



ISMMM

INSTITUTO SUPERIOR MINERO
METALURGICO DE MOA
DR. ANTONIO NUÑEZ JIMENEZ

Departamento de Eléctrica
Facultad de Metalurgia Electromecánica
Instituto Superior
Minero Metalúrgico de Moa

Trabajo de Diploma

En opción al Título de

Ingeniero Eléctrico

Título:
**Análisis del suministro eléctrico de la subestación
1TP-16 en la Empresa Comandante
“Ernesto Che Guevara”**

Autor: Jasiel Remón Benítez
Tutor: MSc. Gabriel Hernández Ramírez

Moa, Holguín
Junio del 2015
“Año 57 de la Revolución”

Declaración de autoridad.

Yo, Jasiel Remón Benítez, autor de este Trabajo de Diploma titulado: Análisis del Suministro Eléctrico de la Subestación 1TP-16 en la Empresa Comandante “Ernesto Che Guevara”, certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, el cual podrá hacer uso del mismo para los fines que estime pertinente.

Para que así conste firmamos la presente a los ____ días del mes de junio del 2015.

MSc. Gabriel Hernández Ramírez.

Diplomante. Jasiel Remón Benítez

PENSAMIENTO

Bienaventurado el hombre que halla sabiduría, y que obtiene la inteligencia; porque su ganancia es mejor que la ganancia de la plata y sus frutos más que el oro fino. Más preciosa es que las piedras preciosas; y todo lo que puedes desear, no se puede comparar a ella. Largura de días en su mano derecha; en su izquierda, riquezas y honra. Sus caminos son caminos deleitosos, y todas sus veredas paz. Ella es árbol de vida de los que de ella echan mano, y bienaventurados son los que la retienen.

Salomón

DEDICATORIA:

Dedico este trabajo a todas aquellas personas que estuvieron a mi lado para alentarme a seguir adelante, en especial a mis padres y a mi familia que a pesar de la distancia siempre han estado cerca de mí corazón.

AGRADECIMIENTOS:

Le agradezco primeramente a Dios por haberme permitido llegar hasta aquí.

A mí novia por su apoyo y amor incondicional.

A Gaby y Diego por su ayuda desinteresada.

A Lily por la revisión ortográfica.

A mis compañeros de aula y profesores de la carrera.

A todos ustedes muchas gracias.

TABLA DE CONTENIDO

Introducción.....	1
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO – METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN.....	4
1.1. Métodos a emplear en el desarrollo de la investigación.....	4
1.2. Revisión de trabajos precedentes.....	4
1.3. Teoría de transformadores.....	6
1.3.1. Régimen de trabajo económico de los transformadores.....	7
1.4. Análisis de pérdidas en motores asincrónicos.....	9
1.4.1 Razones para Determinar la Carga del Motor.....	10
1.5. Compensación de potencia reactiva.....	11
1.5.1. Elementos que influyen en el balance de potencia reactiva.....	12
1.5.2. Equipos Compensadores de Potencia Reactiva.....	12
1.5.3. Tipos de compensaciones de reactivos mediante bancos de condensadores.....	13
1.5.4. Clasificación de los bancos de condensadores a utilizar para la compensación de potencia reactiva.....	14
1.5.5. Métodos para la compensación de potencia reactiva.....	14
1.5.6. Beneficios que brinda la compensación de reactivo.....	15
1.5.7. Cálculo para la compensación de reactivo.....	16
1.5.8. Beneficios al mejorar el factor de potencia.....	17
CAPÍTULO II. DESARROLLO DE LA EXPERIMENTACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	18
2.1. Descripción del proceso tecnológico de la Planta de Recuperación de NH ₃	18
2.2. Descripción del Sistema de Suministro Eléctrico.....	19
2.2.1. Caracterización de las principales cargas instaladas en la subestación.....	22
2.3. Características del analizador de redes utilizado.....	26
2.4. Consumos históricos de la planta.....	28
2.5. Análisis de las mediciones.....	29
2.5.1. Transformador 1.....	29
2.5.2. Transformador 2.....	32
2.6. Simulación del flujo de potencias en condiciones actuales.....	35
2.7. Análisis de operatividad del esquema de suministro en condiciones actuales.....	36
CAPÍTULO III. PROPUESTA DE SOLUCIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.....	38
3.1. Mejoras en la distribución del sistema eléctrico de la subestación ITP-16.....	38
3.1.1. Simulación de la mejora de acomodo y distribución del sistema eléctrico.....	39
3.2. Mejoras del factor de potencia.....	39
3.2.1 Cálculo de la potencia necesaria para corregir el factor de potencia.....	41

V

3.3. Variante 1	42
3.4. Variante 2.	47
3.5. Análisis Económico.....	50
CONCLUSIONES.....	53
RECOMENDACIONES	54
BIBLIOGRAFÍA	¡Error! Marcador no definido.

Resumen

En el presente trabajo titulado Análisis del suministro eléctrico de la subestación 1TP-16 de la Empresa Comandante “Ernesto Che Guevara” se analiza el sistema eléctrico de fuerza de la planta con el objetivo de mejorar la eficiencia energética y disminuir las pérdidas. Se tienen en cuenta trabajos precedentes realizados sobre el tema, para establecer las principales tendencias actuales. Además se establecen las bases para el desarrollo del estudio en el marco teórico conceptual. Se proporciona una descripción del flujo tecnológico así como del sistema de suministro de la planta. A través de gráficos se analizan las principales variables eléctricas, mediante simulaciones en el software EasyPower se determina y se logra disminuir los niveles de pérdidas existentes, mediante la instalación de bancos de condensadores para elevar el factor de potencia de 0.7 a 0.95. Al aplicarse las mejoras se logra un ahorro de \$ 15 330 CUC al año para la variante 1 y 21 462 CUC para la variante 2, por lo que el tiempo de amortización de las inversiones es menor a 1 año y 6 meses para ambas propuestas.

Abstract:

In the Present work titled Analysis of the electric supply of the substation 1TP-16 of the Company Comander "Ernesto Che Guevara" the electric system of force of the plant is analyzed with the objective to improve the energetic efficiency and to diminish the losses. Precedent works carried out are kept in mind concerning to this subject, to establish the main current tendencies. Also, The bases are settle down for the development of the study in the conceptual theoretical mark. A description of the technological flow is provided as well as the supply of system of the plant. Through graphics the main electric variables are analyzed, through out simulations in the software EasyPower is determinate and possible to diminish the levels of existent losses, through the installation of banks of condensers to elevate the factor of power from 0.76 to 0.95. Once the improvements are applied a saving of \$15 330 CUC a year is achiered for the variant 1 and 21 462 CUC for the variant 2, the investments paying-off time is smaller to 1 year and 6 months for both proposals.

INTRODUCCIÓN

La energía posee una extraordinaria importancia en la civilización actual; sin ella la vida moderna dejaría de existir. Durante la década del setenta, el mundo empezó a ser consciente de la vulnerabilidad de los recursos energéticos. A largo plazo es posible que las prácticas de conservación de energía proporcionen el tiempo suficiente para explorar nuevas posibilidades tecnológicas. Mientras tanto, el mundo seguirá siendo vulnerable a la disminución en el suministro de petróleo, que después de la II Guerra Mundial se ha convertido en la principal fuente de energía. Cuba, al igual que la mayoría de los países insulares, carece de recursos energéticos y satisface la mayor parte de sus necesidades para el transporte, la transformación y en menor medida para la producción de electricidad con la importación de combustibles fósiles. Por el papel que para el crecimiento del país tiene el desarrollo del sector energético, por las implicaciones que para el medio ambiente tiene el uso de los combustibles fósiles, por su agotabilidad y por la dependencia económica que cada día es mayor debido a la subida de los precios de los combustibles importados, es de vital importancia el uso eficiente de la energía eléctrica para la disminución de los costos.

La Empresa Comandante “Ernesto Che Guevara” es una de las industrias niquelíferas que integra el Grupo Empresarial Cubaníquel. Se encuentra ubicada al norte del yacimiento de mineral de Punta Gorda, provincia de Holguín, en la costa norte del océano Atlántico entre los ríos Moa y Yagrumaje, a 4 km. de la ciudad de Moa. Esta Empresa posee gran importancia económica para el país, además de ser fuente de empleo para miles de trabajadores que allí laboran.

Con el objetivo de elevar la eficiencia de los sistemas de distribución de la empresa, hace varios años se vienen realizando estudios en las diferentes áreas de la misma, en nuestro caso particular el objeto de estudio es la subestación reductora 1TP-16 de

distribución de servicio propio perteneciente a la Planta de Recuperación de Amoniaco.

Situación Problemática:

La subestación 1TP-16 de la planta Recuperación de Amoniaco de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” presenta baja eficiencia energética, por el desconocimiento de los parámetros que provocan la inestabilidad del sistema, las pérdidas de energía y la baja operatividad y flexibilidad del sistema de suministro.

Problema de Investigación:

Se desconocen los parámetros eléctricos que provocan la baja eficiencia del sistema de suministro eléctrico de la planta.

Campo de Acción:

Eficiencia del Suministro Eléctrico.

Objeto de Estudio:

Subestación de Recuperación de Amoniaco.

Objetivo General:

Proponer alternativas técnico – organizativas para el uso eficiente de la energía eléctrica a partir de un análisis del suministro eléctrico en la subestación de fuerza de la Planta de Recuperación de Amoniaco de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Objetivos específicos:

- Caracterizar el sistema eléctrico de la subestación.
- Realizar análisis de suministro para establecer la situación actual de la subestación.

- Proponer medidas para mejorar el sistema de suministro eléctrico de la subestación.

Hipótesis:

Si se realiza un análisis del suministro eléctrico en subestación de Recuperación de Amoniaco, es posible disminuir las pérdidas de energía eléctrica, mejorar la eficiencia energética, lograr la funcionalidad racional del sistema eléctrico de la planta.

Tareas:

- Determinación del comportamiento del consumo de energía y confeccionar base de datos sobre el consumo de energía eléctrica.
- Investigación del esquema estudio y la carga conectadas.
- Obtención de las pérdidas de los transformadores de potencia y proponer medidas para mejorar la eficiencia energética.
- Evaluación del esquema monolineal actual (operacional fundamentalmente).
- Valoración económica del proyecto.

Resultados esperados:

- Ofrecer la modelación del sistema para la nueva variante de suministro en la subestación asistida por EasyPower.
- Comparar el sistema de suministro actual de la subestación respecto a las propuestas para mostrar sus ventajas y desventajas.
- Mejorar la eficiencia energética en la subestación 1TP-16 de la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO – METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN.

1.1. Métodos a emplear en el desarrollo de la investigación.

Para llevar a cabo con éxito esta investigación se utilizaron diferentes métodos de investigación, del nivel teórico:

Análisis y Síntesis: para el análisis del comportamiento del circuito de suministro de la subestación 1TP-16 de la empresa Cmdte. "Ernesto Che Guevara", para el estudio de los antecedentes y los trabajos realizados anteriormente en función del mejoramiento del mismo.

Método de investigación experimental: a escala industrial para describir y caracterizar el objeto de estudio.

Histórico-lógico: Para el análisis y la comprensión de las etapas por las cuales ha transitado el circuito de suministro de la subestación 1TP-16 y su comportamiento.

Hipotético-deductivo: Para la elaboración de la hipótesis, cuya veracidad se intentará materializar en la investigación.

La observación científica: Para estar al tanto del desarrollo y el comportamiento del objeto de estudio de la investigación y para la validación de los resultados esperados en la investigación.

Criterio de expertos: En la proposición de los métodos a implementar como resultado de la investigación, de acuerdo con los resultados esperados en el proceso investigativo, en el proceso de implementación.

