)	Tipo cable
Tercera sección					
42	2RP-3	3x185	2	500	Seco
44	TP-6-2T	3x95	2	950	Seco
	TP-8-2T	3x95	1	200	
46	5RP-2	3x185	3	1000	Aceite
53	Trans. 81 T	3x50	1	100	Seco
55	Trans 42T	3x95	1	100	Seco
56	1RP-3	3x185	5	650	1Aceite 4Seco
57	Trans 22T	3x120	1	30	Seco
67	Generador 2	1x400	6	130	Aceite Unifilares
Cuarta sección					
64	CIL	3x50	1	800	Aceite
66	2ST-12-2T	3x185	1	350	Seco
	1ST-14-2T				
68	2RP-3-4T	3x185	2	600	Aceite
78	Línea 1RP-4	3x185	5	550	Seco
79	Trans-2T	3x150	4	50	Barra
81	Trans. 23T	3x120	1	30	Seco
91	Trans. 82T	3x50	1	100	Seco

Tabla 3: Continuación.

Subestación 1SD					
Arm.	Consumidor	S(mm²)	# de C/fase	Long(m)	Tipo cable
Primera sección					
1	Ventilador 22	3x95	1	450	Seco
2	1TP-15-1T	3x95	1	470	Aceite
3	1TP-16-1T	3x95	1	250	Seco
4	1TP-2-1T	3x95	2	250	Seco
	1TP-1-1T	3x95	1	670	Seco
5	1TP-7-1T	3x150	1	490	Seco
6	1TP-17-1T	3x95	1	920	Seco
7	1TP-28	3x70	1	550	Aceite
8	1TP-1T	3x70	1	80	Seco
9	Molino-1	3x70	1	430	Aceite
10	1TP-6-1T	3x95	1	850	Seco
12	Compresor-25	3x70	1	70	Seco
13	Compresor-31	3x95	1	90	Seco
14	Entrada.Term	3x185	5	650	Aceite
Segunda sección					
18	Int.Secc I-II				
21	Entrada.Term	3x185	5	650	Aceite
22	Línea 1TP-2 -2T	3x120	2	250	Seco
23	1TP-13-1T	3x120	1	800	Aceite
	1TP-5-1T	3x70	1	300	Seco
24	1TP-7-2T	3x95	1	450	Seco
25	Molino-2	3x70	1	420	Aceite
26	Compresor-21	3x95	1	70	Seco
27	1TP-11-1T	3x95	2	375	1Sec 1Ac
	1TP-10-1T	3x95	1	200	Seco
28	1TP-26	3x70	1	150	Aceite
29	Ventilador 23	3x95	1	460	Seco
30	Compresor-22	3x95	1	70	Aceite
31	1TP-17-2T	3x120	1	920	Seco

Tabla 3: Continuación.

Subestación 1SD					
Arm.	Consumidor	S(mm2)	# de C/fase	Long(m)	Tipo cable
Tercera sección					
33	Línea A 1TP3-1T	3x95	1	750	Aceite
34	1TP-15-2T	3x95	1	530	Aceite
35	1TP13-2T	3x120	1	800	Aceite
36	1TP-2T	3x95	1	80	Seco
37	1TP30	3x70	1	370	Aceite
	1TP25	3x70	1	170	Aceite
39	Molino-3	3x95	1	400	Seco
40	Comp.-21(K 500)	3x185	3	300	Aceite
41	Comp.-21(K 500)	3x120	1	300	Seco
42	Compresor-32	3x95	1	90	Seco
43	Compresor-24	3x95	1	70	Seco
44	1TP-23	3x95	1	750	Aceite
	1TP-4	3x150	1	60	Seco
45	1TP-2-3T	3x120	1	250	Seco
46	1TP-8-1T	3x120	1	550	Seco
47	Entrada.Term	3x185	5	650	1-Seco 4-Aceite
Cuarta sección					
54	Entrada.Term	3x185	5	650	Seco
55	1TP31	3x70	1	350	Aceite
	1TP24	3x70			Seco
56	1TP-16-2T	3x95	1	250	Seco
57	Molino-4	3x95	1	400	Seco
58	Línea A 1TP8-2T	3x95	1	550	Seco
59	1TP-22	3x70	1	250	Seco
	1TP-4	3x150	1	80	Seco
60	1TP-11-2T	3x95	2	375	Aceite
	1TP-10-2T	3x95	1	200	
61	Comp.K500-3	2(3x95) 1(3x120)	3	300	Seco
62	Comp.K500-3	3x95	1	300	Seco
63	Compresor-33	3x70	1	90	Seco
64	Compresor-23	3x70	1	70	Seco
65	1TP-3-2T	3x95	1	780	Aceite
66	Línea 1TP-2-4T	3x120	1	270	Seco

Tabla 3: Continuación.

Subestación 2SD					
Arm.	Consumidor	S(mm2)	# de C/fase	Long(m)	Tipo cable
Primera sección					
1	Entrada-Term.	3x185	2	600	Aceite
2	Salida-1T 10KV	3x150	2	100	Seco
5	Enlace Arm. 36	3x185	3	30	Secos
6	Mina	3x150	1	1250	Seco
7	Ventilador-1	3x70	1	475	Seco
8	Ventilador-2	3x70	1	475	Seco
9	Exhauster-2	3x70	1	300	Seco
11	Salida-3RP-1	3x120	2	970	2(Aceite)
13	Entrada-1T-6KV	3x185	4	50	Secos
Segunda sección					
16	Salida3RP-2	3x120	2	850	1(Aceite) 1(Seco)
17	Ventilador-21	3x50	1	500	Aceite
18	Exhauster-1	3x70	1	250	Seco
19	Ventilador-3	3x50	1	475	Aceite
20	Ventilador-4	3x50	1	475	Aceite
22	Entrada-2T	3x185	2	60	Secos
24	Entrada DDP	3x185	2	600	Secos
24	Salida al Trans 2T	3x150	2	100	Secos
Tercera sección					
26	Entrada-Term.	3x185	2	600	Secos
27	Salida-2T 10KV	3x150	2	100	Secos
31	Entrada-3T	3x185	3	55	Secos
34	Salida-4RP-I	3x150	3	450	Secos
35	Compresor-13	3x70	1	50	Seco
36	Enlace Arm. 5	3x185	3	30	Secos
37	Compresor-12	3x50	1	50	Seco

Tabla 3: Continuación.

Subestación 2SD					
Arm.	Consumidor	S(mm2)	# de C/fase	Long(m)	Tipo cable
Cuarta sección					
41	Entrada-4T	3x185	4	80	Secos
42	Salida-4RP-2	2(3x150) 1(3x185)	3	450	2(Secos) 1(Aceite)
43	Mina	3x185	1	1200	Aceite
44	P-H2O	3x150	1	600	Seco
45	Compresor-11	3x50	1	50	Seco
53	Salida-4T 10KV	3x150	2	85	Secos
54	Entrada-Term.	3x185	2	600	Aceite

Tabla 3: Continuación.

Subestación 3SD					
Arm.	Consumidor	S(mm2)	# de C/fase	Long(m)	Tipo cable
Primera sección					
2	Escavadora-01	no	se	utiliza	
3	Exhauster-5	3x70	1	50	Seco
4	TR-4B	3x70	1	650	Seco
5	TR-2	3x50	1	450	Aceite
6	VFM1	3X185	1	400	Aceite
7	Reserva				Aceite
8	Exhauster-6	3x50	1	55	Seco
9	Entrada-2RP	3x120	2	970	Aceite
Segunda sección					
14	Entrada-2RP	3x120	2	970	1(Seco) 1(Aceite)
15	VFM2	3X185	1	400	Aceite
16	Línea-Mina	3x120	1	650	Seco
17	Exhauster-4	3x120	1	50	Seco
18	Exhauster-3	3x50	1	40	Seco
19	Exhauster-2	3x50	1	40	Seco
20	Exhauster-1	3x50	1	50	Seco
21	TR-4A	3x50	1	650	Seco

Tabla 3: Continuación.