1.2. Revisión de trabajos precedentes.

En la realización de este trabajo de diploma, debido a que se tratan temas relacionados con los sistemas de suministro eléctrico, y con el objetivo de tener una idea más precisa de los logros alcanzados en el tema, se tuvo en cuenta el resultado de los trabajos enunciados a continuación, con la intención de enriquecer los

4

conocimientos sobre el tema y emplear así los métodos utilizados que dan solución a este caso investigativo.

En el trabajo de Díaz S, del 2008, se hace un análisis de la estructura y el comportamiento actual del sistema de suministro eléctrico en cuatro bancos de transformadores. Se evaluó el comportamiento de las Potencias, Tensión y Corriente en cada uno de los bancos y se definieron las propuestas para cada uno de ellos, de acuerdo con la necesidad.

En el trabajo de Osmel Rodríguez Sánchez, del 2010, se realiza una revisión del sistema eléctrico del Centro de Investigación Siderúrgica de Nicaro, para la identificación de las deficiencias existentes en el mismo, además de realizar el monolineal de la empresa y establecer la correspondencia entre la potencia instalada y la capacidad de distribución del transformador principal.

En el trabajo de diploma de Liuba de Armas Pérez, del 2010, con título: Análisis del Sistema Eléctrico de baja tensión de la planta de Calcinación y Sínter de la empresa Ernesto Che Guevara, se lleva a cabo un análisis de la eficiencia energética en dicha planta y se proponen mejoras técnicas y económicas con el objetivo de minimizar las pérdidas existentes en el sistema eléctrico.

En el trabajo de diploma de Gervis Vargas Argota, del 2010, con título: Mejoramiento del factor de potencia de una subestación industrial de distribución de la Empresa Ernesto Che Guevara, se hace referencia a la teoría de mejoramiento de factor de potencia, refiriéndose en ella a las formas de compensación de reactivo, equipos compensadores de potencia reactiva enfatizando en la compensación mediante banco de condensadores. Se proponen mejoras en la subestación objeto de estudio y el referente análisis económico de dichas mejoras.

En el trabajo de Francis Delgado Bordonado, del 2010, se realiza un análisis eléctrico a la Empresa Puerto Moa (Comandante Raúl Díaz Arguelles) con el objetivo de

evaluar el comportamiento de varios parámetros eléctricos que influyen en la eficiencia del mismo y de ahí proponer medidas para mejorar su eficiencia.

Temas especiales de sistemas eléctricos industriales, del Centro de Estudio de Energía y Medio Ambiente de la Universidad de Cienfuegos. Este trabajo refiere sobre los gráficos de carga, demanda máxima y los coeficientes típicos de las cargas.

Feodorov A.A; Rodrigez López, E. Suministro eléctrico de empresas industriales (La Habana. 1980). En esta obra se utilizó todo lo relacionado con las cuestiones fundamentales del sistema de suministro eléctrico de empresas industriales, tales como: cargas eléctricas, selección de los parámetros de los sistemas de suministro eléctrico industrial, compensación de la potencia reactiva, localización de las subestaciones de alimentación y otras cuestiones fundamentales de los sistemas de suministro eléctrico.

Viego, P.F; de Armas, M.A, 2006. Él expone los factores que influyen en la calidad de la energía y cómo prevenirlos. Abarca un capítulo completo para el mejoramiento del factor de potencia, ya que 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.

1.3. Teoría de transformadores.

Normalmente, los transformadores utilizados en las subestaciones industriales se clasifican según su enfriamiento como:

Autorrefrigerados por aire o de tipo seco, que existen hasta potencias de 3000 kVA y voltajes de hasta 15 kV, y son usados principalmente en interiores.

Refrigerados por circulación forzada de aire por medio de ventiladores, los que existen hasta 15 MVA y 35 kV.

Autorrefrigerados sumergidos en un líquido que generalmente es aceite aislante.

Grandes transformadores sumergidos en aceite y refrigerados mediante: autorrefrigeración y circulación forzada de aire, refrigeración por agua, circulación forzada de aceite o autorrefrigeración y circulación por agua.

Los transformadores utilizados en las subestaciones industriales son típicamente trifásicos en conexión Δ - Y. El secundario en Y permite el acceso al neutro para aterrizar el sistema, mientras que la delta por primario constituye la forma más simple y segura de estabilizar el neutro de la Y en el secundario. En ocasiones, cuando se emplea una Y en el primario, debe utilizarse un terciario en delta para lograr el propósito anterior. Otra ventaja de la delta reside en la supresión del contenido de terceros armónicos en el voltaje de línea del sistema.

La potencia de los transformadores debe garantizar en condiciones normales, la alimentación de todos los consumidores. En la selección de la potencia de los transformadores se debe tratar de obtener tanto el régimen de trabajo económicamente útil, como la alimentación de reserva explícita e implícita de los consumidores; además la carga de los transformadores, en condiciones normales, no debe (por calentamiento) conducir al acortamiento de su tiempo de vida o servicio.

1.3.1. Régimen de trabajo económico de los transformadores.

En condiciones de operación, se debe prever el régimen de trabajo económico de los transformadores, esencialmente consiste en que en las subestaciones con varios transformadores, el número de ellos conectados en cada momento debe ser el que proporcione el mínimo de pérdidas, para un gráfico de carga determinado. Para ello deben considerarse no solamente las pérdidas de potencia activa en los propios transformadores, sino también las pérdidas de potencia activa que

aparecen en el sistema (desde la fuente de suministro hasta la subestación considerada), debido a los requerimientos de potencia reactiva de los transformadores.

A diferencia de las pérdidas del transformador en sí, a éstas se les denomina referidas y se determinan por la expresión:

$$\Delta P't = \Delta P'sc + Kc^2 * \Delta P'cc \quad (1.1)$$

Donde:

$\Delta P'sc$ = Pérdidas referidas del transformador en vacío (kW).

$\Delta P'cc$ = Pérdidas referidas de cortocircuito (kW).

Kc = Coeficiente de carga del transformador.

$$Kc = \frac{Sc}{Sn} \quad (1.2)$$

Donde:

S_c = Carga real del transformador (o de cálculo), (kVA).

S_n = Potencia nominal del transformador, (kVA).

$$\Delta P'sc = \Delta Psc + Kip * \Delta Qsc \quad (1.3)$$

Donde:

ΔPsc = Pérdidas de potencia sin carga, (kW).

ΔQsc = Potencia reactiva del transformador sin carga, (kVAR).

K_{ip} = coeficiente de incremento de pérdidas.

$$\Delta Qsc = Sn(Isc\% / 100) \quad (1.4)$$

Donde:

S_n = Potencia nominal o de chapa del transformador, (kVA).

Isc = Corriente del transformador sin carga

K_{ip} = Coeficiente incremental de pérdidas de potencia activa (para empresas industriales). Cuando este no es dado por el sistema energético, se debe tomar igual como promedio a 0.07 (kW/kVAR).

$$\Delta P'cc = \Delta Pcc + Kip * \Delta Qcc \quad (1.5)$$

Donde:

ΔP_{cc} = Pérdidas de potencia activa del transformador con carga en (kW).

ΔQ_{cc} = Potencia reactiva del transformador con carga (kVAR).

K_{IP} = coeficiente de incremento de pérdidas.

$$\Delta Q_{cc} = S_n(V_{cc}\% / 100) \quad (1.6)$$

Donde:

V_{cc} = voltaje de cortocircuito del transformador.

(Todos los valores deben corresponder al mismo lado del transformador, o sea, lado de alta o lado de baja).

1.4. Análisis de pérdidas en motores asincrónicos.

Los motores eléctricos consumen una gran cantidad de la energía eléctrica generada. En la industria, estas máquinas consumen más del 50%. Entre los motores eléctricos, los asincrónicos trifásicos constituyen la inmensa mayoría. Esto indica la importancia de trabajar en las medidas que permitan contribuir al objetivo de ahorrar energía y gastos capitales en el campo de ese tipo de motores.

De la potencia eléctrica total consumida por un motor eléctrico de la red, la mayor parte es entregada al mecanismo accionado y es, por tanto, aprovechada. Ahora bien, una parte se pierde dentro del motor, como consecuencia de los procesos electromagnéticos que se llevan a cabo en su interior, convirtiéndose en calor y tiene dos efectos negativos: aumentar el consumo de energía eléctrica del motor y elevar la temperatura del aislamiento de la máquina disminuyendo su vida útil si sobrepasa un límite. Las pérdidas de potencia (y, por tanto, de energía si consideramos también el tiempo de operación) que ocurren en un motor son de tres tipos:

Las pérdidas variables: que dependen del cuadrado de la corriente que circula por el motor y, por tanto, de la carga que lleva en su eje. Evidentemente son función también de las resistencias de los devanados.

Las pérdidas constantes: que son a su vez de dos tipos: las de acero o magnéticas y las mecánicas. Las primeras ocurren en el acero activo de la máquina y dependen del flujo magnético, el mismo es proporcional a la relación entre la tensión y la frecuencia y, por tanto, si estas variables no varían, estas pérdidas pueden considerarse también constantes. Las pérdidas mecánicas son resultado de la rotación de la máquina por la fricción entre las partes fijas y móviles y el batimiento del aire en su interior. Dependen de la velocidad de rotación. Como en la inmensa mayoría de los casos la velocidad del motor de inducción varía muy poco con la carga, estas pérdidas suelen considerarse también constantes.

Las pérdidas adicionales o indeterminadas: no contempladas en los acápites anteriores y debidas a fenómenos tales como la variación de flujo a la que da lugar el ranurado del estator y el rotor, las corrientes parásitas en el interior de los conductores, el flujo de dispersión que eventualmente pueda circular en las partes no activas de la máquina y otras. Estas pérdidas son extraordinariamente difíciles de considerar o determinar en la práctica y están entre el 1% y el 3% de la potencia útil de la máquina.

1.4.1 Razones para Determinar la Carga del Motor

Muchos motores funcionan de 50 a 100% de su carga nominal. La eficiencia máxima generalmente se encuentra cerca del 75% de la carga nominal. La eficiencia del motor de inducción tiende a decrecer bruscamente por debajo del 50%. De forma general, el rango de buena eficiencia varía con la potencia del motor y tiende a ser mayor para grandes motores. Un motor es considerado subcargado cuando la eficiencia se encuentra en el rango que cae bruscamente, también cae el factor de potencia, pero en menor grado que la eficiencia, y la carga en el eje. La sobrecarga del motor produce sobrecalentamiento y pérdidas de eficiencia. Muchos motores son diseñados con un factor de servicio que admiten sobrecargas ocasionales. El factor de servicio es un multiplicador que indica cuanto puede ser sobrecargado un motor

bajo condiciones ambientales ideales. Este factor de servicio para el trabajo continuo reduce la eficiencia y el tiempo de vida útil.

Nunca debe operar sobrecargado cuando el voltaje está por debajo del nominal o cuando el enfriamiento es afectado por altitud, alta temperatura del ambiente, o por la superficie lisa del motor. Si en su operación usas equipamientos que operan por un largo período bajo el 50% de la carga, considere hacer modificaciones. Muchas veces los motores están sobredimensionados porque es muy cómodo para condición de pico, tales como cuando una bomba tiene que satisfacer ocasionalmente alta demanda.

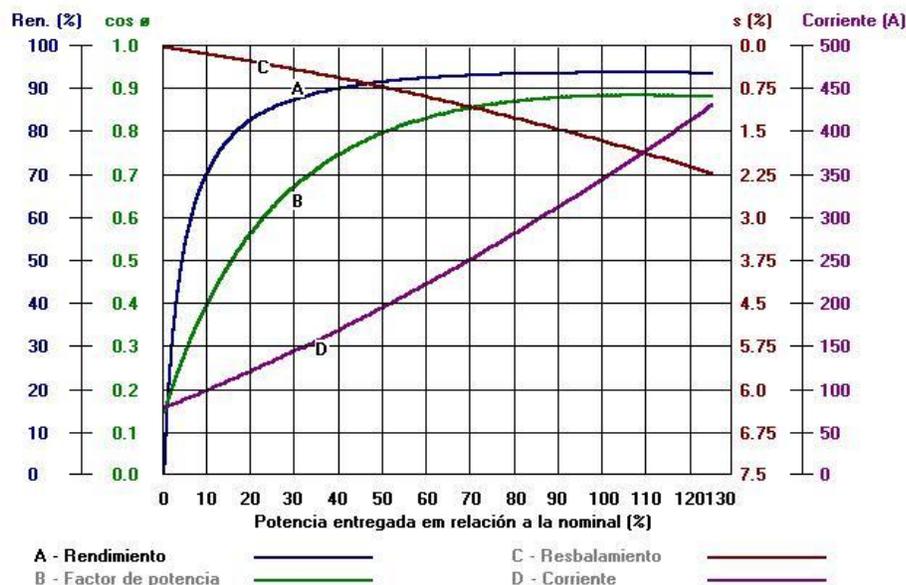


Figura.1.1 Características de funcionamiento del motor de inducción.

1.5. Compensación de potencia reactiva.

La compensación de potencia reactiva mediante la instalación de condensadores en sistemas de distribución es una técnica utilizada por las empresas eléctricas desde casi el inicio de la industria. Existen numerosas y diferentes metodologías para el

diseño de un esquema de compensación de potencia reactiva, pero en todos ellos la finalidad es la selección y ubicación en la red de los condensadores.

Tres son los objetivos básicos que se pretenden con la compensación de reactiva en la carga: corrección del factor de potencia y mejora de la regulación de tensión y equilibrado de la carga. Realizando énfasis en la mejora del factor de potencia podemos decir que dada la influencia que tiene en la factura energética, es sin duda la función más conocida de la compensación reactiva. Consiste en generar reactiva allí donde se consume. En general, se busca un factor de potencia cercano a (0.95), ya que el valor del factor de potencia igual a 1 no supone una mejora sustancial en el rendimiento y es un objetivo mucho más costoso.

1.5.1. Elementos que influyen en el balance de potencia reactiva.

Para una adecuada generación y flujo de potencia reactiva se deben considerar:

- La variación de la tensión de generación.
- La variación de los taps en los transformadores.
- Conexión y desconexión de bancos de condensadores y reactores.
- Configuración de los compensadores estáticos (SVC)
- La configuración de la red y el despacho de generación.

1.5.2. Equipos Compensadores de Potencia Reactiva.

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

- Bancos de condensadores.
- Condensadores sincrónicos (motores sincrónicos sobreexcitados).
- Compensadores activos (basados en electrónica de potencia: SVC, FACTS, etc.).

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

1.5.3. Tipos de compensaciones de reactivos mediante bancos de condensadores.

Compensación central con banco automático.

Este tipo de compensación ofrece una solución generalizada para corregir el factor de potencia ya que la potencia total del banco de condensadores se instala en la acometida, cerca de los tableros de distribución de energía, los cuales, suministran la potencia reactiva demandada por diversos equipos con diferentes potencias y tiempos de operación.

La potencia total del banco de condensadores se divide en varios bloques que están conectados a un regulador automático de energía reactiva, que conecta y desconecta los bloques que sean necesarios para obtener el factor de potencia previamente programado en dicho regulador.

Ventajas:

- Mejor utilización de la capacidad de los bancos de condensadores.
- Se tiene una mejora en la regulación del voltaje en sistema eléctrico.
- Suministro de potencia reactiva según los requerimientos del momento.
- Es de fácil supervisión.

Desventajas

La desventaja de corregir el factor de potencia mediante la compensación centralizada, es que las diversas líneas de distribución no son descargadas de la potencia reactiva, además, se requiere de un regulador automático en el banco de condensadores para compensar la potencia reactiva, según las necesidades de cada momento.

Compensación combinada

La compensación mixta o combinada de potencia reactiva, se refiere a la combinación de dos o más métodos para corregir el factor de potencia. Tiene como desventaja que puede ocasionar una sobrecompensación en el sistema eléctrico.

1.5.4. Clasificación de los bancos de condensadores a utilizar para la compensación de potencia reactiva.

Los bancos de condensadores se clasifican por su modo de operación en: bancos fijos y bancos controlados.

Los bancos fijos están permanentemente conectados al sistema, aportando el total de su potencia reactiva en todo momento. Esto puede traer algunos inconvenientes debido a la variabilidad de la carga en el tiempo, es por esto que se emplean bancos compuestos por una o varias unidades capacitivas que se conectan o desconectan por determinada estrategia, que pueden ser:

- 1) Controlados por tiempo.
- 2) Controlados por voltaje.
- 3) Controlados por corriente.
- 4) Controlados por factor de potencia.

Control por factor de potencia: El control por factor de potencia es uno de los más empleados actualmente en los centros generales de distribución de baja tensión de las industrias e instalaciones de servicio. Se basa en obtener señales de voltaje y corriente de la red que permiten determinar el factor de potencia y por lo tanto controlar este parámetro a un valor prefijado.

En forma general, este tipo de banco está compuesto por una batería de condensadores de igual o diferente capacidad, que se conectan y desconectan por contactores magnéticos para seguir la curva de carga reactiva y lograr mantener el factor de potencia de la instalación lo más cercano posible al valor prefijado.

1.5.5. Métodos para la compensación de potencia reactiva.

Compensación global.

Ventajas:

Suprime las penalizaciones por un consumo excesivo de energía reactiva.

Ajusta la potencia aparente (S en kVA.) a la necesidad real de la instalación.

Descarga el centro de transformación (potencia disponible en kW.).

Observaciones:

La corriente reactiva está presente en la instalación desde el nivel 1 hasta los receptores.

Las pérdidas por efecto Joule en los cables no quedan disminuidas.

Compensación parcial.

Ventajas:

Suprime las penalizaciones por un consumo excesivo de energía reactiva.

Optimiza una parte de la instalación,

Descarga el centro de transformación (potencia disponible en kW).

Compensación individual

Ventajas:

Suprime las penalizaciones por un consumo excesivo de energía reactiva.

Optimiza toda la instalación eléctrica. La corriente reactiva (I_r) se abastece en el mismo lugar de su consumo. Descarga el centro de transformación (potencia disponible en kW).

1.5.6. Beneficios que brinda la compensación de reactivo.

Después de un minucioso análisis sobre la compensación de potencia reactiva, incluyendo la cantidad de condensadores a utilizar y los diferentes métodos de compensación con sus ventajas y desventajas. Podemos mencionar las ventajas que estos pueden proporcionar al sistema eléctrico dentro de un contexto generalizado:

- Aumentar la capacidad del sistema eléctrico para entregar energía activa
- Mejorar la calidad del voltaje
- Disminuir las pérdidas en el sistema de suministro eléctrico
- Disminuir el costo de energía eléctrica.

- Postergar inversiones por necesidades de refuerzos.
- Aumento de los márgenes de reserva de potencia reactiva frente a eventuales perturbaciones.
- Minimizar costos de operación del sistema; evitar restricciones al despacho económico; prevenir colapsos de tensión y mantener márgenes de seguridad.
- Mejora del margen de estabilidad estacionaria y transitoria del sistema.

1.5.7. Cálculo para la compensación de reactivo.

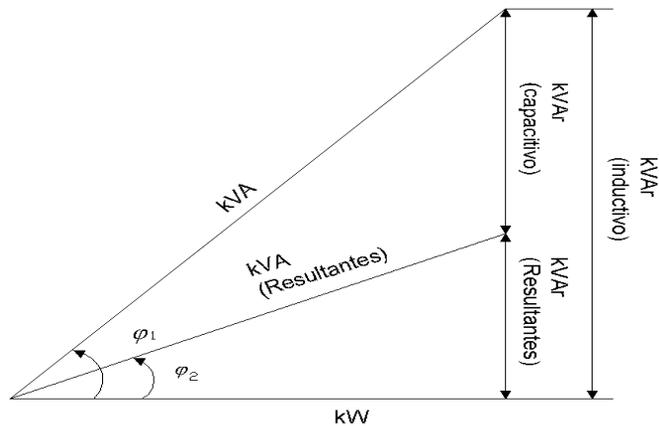


Figura 1.2. Reducción del ángulo φ mediante la conexión de una cantidad determinada de potencia reactiva capacitiva al circuito.

En este caso:

$$\tan \varphi_1 = \frac{Q_1}{P} \quad (1.7)$$

y para el nuevo ángulo luego de la corrección:

$$\tan \varphi_2 = \frac{Q_2}{P} \quad (1.8)$$

Para conocer la potencia reactiva capacitiva que mejore el valor del factor de potencia de $\cos \varphi_1$ a $\cos \varphi_2$ se utilizará la fórmula:

$$CkVAr = kW(\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \quad (1.9)$$

Donde:

CkVAr : Potencia reactiva debida a los capacitores;

kVAr : (inductivo) potencia reactiva de la carga;

kW : Potencia activa de la carga; la que es invariable;

φ_1 : Ángulo del factor de potencia sin capacitores

φ_2 : Ángulo del factor de potencia con capacitores.

1.5.8. Beneficios al mejorar el factor de potencia.

Potencia aparente liberada (S_L)

$$S_2 = S_1 (\cos \varphi_1 / \cos \varphi_2) \quad (1.10)$$

$$S_L = S_1 - S_2 \quad (1.11)$$

Potencia activa liberada (P_L).

$$P_2 = P_1 (\cos \varphi_1 / \cos \varphi_2) \quad (1.12)$$

$$P_L = P_1 - P_2 \quad (1.13)$$

Reducción de corriente (I_L).

$$P_1 = \sqrt{3} U \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 \quad (1.14)$$

$$P_2 = \sqrt{3} U \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 \quad (1.15)$$

$$I_L = I_1 - I_2 \quad (1.16)$$

CAPÍTULO II. DESARROLLO DE LA EXPERIMENTACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. Descripción del proceso tecnológico de la Planta de Recuperación de NH₃.

La planta de Recuperación de Amoniacó tiene la función de recuperar el NH₃ y el CO₂ del licor, así como de las colas recibidas de Lixiviación, obteniéndose al mismo tiempo la cola como desecho, y como producto la pulpa de carbonato de Ni y el licor fuerte de amoniacó y CO₂.

Esta planta recibe el licor producto desde la UBP Lixiviación y lavado, que se distribuye en tres partes en el distribuidor, pasando cada porción a la batería de turboaeradores.

De los turboaeradores el licor es bombeado a los filtros de hojas. Este licor filtrado es almacenado en un tanque (TK 118) y es bombeado a la sección de Cobalto donde se realiza la separación del Cobalto. El licor descobaltizado se recibe nuevamente en la sección en los tanques TK 119 y 120 desde donde se bombea a las torres de destilación de licor producto; aquí se separa parte del amoniacó y CO₂, se envía a dos tanques depresurizadores, desprendiéndose parte del agua de la pulpa de carbonato en forma de vapor que pasa a través de las chimeneas de dichos tanques al sistema de separación de partículas. La pulpa depresurizada se bombea hasta los sedimentadores de la UBP Calcinación y Sínter.

Los gases obtenidos de NH₃, CO₂ y H₂O se enfrían en los intercambiadores de calor de tubo y coraza hasta una temperatura (57 a 60) °C, formando una mezcla líquido-gas que es enviada al proceso de absorción.

La cola enviada desde la UBP Lixiviación y Lavado se distribuye por los precalentadores. La pulpa caliente alrededor de unos 50 °C se descarga por gravedad desde los precalentadores hasta los tanques de retención de cola, desde

donde se bombea hasta las torres de destilación. La pulpa descargada se envía por gravedad a dos tanques depresurizadores luego pasa por gravedad al pozo de cola desde donde se bombea hasta el dique de cola.