Subestación 4SD					
Arm.	Consumidor	S(mm2)	# de C/Fase	Long(m)	Tipo Cable
Primera sección					
2	Bomba-1	3x70	1	55	Seco
3	Bomba-2	3x95	1	55	Seco
4	Bomba-6	3x120	1	80	Seco
5	Bomba-7	3x70	1	95	Seco
6	Entrada-2RP	3x150	3	450	Secos
25	V-343 B	3x70	1	280	Seco
26	V-342 B	3x70	1	270	Aceite
27	V-342 C	3x50	1	275	Aceite
Segunda sección					
11	Entrada-2RP	1(3x185) 2(3x150)	3	450	1(Aceite) 2(Secos)
13	Bomba-3	3x70	1	70	Seco
14	Bomba-4	3x70	1	75	Seco
15	Bomba-5	3x70	1	70	Seco
16	Bomba-8	3x70	1	110	Seco
17	Bomba-9	3x120	1	85	Seco
19	V-342A	3x50	1	270	Aceite
20	Exh-DH-24	3x70	1	200	Seco

Tabla 3: Continuación.

Subestación 5SD					
Arm.	Consumidor	S(mm2)	# de C/Fase	Long(m)	Tipo cable
Primera sección					
1	5TP6 1T	3x95	1	110	Seco
2	5TP- 13-1T	3x70	1	60	Aceite
3	5TP-19	3x50	1	600	Seco
4	5TP-1-1T 5TP-2-1T	TP2= 3x120 1TP1=3x70	1	950 250	Aceite
5	5TP-4-1T 5TP-5-1T	3x120	1	300 80	Aceite
6	Entrada Term.	3x185	3	1000	2 Aceite 1 Seco
Segunda sección					
11	Entrada Term.	3x185	3	1000	Aceite
12	5TP-13-2T	3x70	1	60	Aceite
13	5TP- 21	3x95	1	450	Seco
14	5TP-1-2T 5TP-2-2T	3x95 3x95	1 1	950 250	Seco Seco
15	5TP-4-2T 5TP- 5-2T	3x120 3x185	1 1	100 200	Aceite Aceite
16	5TP-6 2T	3x95	1	100	Seco

Tabla 4: Datos nominales de las máquinas sincrónicas instaladas en la empresa.