Los gases desprendidos de las columnas de destilación ceden parte de su calor a la pulpa en los precalentadores, que por ser de contacto directo, el condensado pasa a destilación y los gases compuestos por NH_3 , CO_2 y H_2O continúan hacia el hidrociclón, donde se separan las partículas de colas arrastradas por ellos.

La absorción de estos compuestos se efectúa en las torres absorbedoras 401 que absorbe con licores fuertes enfriados y además con licores débiles bombeados desde los tanques de licor débil, el agua se introduce por las torres 403 y 404.

En los tanques 406 y 407 se alimenta solución compensadora al 25 % para recuperar las pérdidas de amoniaco en el circuito de Recuperación y Lixiviación.

El licor extraído del fondo de la torre 401 se bombea a las baterías de enfriadores formados por seis unidades y un enfriador de placas, el licor enfriado es almacenado en los tanques de licor fresco TK 416 y 417, de donde se bombea a la UBP Lixiviación y Lavado.

Como medio de enfriamiento se utiliza el agua del sistema de retorno, y para el sistema de absorción se utiliza agua suavizada proveniente de la UBS Planta Termoenergética.

2.2. Descripción del Sistema de Suministro Eléctrico.

El sistema de suministro eléctrico de fuerza de la Planta de Recuperación de Amoniaco (NH_3) de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara se alimenta directamente de la subestación de distribución 1SD. El mismo está compuesto por la subestación transformadora llamada 1TP16 con una distribución de dos transformadores tipo TMB 1600/10-T conectados en Delta-Estrella aterrada con una

capacidad de 1600 kVA, con un voltaje de 10/0.48KV que alimentan dos secciones de barra de forma individual. Para una mayor flexibilidad en el esquema se cuenta con un interruptor seccionador que logra enlazar ambas secciones y mantener todas las cargas en un momento dado, alimentándose desde un solo transformador; en el Anexo 2 se muestra el Monolineal del objeto de estudio en el que se detallan las cargas instaladas con todos sus parámetros nominales.

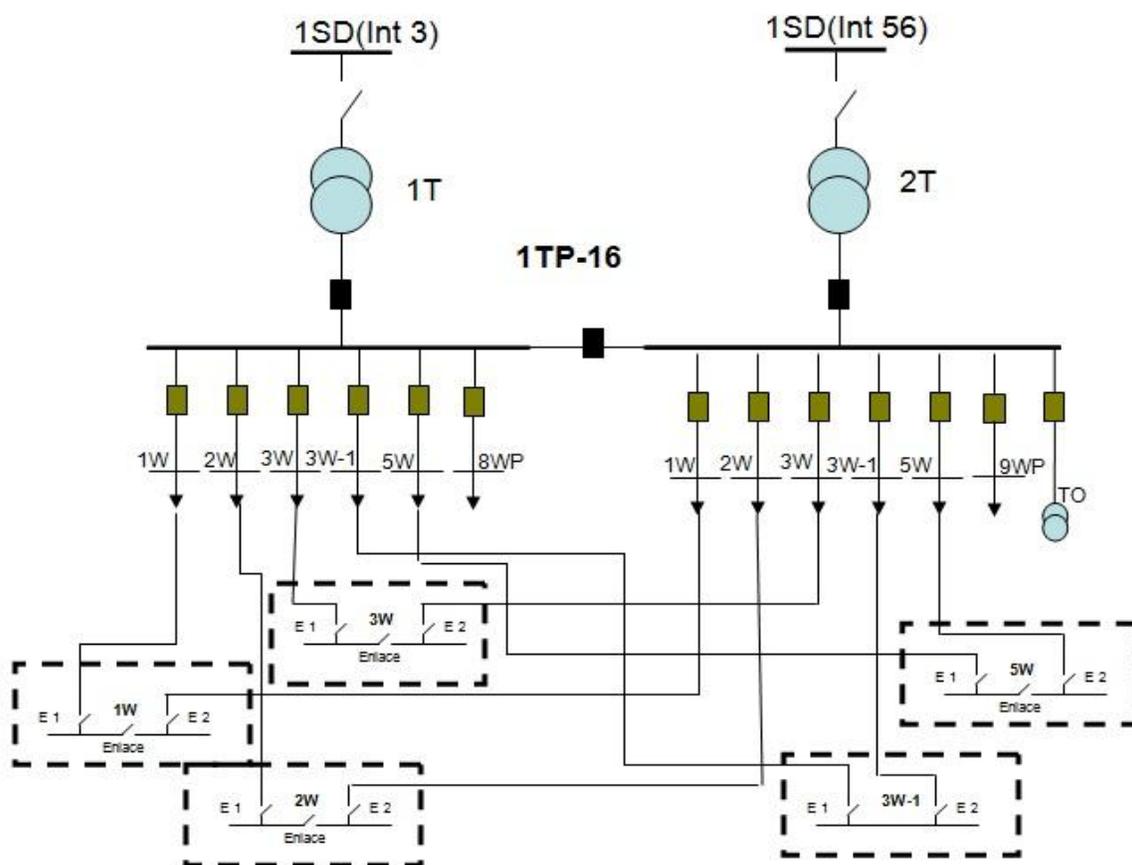


Fig.2.1 Sistema de suministro eléctrico de la Planta

La primera sección de la subestación está conectada al armario # 3 de la subestación 1SD, la que alimenta la primera sección de cada centro de control de motores y la segunda está conectada al armario # 56 de dicha subestación, la cual

alimenta la segunda sección de cada centro de motores. Toda la red se ejecuta a través de cables ABBT 1000 y en cada centro de control de motores la red se ejecuta por cables BB6T A, con excepción de algunos casos.

El interruptor de entrada es un 340 BT de 4000 A con un ajuste de 2500 A, con una corriente de sobrecarga de 3325 A y una corriente de cortocircuito de 7500 A. El interruptor de enlace es un 316 BT de 1250 A con un ajuste de 1250 A y una corriente de sobrecarga de 1553 A y la de cortocircuito es de 3750 A. Las características del resto de los interruptores utilizados en los Centro de Control de Motores (CCM) de la planta se pueden observar en la siguiente tabla.

Tabla 2.1 Interruptores de cada sección

Sección	Interruptor	Corriente de Ajuste (A)	Corriente de Sobrecarga (A)	Corriente de Cortocircuito (A)
1w1s	306BT	630	800	3160
1w2s	306BT	630	800	3160
2w1s	306BT	400	600	2800
2w2s	306BT	400	500	2800
3w1	306BT	400	500	2800
3w1s	306BT	400	500	2800
3w2s	306BT	400	500	2800
5w1s	306BT	630	800	3160
5w2s	306BT	630	800	3160

2.2.1. Caracterización de las principales cargas instaladas en la subestación.

I Sección, CCM 1W, 480V, 60Hz

- Agitador 112: 7.5 kW, 12A, 440V, 1750rpm, FP=0.82, Eficiencia 82%.
Ubicación sección de filtración de licor.
- Filtro 107, 106, 105: 0.75KW, 2A, 440V, 1800rpm, FP=0.8, Eficiencia 69%.
Ubicación sección de filtración de licor.
- Bomba 115: 30KW, 43A, 440V, 1760rpm, FP=0.81, Eficiencia 86%. Ubicación
sección de filtración de licor.
- Bomba 211F, 121G: 7,5KW, 14A, 440V, 1760rpm, FP=0.81, Eficiencia 86%.
Ubicación sección de filtración de licor.
- Bomba 117D: 22KW, 37A, 440V, 3530rpm, FP=0.87, Eficiencia 89%.
Ubicación sección de filtración de licor.
- Bomba 420C, D: 4.8KW, 25A, 440V, 3400rpm, FP=0.84, Eficiencia 82%.
Ubicación sección de filtración de licor.
- Bomba 121A, B: 55KW, 86A, 440V, 1760rpm, FP=0.91, Eficiencia 92%.
Ubicación sección de filtración de licor.
- Bomba 104C, D: 55KW, 89A, 440V, 1760rpm, FP=0.88, Eficiencia 92%.
Ubicación sección de filtración de licor.

II Sección, CCM 1W, 480V, 60Hz

- Bomba 121C: 55KW, 86A, 440V, 1760rpm, FP=0.91, Eficiencia 92%.
Ubicación sección de filtración de licor.
- Bomba 104B: 55KW, 89A, 440V, 1765rpm, FP=0.90, Eficiencia 90%.
Ubicación sección de filtración de licor.
- Bomba 104A: 55KW, 89A, 440V, 1765rpm, FP=0.88, Eficiencia 92%.
Ubicación sección de filtración de licor.

- Bomba 116: 7.5KW, 14A, 440V, 1160rpm, FP=0.81, Eficiencia 85%. Ubicación sección de filtración de licor.
- Bomba 114: 7.5KW, 13A, 440V, 3560rpm, FP=0.81, Eficiencia 86%. Ubicación sección de filtración de licor.
- Filtro 108, 109,110: 0.75KW, 2A, 440V, 1800rpm, FP=0.80, Eficiencia 74%. Ubicación sección de filtración de licor.
- Bomba 121H: 110KW, 172A, 440V, 1800rpm, FP=0.88, Eficiencia 92%. Ubicación sección de filtración de licor.
- Bomba 211E: 45KW, 75A, 440V, 1180rpm, FP=0.86, Eficiencia 90%. Ubicación sección de filtración de licor.
- Bomba 2ENS: 2KW, 3.7A, 440V, 1800rpm, FP=0.83, Eficiencia 81%. Ubicación sección de filtración de licor.
- Bomba 480F: 18KW, 28A, 440V, 1800rpm, FP=0.86, Eficiencia 88%. Ubicación sección de filtración de licor.

I Sección, CCM 2W, 480V, 60Hz

- Bomba 117A, 121E, 121F: 55KW, 89A, 440V, 1670rpm, FP=0.85, Eficiencia 91%. Ubicación sección de los alambiques de licor.
- Bomba 117B: 40KW, 65A, 440V, 3500rpm, FP=0.89, Eficiencia 90%. Ubicación sección de los alambiques de licor.
- Bomba 211C, D: 40KW, 65A, 440V, 1170rpm, FP=0.85, Eficiencia 94%. Ubicación sección de los alambiques de licor.

II Sección, CCM 2W, 480V, 60Hz

- Bomba 211A, B: 40KW, 65A, 440V, 1170rpm, FP=0.85, Eficiencia 94%. Ubicación sección de los alambiques de licor.
- Bomba 117C: 40KW, 54A, 440V, 3500rpm, FP=0.87, Eficiencia 90%. Ubicación sección de los alambiques de licor.

- Bomba 213: 18KW, 28A, 440V, 1765rpm, FP=0.86, Eficiencia 88%. Ubicación sección de los alambiques de licor.
- Agitador 212, 215: 17KW, 28.2A, 440V, 1670rpm, FP=0.86, Eficiencia 88%. Ubicación sección de los alambiques de licor.
- Ventilador 201, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 208: 3KW, 5A, 440V, 1670rpm, FP=0.83, Eficiencia 81%. Ubicación sección de los alambiques de licor.

I Sección, CCM 3W1, 480V, 60Hz

- Bomba 313A, B, C, D: 55KW, 78A, 440V, 1180rpm, FP=0.85, Eficiencia 91%. Ubicación sección pozo de cola.
- Agitador 323A, B, 325A, B, 321A, B: 22KW, 39A, 440V, 865rpm, FP=0.87, Eficiencia 89%. Ubicación sección pozo de cola.

I Sección, CCM 3W, 480V, 60Hz

- Ventilador 307, 308, 309: 3KW, 6.7A, 440V, 1370rpm, FP=0.77, Eficiencia 81%. Ubicación sección alambiques de cola.
- Bomba 425: 7.5KW, 14A, 440V, 1760rpm, FP=0.81, Eficiencia 86%. Ubicación sección alambiques de cola.
- Bomba 342D, 326A, B, 324A, B, C: 45KW, 76A, 440V, 1180rpm, FP=0.85, Eficiencia 91%. Ubicación sección alambiques de cola.

II Sección, CCM 3W, 480V, 60Hz

- Bomba 326C, D: 45KW, 76A, 440V, 1180rpm, FP=0.85, Eficiencia 91%. Ubicación sección alambiques de cola.
- Bomba 322A, B, C, D: 45KW, 64A, 440V, 1780rpm, FP=0.88, Eficiencia 91%. Ubicación sección alambiques de cola.
- Bomba 316, 420H, 420E: 7.5KW, 11.5A, 440V, 1760rpm, FP=0.86, Eficiencia 85%. Ubicación sección alambiques de cola.

- Agitador 315: 17KW, 27.5A, 440V, 1760rpm, FP=0.86, Eficiencia 88%.
Ubicación sección alambiques de cola.
- Agitador 314: 45KW, 64A, 440V, 1175rpm, FP=0.88, Eficiencia 91%.
Ubicación sección alambiques de cola.
- Bomba 420G: 18KW, 28A, 440V, 1160rpm, FP=0.86, Eficiencia 88%.
Ubicación sección alambiques de cola.
- Bomba 400E, 121D: 55KW, 86A, 440V, 1760rpm, FP=0.87, Eficiencia 91%.
Ubicación sección alambiques de cola.
- Bomba 313E, F: 55KW, 76A, 440V, 1180rpm, FP=0.85, Eficiencia 91%.
Ubicación sección alambiques de cola.
- Ventilador 301, 302, 303, 304, 305, 306: 3KW, 6.7A, 440V, 1670rpm, FP=0.84,
Eficiencia 81%. Ubicación sección alambiques de cola.
- Bomba 420A, B: 2.2KW, 4A, 440V, 3420rpm, FP=0.82, Eficiencia 81%.
Ubicación sección alambiques de cola.

I Sección, CCM 5W, 480V, 60Hz

- Ventilador 405A, B: 40KW, 67A, 440V, 3540rpm, FP=0.87, Eficiencia 90%.
Ubicación sección del sistema de absorción.
- Bomba 400A, 408A, B: 55KW, 86A, 440V, 1760rpm, FP=0.88, Eficiencia 91%.
Ubicación sección del sistema de absorción.
- Bomba 418A: 75KW, 113.5A, 440V, 1780rpm, FP=0.88, Eficiencia 91%.
Ubicación sección del sistema de absorción.

II Sección, CCM 5W, 480V, 60Hz

- Bomba 408C, D, 400B, C: 55KW, 86A, 440V, 1760rpm, FP=0.88, Eficiencia 91%.
Ubicación sección del sistema de absorción.
- Bomba 418B: 75KW, 113.5A, 440V, 1780rpm, FP=0.88, Eficiencia 91%.
Ubicación sección del sistema de absorción.

- Ventilador 405C, D: 40KW, 67A, 440V, 3540rpm, FP=0.87, Eficiencia 90%. Ubicación sección del sistema de absorción.
- Bomba 409: 7.5KW, 14A, 440V, 3540rpm, FP=0.86, Eficiencia 85%. Ubicación sección del sistema de absorción.
- Bomba 117D: 40KW, 54A, 440V, 3540rpm, FP=0.87, Eficiencia 90%. Ubicación sección del sistema de absorción.

2.3. Características del analizador de redes utilizado.

En la Figura 2.2 se puede observar el Power Quality Meter (PQM) utilizado en la investigación, es una opción ideal para el monitoreo continuo de un sistema sencillo o trifásico. Este permite la medición de corriente, voltaje, potencia, energía reactiva, energía aparente, consumo de energía, calidad de la energía, factor de potencia y frecuencia. Posee un set programable y cuatro relés de salidas asignables que permiten funciones de control que se adicionan para aplicaciones específicas. Esto incluye una alarma en caso de alto o bajo voltaje, variaciones de corrientes, desbalances entre las fases, demandas de distribución de las cargas y control de corrección del factor de potencia.



Fig 2.2 Power Quality Meter (PQM)

Al reunir los datos de un dispositivo para el sistema de automatización de una planta que integra el proceso de instrumentación y requerimientos eléctricos, todos los

valores monitoreados están disponibles mediante uno o dos RSX85 puertos de comunicación. Si los valores analógicos son exigidos para interfaces directas a un PLC, algunos de los valores monitoreados pueden salir de 4 a 20 mA (o de 0 a 1mA) señal para reemplazar a 4 transductores. Un tercer puerto de comunicación RS232 conecta a una PC desde el panel frontal para el acceso simultáneo de información.

Características del PPQM

- Monitoreo: A, V, VA, W, VAr, kWh, KVArh, KVAh, PF, Hz.
- Demanda: P, Q, I, S
- Ajuste de alarma y señales de control para las mediciones de desbalance, factor de potencia, corriente, voltaje y frecuencia.
- Tiene 4 Relés de salida y 4 interruptores de entrada para la configuración del control.
- Tiene 4 salidas analógicas.
- Posee una entrada analógica de 4 a 20 mA.
- Comunicación Modbus
- Tres puertos de comunicación 2RS485 y 1RS232. Para acceso, mantenimiento y programación.
- Posibilidad de análisis de los armónicos para chequear la calidad de la energía.
- Display de 40 caracteres y teclado para programación local.
- Contiene un software de PQPS para el ajuste y monitoreo de algunas PC.
- Modo de simulación para pruebas y entrenamiento.
- Diseño compacto para montaje en paneles y chasis.
- Alimentación de CA/CD.

2.4. Consumos históricos de la planta.

Para realizar un análisis más exacto, mostraremos el consumo mensual de los 12 meses del año 2014 para determinar el mes de mayor consumo. Como se observa en la figura 2.3 el mayor consumo está en el mes de octubre que corresponde con la mayor cantidad de toneladas de níquel producidas según los informes de dirección de la empresa.

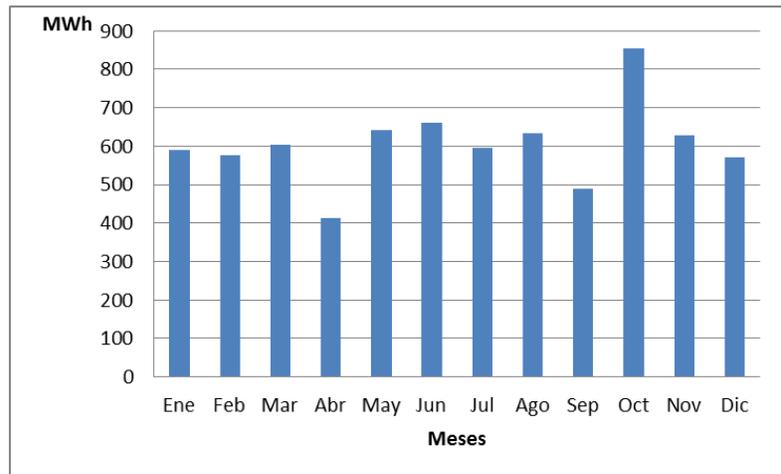


Figura 2.3. Gráfico de carga por mes de la planta Recuperación de NH₃

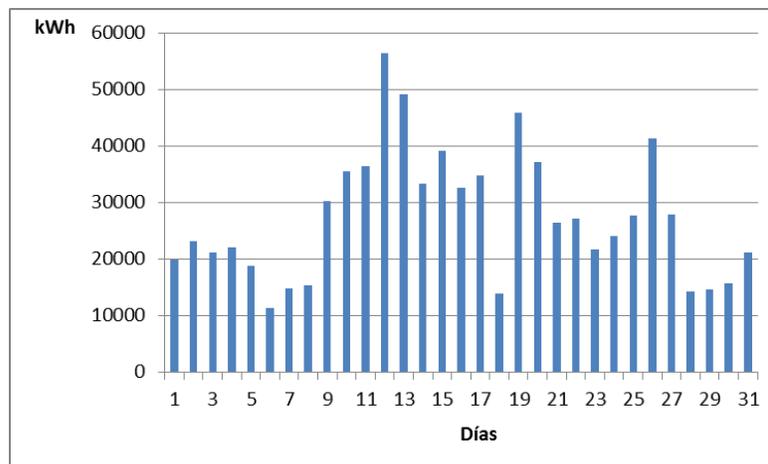


Figura 2.4. Gráfico de carga del mes de mayor consumo de la planta de Recuperación de NH₃

Las variaciones del consumo de electricidad se deben a los mantenimientos en secciones de barra para poder realizar los mismos es necesario enfriar una sección, lo que provoca que dejen de funcionar cierto grupo de motores. Otra razón que provoca fluctuaciones del consumo eléctrico es cuando se decide disminuir o elevar la producción para esto, paran las bombas de cierto número de alambiques.

El análisis de los consumos diarios de octubre figura 2.4 nos permite comprobar que el día de mayor consumo es el día 12.

2.5. Análisis de las mediciones.

Las mediciones fueron realizadas con el PPQM descrito anteriormente en los dos transformadores principales de la subestación, durante aproximadamente 24 horas continuas a intervalos de muestreo de 120 segundos. Las variables analizadas fueron voltaje de línea y de fase, corriente de línea, potencia activa, reactiva y aparente, factor de potencia, frecuencia, energía, demanda y contenidos de armónicos.

2.5.1. Transformador 1.

En este transformador las mediciones fueron realizadas desde el 12 al 13 de octubre. Al analizar las variables eléctricas del transformador 1, ver anexo 1 y figura 2.5, podemos constatar que las demandas promedio de potencia fueron de 520.06kW de potencia activa, 449.28kVAr de potencia reactiva y 687.74kVA de potencia aparente. El máximo valor de potencia activa fue de 551.79kW a la 3:28 PM del 12 de octubre, la potencia reactiva de 479.14kVAr y la potencia aparente de 726.53kVA. El menor valor de potencia activa fue de 465.63 kW, el de potencia reactiva de 423.02 kVAr y el de potencia aparente de 629.16kVA a la 1:40 AM del día 13 de octubre.

El factor de potencia promedio fue de 0.76 oscilando entre 0.78 y 0.73 los valores máximos y mínimos como se muestra en la figura 2.6.