Mecanismo	Tipo	#	Pn	Un	In	nn	Efic	FP	Uexc.	Iexc.
Turbogenerador #1	6HY562670-2	1	12000	10500	825	3600		0.8	42-158	152-463
Turbogenerador #2	6HY562670-2	1	12000	10500	825	3600		0.8	42-158	152-463
Turbogenerador #3	BDAX62-195ERH	1	25000	10500	1718	3600		0.8	128	806
Compresor K500-2	CTD-2500-3600T4	1	2500	10000	166	3600	91.2	0.9	11	230
Compresor K500-3	CTD-2500-3600T4	1	2500	10000	166	3600	91.2	0.9	11	230
Compresor CO-21	CTD-1600-3600T4	1	1600	10000	107	3600	91.4	0.9	48	240
Compresor CO-23	CTD-1600-3600T4	1	1600	10000	107	3600	91.4	0.9	48	240
Compresor CO-24	CTD-1600-3600T4	1	1600	10000	107	3600	91.4	0.9	48	240
Compresor CO-25	CTD-1600-3600T4	1	1600	10000	107	3600	91.4	0.9	48	240
Molinos de bolas	CDC3-15-49-10T2	4	800	10000	54.6	720	93.4	0.9	45	223
Bomba de agua BO-01	CDH2-16-36-8T2	1	630	6000	71.4	900	94.3	0.9	46	244
Bomba de agua BO-02	CDH2-16-36-8T2	1	630	6000	71.4	900	94.3	0.9	46	244
Bomba de agua BO-03	CDH2-16-36-8T2	1	630	6000	71.4	900	94.3	0.9	46	244
Bomba de agua BO-04	CDH2-16-36-8T2	1	630	6000	71.4	900	94.3	0.9	46	244
Bomba de agua BO-05	CDH2-16-36-8T2	1	630	6000	71.4	900	94.3	0.9	46	244
Bomba de agua BO-06	CDH2-16-36-8T2	1	630	6000	71.4	900	94.3	0.9	46	244
Bomba de agua BO-07	CDH2-16-36-8T2	1	630	6000	71.4	900	94.3	0.9	46	244
Bomba de agua BO-08	CDH2-16-36-8T2	1	630	6000	71.4	900	94.3	0.9	46	244
Bomba de agua BO-09	CDH2-16-36-8T2	1	630	6000	71.4	900	94.3	0.9	46	244
Motor Principal Excavadora	CDCE-14-29-8T2	4	500	6000	56	400	93.8	0.8	30	250
Compresor 325-CO-201 (11)	CDKZ-16-29-14KT4	1	320	6000	37	514	93	0.9	32.6	262
Compresor 325-CO-202 (12)	CDKZ-16-29-14KT4	1	320	6000	37	514	93	0.9	27	232
Compresor 325-CO-203 (13)	CDKZ-16-29-14KT4	1	320	6000	37	514	93	0.9	27	232

Tabla 5: Reporte de distorsión armónica total de tensión (VTHD) en las principales secciones de barra del sistema, antes de la compensación.

Bus Voltage			
Name	VTHD(V)	VRSS(V)	VTHD(%)
1SD1	123	10380	1.18
1SD2	160	10379	1.54
1SD3	101	10341	0.98
1SD4	72	10379	0.69
1TP17-1	32	455	7.03
1TP17-2	45	448	10.04
2SD1	46	6129	0.75
2SD2	72	6080	1.18
2SD3	76	6192	1.23
2SD4	36	6237	0.58
3SD1	45	6087	0.74
3SD2	71	6039	1.18
4SD1	76	6181	1.23
4SD2	36	6220	0.58
5SD1	154	10386	1.48
5SD2	152	10383	1.46
5TP6-1	31	468	6.62
5TP6-2	30	467	6.42
SECC I/DDP	100	10518	0.95
SECC-II/DDP	113	10467	1.08
SECC-III/DDP	109	10422	1.05
SECC-IV/DDP	78	10472	0.74
SECC-V/DDP	89	10495	0.85
Subestaciones de baja tensión (0.48 kV)			

Tabla 6: Reporte de distorsión armónica total de tensión (VTHD) en las principales secciones de barra del sistema, después de la compensación.

Bus Voltage			
Name	VTHD(V)	VRSS(V)	VTHD(%)
1SD1	130	10454	1.24
1SD2	165	10396	1.59
1SD3	109	10337	1.05
1SD4	78	10409	0.75
1TP17-1	32	459	6.97
1TP17-2	45	452	9.96
2SD1	180	6205	2.90
2SD2	257	6139	4.19
2SD3	82	6197	1.32
2SD4	39	6232	0.63
3SD1	198	6170	3.21
3SD2	279	6104	4.57
4SD1	82	6186	1.33
4SD2	39	6215	0.63
5SD1	192	10403	1.85
5SD2	166	10393	1.60
5TP6-1	29	468	6.20
5TP6-2	30	468	6.41
SECC-I/DDP	115	10548	1.09
SECC-II/DDP	126	10454	1.21
SECC-III/DDP	118	10417	1.13
SECC-IV/DDP	85	10464	0.81
SECC-V/DDP	99	10505	0.94
Subestaciones de baja tensión (0.48 kV)			