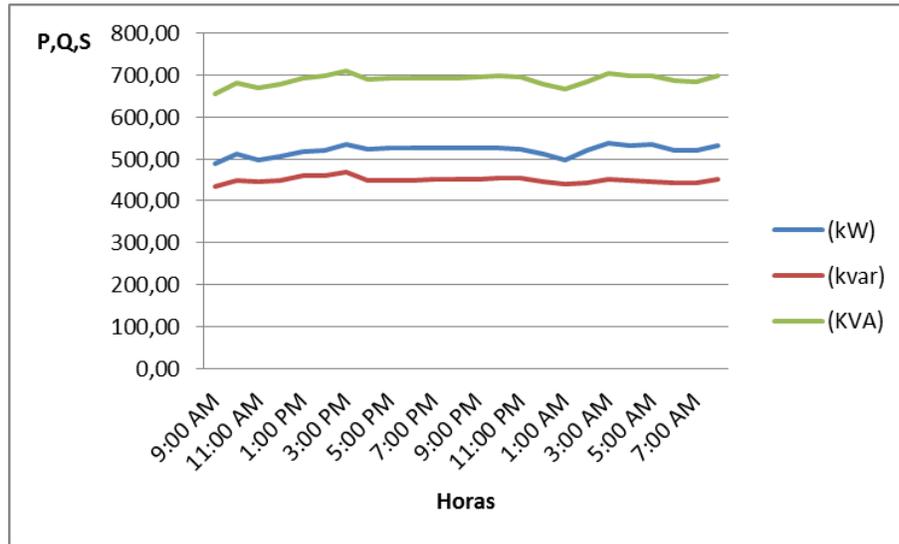


Figura 2.5: Potencias en la primera sección de 1TP-16

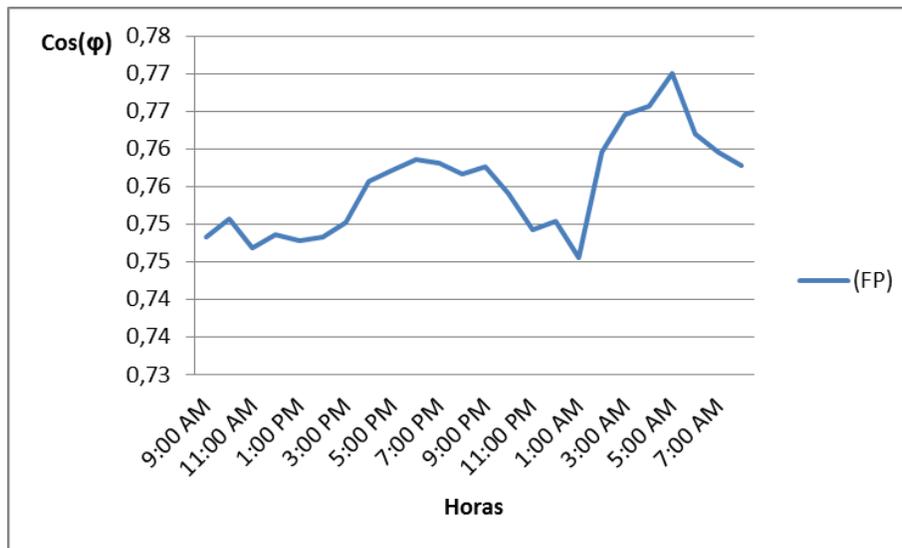


Figura 2.6: Factor de potencia en la primera sección de 1TP-16

Las corrientes se encuentran desequilibradas como se puede observar en figura 2.7, obteniéndose sus máximos valores de 865A en la fase A, 867A en la B y 869A en la C a las 3:02 PM del día 12 de octubre del 2014, el resto del tiempo la fase C se mantiene por encima de las demás.

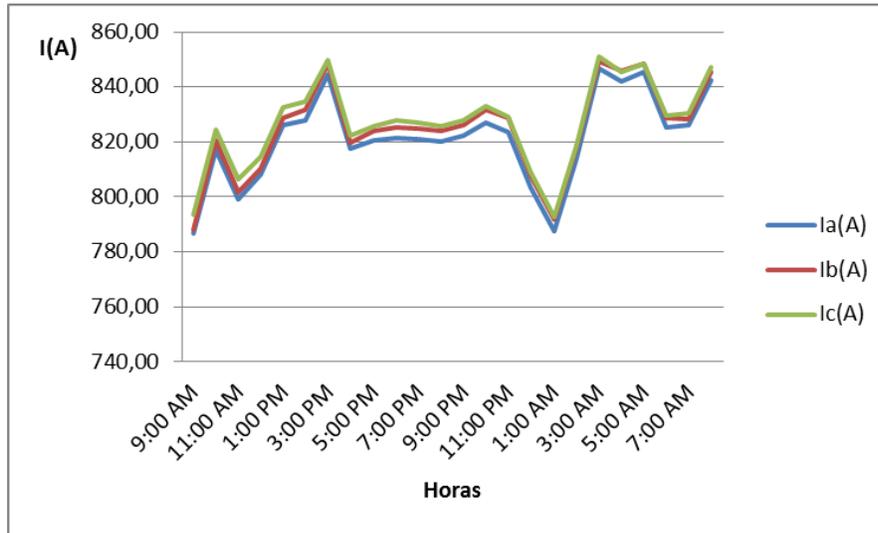


Figura 2.7: Corrientes en la primera sección de 1TP-16

El sistema de tensiones presenta un pequeño desbalance entre las fases como se puede observar en la figura 2.8, alcanzando sus valores máximos a las 9:08 PM de 256.75V en la fase A, 256.5V en la fase B y 255.5V en la fase C a las 7:54 PM del 12 de octubre.

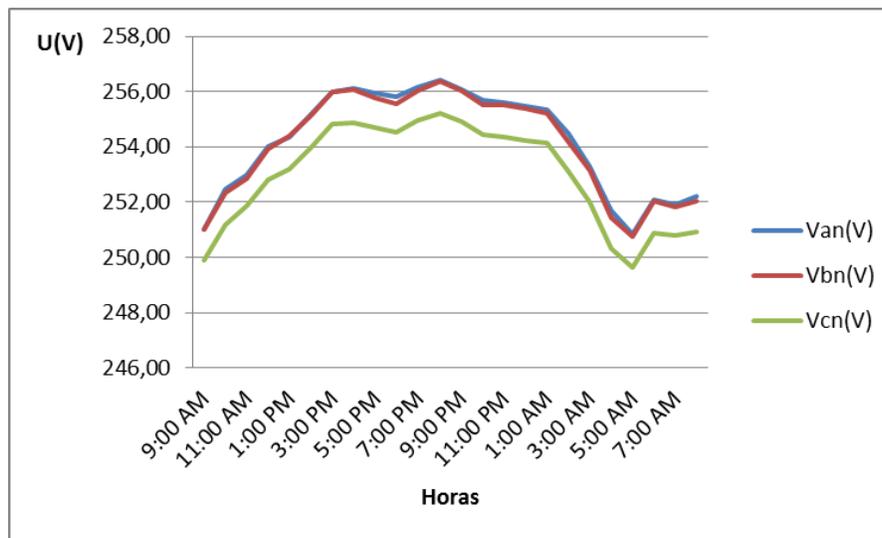


Figura 2.8: Tensiones en la primera sección de 1TP-16

La distorsión armónica máxima de tensión por fase es de 2.75% en la fase A, 1.90% en B y 2.18% en la C, encontrándose por debajo del valor estipulado por la norma

IEEE-519-92, la cual expone que el límite de distorsión total armónica de tensión por fases es del 5% en baja tensión.

2.5.2. Transformador 2.

Al verificar los datos de las mediciones realizadas el 12 y el 13 de octubre al transformador 2 y la figura 2.9 podemos observar que el pico máximo de potencia activa fue a las 5:44 AM de 651.51kW del día 13 de octubre del 2014 y la potencia promedio fue de 584.93kW. El máximo de potencia reactiva fue de 512.78kVAr, el de la potencia aparente fue de 821.89kVA, la media fue de 478.10kVAr y 756.10kVA, respectivamente. El menor valor de potencia activa fue de 473.55kW, el de potencia reactiva 410.09kVAr y el de potencia aparente de 628.19kVA.

El factor de potencia medio fue de 0.76, alcanzando valores máximos de 0.79 y mínimos de 0.72 como se observa en la figura 2.10.

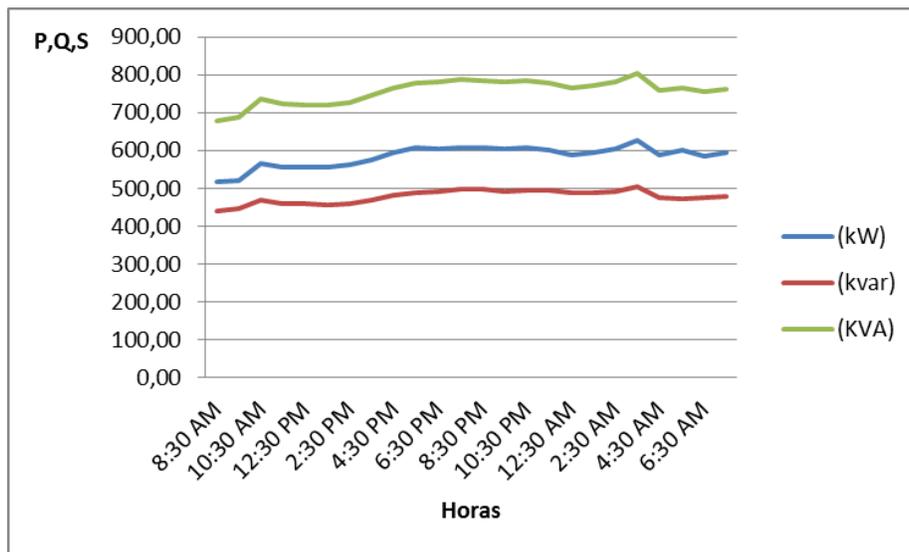


Figura 2.9: Potencias en la segunda sección de 1TP-16



Figura 2.10: Factor de potencia en la segunda sección de 1TP-16

Las corrientes se encuentran bastante equilibradas alcanzando valores máximos a las 5:44 AM de 1033A en la fase A, 1016A en la fase B y 1028A en la fase C. Sus valores mínimos son de 754A en la fase A, 748A en la fase B y 751A en la fase C esto ocurrió a las 10:00 AM del 12 de octubre, el promedio por fase de 928.24A fase A, 921.76A fase B y 924.80A fase C respectivamente ver figura 2.11.

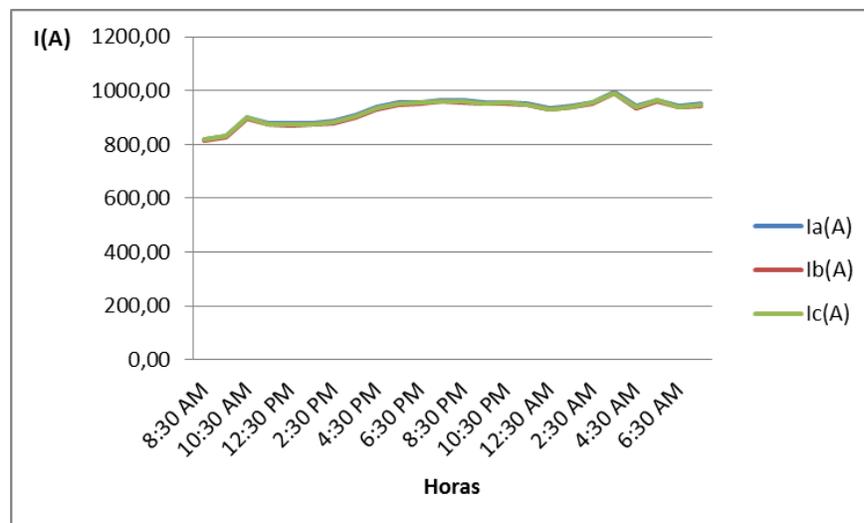


Figura 2.11: Corrientes en la primera sección de 1TP-16

Las tensiones presentan desbalance, sus valores máximos fueron de 254V en la fase A, 253.25V en la fase B y 252V en la fase C a las 12:36 PM del 12 de octubre, luego manteniendo un promedio por fase de 251.45V, 250.71V y 249.33V, respectivamente ver figura 2.12.

La distorsión armónica total máxima de tensión por fase es de 3.10% en la fase A, 2.05% en B y 2.38% en la C, y se encuentran por debajo del valor estipulado por la norma que rige en nuestro país.

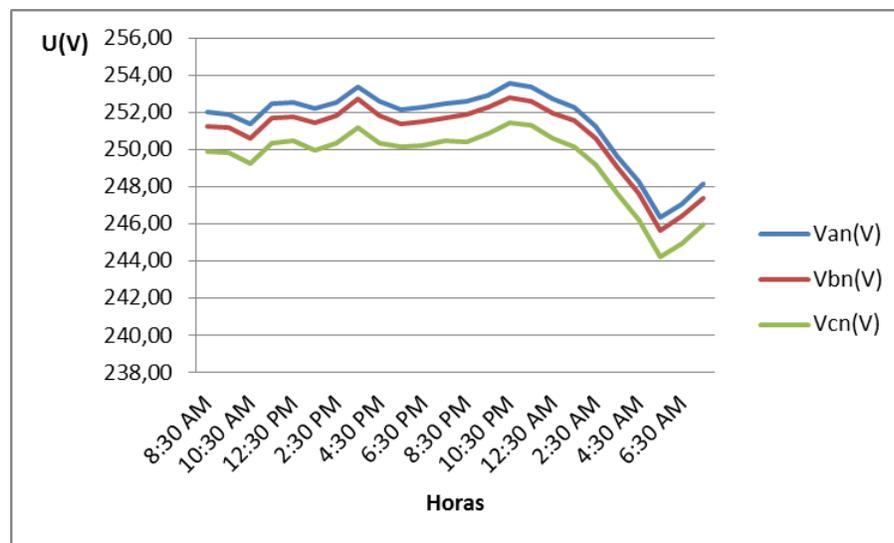


Figura 2.12: Tensiones en la primera sección de 1TP-16

Como se muestra en las tablas y los gráficos de carga, el consumo de potencia reactiva representa el 65% de la potencia aparente es elevado, lo que deteriora el factor de potencia hasta un promedio de 0.76.

Estos valores de factor de potencia se deben principalmente a la presencia de motores asíncronos subcargados, máquinas soldadoras de arco eléctrico. Se hace necesario compensar potencia reactiva para disminuir las pérdidas en el sistema.

2.6. Simulación del flujo de potencias en condiciones actuales.

Para la simulación del flujo de potencias se empleó el software EasyPower, el mismo se utiliza como herramienta dentro de la ingeniería para el análisis industrial y los sistemas de potencia comerciales. Es único debido a que integra el análisis de corto circuito, el flujo de potencia, la coordinación de dispositivos de protección y el banco de datos funciona bajo el mando del diagrama de una línea con gráfico interactivo. EasyPower usa las últimas técnicas de análisis de redes desarrolladas por los líderes mundiales en algoritmos de solución de dispersión y en las técnicas innovadoras computacionales. Muchos de los algoritmos usados en EasyPower no están disponibles en otro programa. Esto le da una tremenda ventaja encima de otros programas en tiempo de ejecución, capacidades modeladas, y exactitud.

Para la actualización del diagrama monolineal de la subestación, se realizó un levantamiento de las cargas instaladas, tomando los parámetros nominales de cada equipo eléctrico, asumiendo como dato la tensión de línea, corriente de línea, potencia activa y factor de potencia. También se tomaron las distancias entre las cargas y sus alimentadores, así como la sección de los conductores. Luego se procedió a la confección del diagrama Monolineal, con ayuda del programa EasyPower.

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 tablas 2.2, 2.3 y 2.4 se muestran un resumen del reporte obtenido después de la corrida de flujo de potencia en condiciones actuales.

Tabla 1.2. Resumen del Reporte de los Generadores

Generator		Scheduled	Solution							
Name	Type	Vpu	kW	kVAR	kVA	Pf	Vpu	Deg	Eq'pu	Deg
SUB 1SD-ARM 56	Sw	1.000	655	583	877	0.747	1.000	0.00	1.005	0.11
SUB 1SD-ARM3	Sw	1.000	555	490	740	0.749	1.000	0.00	1.005	0.09

Tabla 2.3. Resumen del reporte del sistema.

Total	kW	kVAR	kVA	PF
Generation in System	1210	1073	1617	0.748
Load in System	1184	1017	1561	0.758
Shunt Load in System	0	0		
Losses in System	26	56		
Check of Balance	0	0		

Tabla 3.4. Reporte de sobrecarga de los transformadores

Transformer				Load		
Name	From Bus Name	To Bus Name	Load kVA	Rated kVA	Loaded%	OverLoaded%
1T	1SD ARM 3	SECC 1	740	1792	41.3%	-58.7%
2T	1SD ARM 56	SECC 2	877	1792	48.9%	-51.1%

2.7. Análisis de operatividad del esquema de suministro en condiciones actuales.

En el análisis del estado actual de las instalaciones eléctricas se detectaron varios inconvenientes que limitan la operatividad y flexibilidad del sistema de suministro, las cuales se relacionan de forma resumida a continuación.

Los transformadores de la Subestación están trabajando a más de un 70% de su capacidad nominal, por esta razón un solo transformador no es capaz de asimilar toda la carga de la misma y en caso de reparación u ocurrencia de avería en la línea de alimentación de un transformador, los operadores tienen necesidad de limitar la carga del transformador o los interruptores de entrada, para lograr este objetivo varios equipos se afectan, provocando pérdidas en el proceso productivo.

El CCM 3W1 no cuenta con interruptor de enlace por lo que se hace imposible seccionar el mismo, ante un mantenimiento la barra se enfría completamente provocando el paro de todos los motores. En este CCM existen consumidores de primera categoría como los agitadores de los tanques de retención de cola y las bombas del pozo de cola. En los tanques de retención de cola, al pararse el mecanismo agitador, la cola comienza a sedimentarse y puede traer como consecuencia la inmovilización total del mecanismo agitador. Con respecto al pozo de cola, el mismo puede rebosarse e inundar la zona de las bombas del dique, lo que provocaría problemas eléctricos que paralizarían el trabajo de las mismas temporalmente.

CAPÍTULO III. PROPUESTA DE SOLUCIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.

3.1. Mejoras en la distribución del sistema eléctrico de la subestación 1TP-16.

Para solucionar los principales problemas que presenta el esquema de suministro eléctrico actual de la planta, se proponen variantes para aumentar el grado de flexibilidad y confiabilidad del suministro. Para realizar las propuestas se tuvo en cuenta la carga instalada en cada uno de los transformadores y las mediciones realizadas en estos.

Se propone dividir en dos secciones el CCM 3W1 e incorporar un interruptor de enlace entre las mismas. Así se garantiza la continuidad de la operación de las bombas y mecanismos agitadores en caso de avería y trabajo de mantenimiento en el sistema de barra.

Acomodo de carga:

- La BO-116 y BO-480F de la sección II para la sección I en el CCM 1W.
- La BO-313C, BO-313D, AG-323A y AG-323B de la sección I para la sección II en el CCM 3W-1
- La BO-322B de la sección II para la sección I en el CCM 3W.
- La BO-408C y Objt-18 de la sección I para la sección II en el CCM 5W.

Existe una serie de elementos que hacen posible la ejecución de estas variantes sin hacer inversiones ni gastos considerables.

La disposición en los almacenes de la empresa de los interruptores y cables necesarios posibilitan la ejecución de las variantes de mejoras de la distribución. Los cables de alimentación a los equipos se encuentran en puntos cercanos, por lo que es posible realizar el cambio de la conexión en un período de tiempo corto y sin ningún costo de materiales.

3.1.1. Simulación de la mejora de acomodo y distribución del sistema eléctrico.

La simulación se efectuó en el software EasyPower, del cual obtuvimos los reportes de pérdidas y sobrecarga de los transformadores, luego de la mejora de distribución del sistema eléctrico y acomodo de carga.

Tabla 3.1. Resumen de Reporte del Sistema.

Total	kW	kVAR	kVA	PF
Generation in System	1209	1072	1616	0.748
Load in System	1184	1017	1561	0.758
Shunt Load in System	0	0		
Losses in System	25	55		
Check of Balance	0	0		

Tabla 3.2. Reporte de Sobrecarga de los Transformadores.

Transformer				Load		
Name	From Bus Name	To Bus Name	Load kVA	Rated kVA	Loaded%	OverLoaded %
1T	1SD ARM 3	SECC 1	811	1792	45.3%	-54.7%
2T	1SD ARM 56	SECC 2	805	1792	44.9%	-55.1%

La nueva configuración con la quedaría el sistema posibilita reducir las pérdidas por efecto Joule en los conductores del sistema en aproximadamente 1 kW, como se muestra en la tabla 3.1 al compararla con la tabla 2.3 del capítulo 2.

3.2. Mejoras del factor de potencia.

Una instalación industrial común como la referida en nuestro trabajo tiene un factor de potencia natural que puede ser relativamente bajo, en el rango de 0.6 a 0.8 inductivo. Este bajo factor de potencia se debe en gran medida a la presencia de

motores asincrónicos subcargados en los esquemas de los CCM. En la medida en que la planta existan motores por funcionando por debajo de la potencia nominal, puede esperarse un empeoramiento del factor de potencia, a menos que se tomen medidas correctivas desde el orden técnico y organizativo. El mejoramiento del factor de potencia en la industria o los servicios, sólo puede ser alcanzado a través de la correcta combinación de diferentes medios para su elevación, cada uno de los cuales debe ser técnica y económicamente fundamentado. Los medios para la elevación del factor de potencia pueden ser considerados dentro de los grupos generales siguientes:

1. Reducción del consumo de potencia reactiva, sin la aplicación de medios compensadores.
2. Con la aplicación de medios compensadores.

El primer paso para corregir el bajo factor de potencia en una instalación es prevenirlo, para lo cual se debe evitar, en lo posible, la demanda excesiva de potencia reactiva. Para esto, en términos generales, no se requieren grandes inversiones capitales. A esta variante pertenecen las siguientes medidas:

- Ordenamiento del proceso tecnológico.
- Selección correcta del tipo de motor.
- Sustitución de los motores asincrónicos subcargados por otros de menor potencia.
- Reducción de la tensión de los motores que sistemáticamente trabajan con poca carga.
- Limitación del trabajo de los motores en vacío.
- Sustitución de motores asincrónicos por motores sincrónicos.
- Elevación de la calidad de la reparación de los motores.
- Sustitución de los transformadores subcargados.

Usualmente no resultan suficientes las medidas que permiten mejorar el factor de potencia sin emplear medios compensadores y entonces, resulta necesario utilizar equipos auxiliares para corregirlo. 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. Por ningún motivo se debe sobrecompensar la potencia reactiva, ya que un exceso puede ser tan perjudicial como su defecto. En la práctica, principalmente por razones económicas, la potencia inductiva y capacitiva $kVAR_L$ no se anula totalmente, sino que se les mantiene dentro de los valores que den los costos totales menores.

3.2.1 Cálculo de la potencia necesaria para corregir el factor de potencia.

En el sistema de nuestro trabajo no resultan suficientes los métodos preventivos, por lo que se decidió utilizar el método tradicional de corrección a través de la instalación de bancos de condensadores, pero surge una pregunta ¿Qué capacidad debe tener el banco a instalar para compensar el reactivo resultante del proceso industrial?

Como se pudo apreciar en las gráficas de carga de la subestación mostrada en el capítulo anterior no existen valores picos marcados de potencia, pero se tienen los valores máximos de potencias, además, se tomó el valor promedio del factor de potencia, el que resultó ser 0.76, con lo cual todo quedó listo para aplicar los procedimientos de cálculo directo para determinar la capacidad del banco de capacitores necesario para corregir el factor de potencia a un valor de 0,95.

Para esto se escoge el valor máximo de potencia activa obtenida, luego se determina el valor de factor de potencia promedio existente en la instalación, al que se le denominará $\cos\phi_1$. La potencia reactiva necesaria de los capacitores para corregirlo a un nuevo valor de factor de potencia $\cos\phi_2$, se puede calcular aplicando directamente la siguiente expresión derivada de las relaciones del triángulo

representativo de potencia aparente, activa y reactiva según fórmula 1.9 del capítulo 1.

3.3. Variante 1

De todos los tipos de compensación de potencia reactiva planteados en el capítulo 1 se seleccionó la compensación central con banco automático para cada sección individual como se muestra en figura 3.1, debido a la gran variación de la carga durante todo el día y así evitaría una sobrecompensación.

El cálculo de la potencia reactiva necesaria se realizará para corregir el factor de potencia a 0.95. Este se efectuó tomando en cuenta los cambios realizados luego de la mejora en el esquema del suministro actual de la planta. Luego de haber aplicado el método anterior se calculó que la capacidad de los bancos para corregir el reactivo es de 330 kVAr para ambas secciones de las Pizarras Generales de Distribución (PGD) de la subestación 1TP-16.