FEATURES

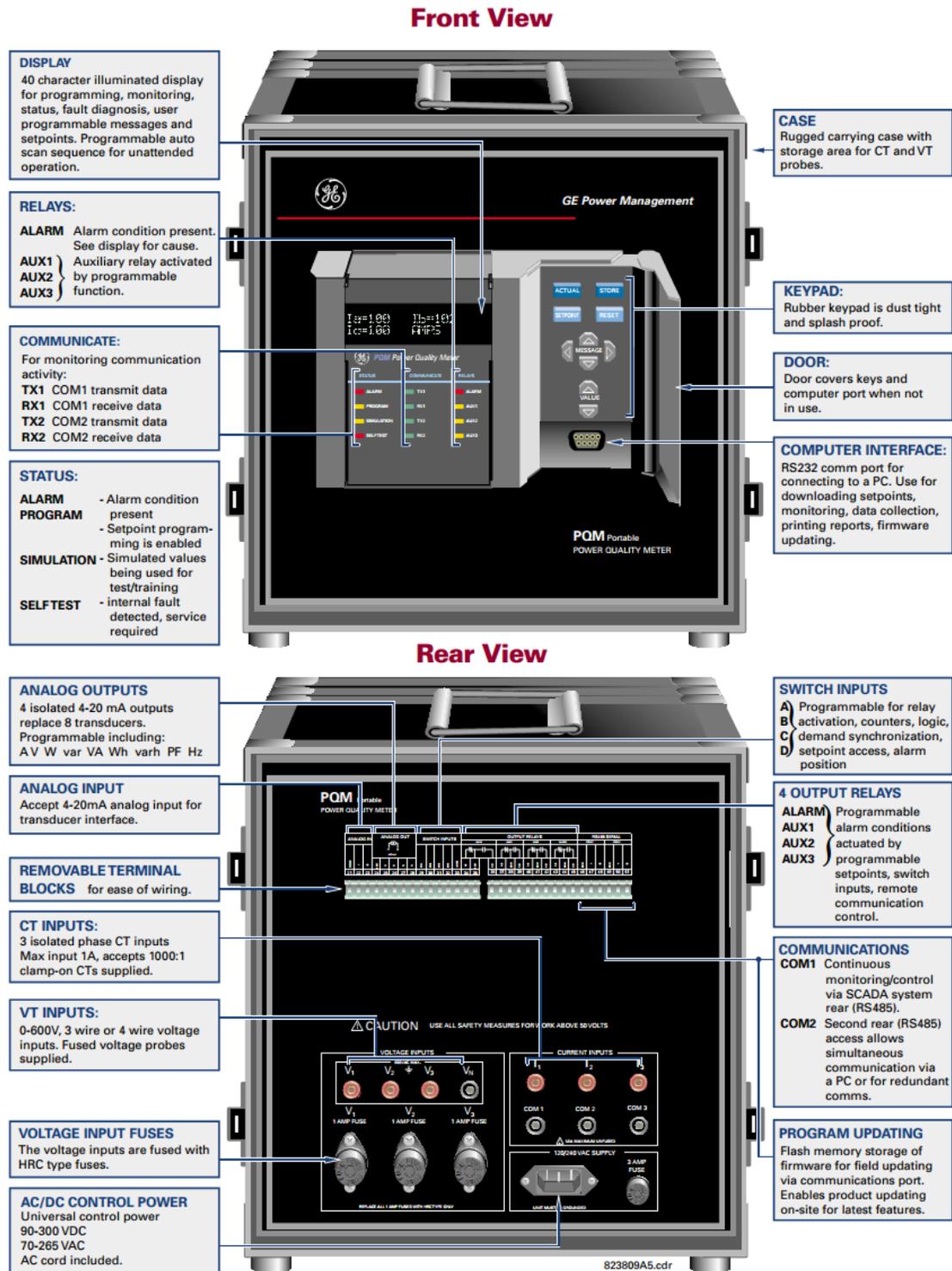


Figura 1: Características del PQM.