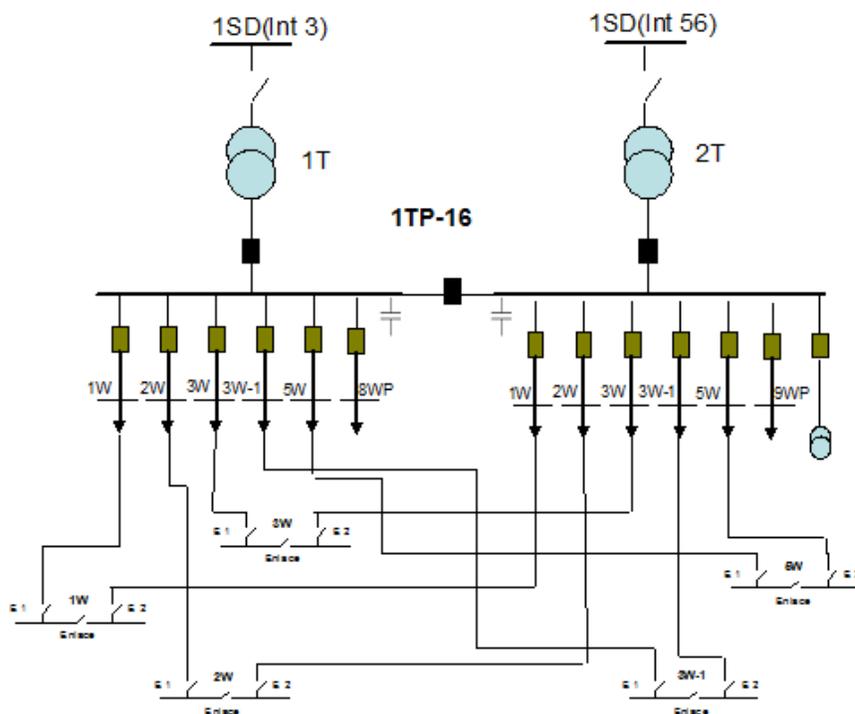


Fig.3.1 Configuración del esquema de suministro para la variante 1.

Simulación de la variante 1

La configuración con la que quedaría el esquema de suministro para esta propuesta luego del acomodo de carga y la instalación de los condensadores se puede observar en el Anexo 3. En los mismos se observan los CCM en los que serían conectados los equipos luego del acomodo así como los bancos de condensadores, los cambios se resaltan en rojo para poder distinguirlos.

El porcentaje de carga de los transformadores, las pérdidas del sistema y el reporte de los generadores luego de las mejoras se pueden ver en las tablas 3.3, 3.4 y 3.5 respectivamente. Estos se lograron determinar mediante la simulación en el EasyPower.

Tabla 3.3. Resumen del Reporte de los Generadores

Generator		Scheduled	Solution							
Name	Type	Vpu	kW	kVAR	kVA	Pf	Vpu	Deg	Eq'pu	Deg
SUB 1SD-ARM 56	Sw	1.000	599	203	633	0.947	1.000	0.00	1.003	0.16
SUB 1SD-ARM3	Sw	1.000	606	204	640	0.948	1.000	0.00	1.003	0.16

Tabla 3.4. Resumen de Reporte del Sistema

Total	kW	kVAR	kVA	PF
Generation in System	1205	407	1272	0.947
Load in System	1184	1017	1561	0.758
Shunt Load in System	0	-645		
Losses in System	22	35		
Check of Balance	-0	-0		

Tabla 3.5. Reporte de Sobrecarga de los Transformadores

Transformer				Load		
Name	From Bus Name	To Bus Name	Load kVA	Rated kVA	Loaded%	OverLoaded%
1T	1SD ARM 3	SECC 1	640	1792	35.7%	-64.3%
2T	1SD ARM 56	SECC 2	633	1792	35.3%	-64.7%

Comparando la tabla 3.4 con la tabla 2.3 del capítulo anterior se observa una disminución de las pérdidas del sistema de 5 kW debido fundamentalmente a la reducción de las pérdidas de los transformadores y por efecto Joule (I^2R) en los conductores y barras del sistema. Además se libera carga de los transformadores gracias a la compensación de potencia reactiva.

Cálculo para mejora del factor de potencia.

Luego de la mejora del factor de potencia, podemos agregarle cargas al sistema puesto que con la compensación del factor de potencia se obtiene un rescate de capacidad en el sistema.

Potencia aparente antes y después de compensar el reactivo según expresión 1.10.

Sección 1 1 TP-16

$S_1 = 790.85$ kVA

$S_2 = 632.68$ kVA

Se libera 158.17 kVA

Sección 2 1 TP-16

$S_1 = 784.95$ kVA

$S_2 = 627.96$ kVA

Se libera 156.99 kVA

Corrientes antes y después de la mejora del factor de potencia ecuaciones 1.14 y 1.15 respectivamente.

Sección 1

$I_1 = 975.37$ A

Después de la mejora

$I_2 = 764.54$ A

Sección 2

$I_1 = 967.98$ A

Después de la mejora

$I_2 = 755.78$ A

Se logra una disminución de un 22% de la corriente producto al mejoramiento del factor de potencia, por lo que consideramos que deben ser ajustadas las protecciones de sobrecorriente.

Cálculo de las pérdidas de los transformadores.

A continuación se ilustra el cálculo de las pérdidas antes y después de la compensación

Datos

$$S_N = 1600 \text{ kVA} \quad P_{SC} = 3.3 \text{ kW}$$

$$P_{CC} = 18 \text{ kW} \quad U_{NP} = 10 \text{ kV}$$

$$U_{NS} = 0.48 \text{ kV}$$

El cálculo de la potencia reactiva demandada por el transformador a plena carga expresión 1.6.

$$\Delta Q_{CC} = 88 \text{ kVAR}$$

Cálculo del coeficiente de carga antes y después de la compensación según ecuación 1.2.

Transformador 1

$$K_c = 0.49$$

Después de la mejora

$$K_c = 0.39$$

Transformador 2

$$K_c = 0.49$$

Después de la mejora

$$K_c = 0.39$$

Cálculo de las pérdidas referidas del transformador con carga expresión 1.5.

Sustituyendo:

$$\Delta P'_{CC} = 18 + 0.05 * 88$$

$$\Delta P'_{CC} = 22.4 \text{ kW}$$

Cálculos de las pérdidas del transformador sin carga expresión 1.3.

Sustituyendo:

$$\Delta P'_{SC} = 3.3 + 0.05 \cdot 91,2$$

$$\Delta P'_{SC} = 7.90 \text{ kW}$$

Con los valores de las pérdidas con carga y sin carga se calculan las pérdidas totales de los transformadores expresión 1.1.

Transformador 1

$$\Delta P'_t = 13.28 \text{ kW}$$

Después de la mejora

$$\Delta P'_t = 11.31 \text{ kW}$$

Transformador 2

$$\Delta P'_t = 13.28 \text{ kW}$$

Después de la mejora

$$\Delta P'_t = 11.31 \text{ kW}$$

Para calcular el consumo de energía se utiliza la ecuación siguiente.

$$\Delta E_a = \Delta P'_t T \quad (3.1)$$

Sección 1 (1TP-16)

$$\Delta E_a = 116\,332.8 \text{ kWh}$$

Después de la mejora

$$\Delta E_a = 99\,075.6 \text{ kWh}$$

Sección 2 (1TP-16)

$$\Delta E_a = 116\,332.8 \text{ kWh}$$

Después de la mejora

$$\Delta E_a = 99\,075.6 \text{ kWh}$$

Consideramos que el número total de las horas de conexión del transformador al sistema es igual al número de horas de trabajo del transformador a baja carga, por esta razón escogimos un año de trabajo del transformador (8760 horas).

Como se observa, las pérdidas se reducen debido al mejoramiento del factor de potencia y nos da un ahorro de energía de:

Sección 1(1TP-16)

$$\Delta E_a = 17\,257.2 \text{ kWh}$$

Sección 2(1TP-16)

$$\Delta E_a = 17\,257.2 \text{ kWh}$$

En total se obtiene un ahorro de energía al año de 34 514.4 kWh/año por reducción de pérdidas en los transformadores.

Cálculo de pérdidas por efecto Joule.

La simulación de las mejoras mostró una reducción de 5 kWh de energía consumida con respecto al esquema actual de la planta. Conocemos por cálculo que las pérdidas en los transformadores se reducen a 3.94 kWh, por lo tanto la diferencia entre la energía total que se ahorra en el sistema y la de los transformadores nos da la reducción de la perdidas Joule, según expresión 3.1.

$$\Delta E_a = 1.06 * 8760 = 9\ 285.6 \text{ kWh/año}$$

3.4. Variante 2.

Para esta variante se seleccionó la compensación combinada con banco automático figura 3.2, debido a la variación de la carga durante todo el día y así evitar una sobrecompensación. El cálculo de la potencia reactiva necesaria se realizará para corregir el factor de potencia a 0.95. Luego de haber aplicado la expresión 1.9 del capítulo 1 se calculó que la capacidad de los bancos para corregir el reactivo es de:

Sección I

100kVAR conectado a la PGD

90kVAR conectado al CCM 3W

140kVAR conectado al CCM 5W

Sección II

100kVAR conectado al PGD

90kVAR conectado al CCM 3W

140kVAR conectado al CCM 5W

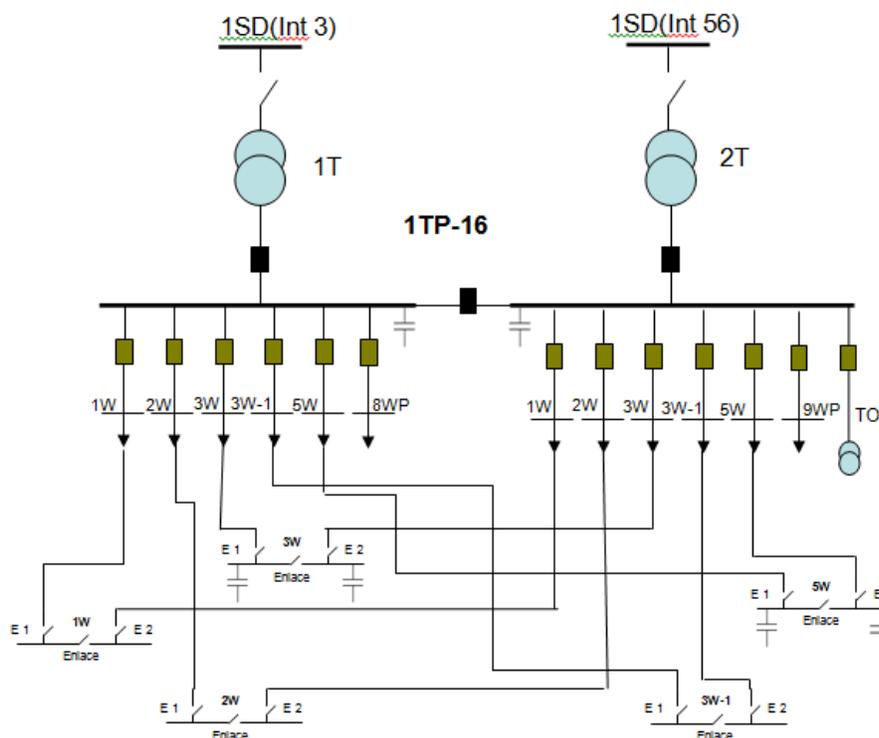


Fig.3.2 Configuración del esquema de suministro para la variante 2.

Simulación de las mejoras en el esquema de suministro de la planta.

La configuración con la que quedaría el esquema de suministro para esta propuesta luego del acomodo de carga y la instalación de los condensadores se puede observar en el Anexo 4. En los mismos se observan los CCM en los que serían conectados los equipos luego del acomodo, así como los bancos de condensadores, los cambios se resaltan en rojo para poder distinguirlos.

El porcentaje de carga de los transformadores, las pérdidas del sistema y el reporte de los generadores luego de las mejoras se puede ver en las tablas 3.6, 3.7 y 3.8 respectivamente. Estos se lograron determinar mediante la simulación de dicha variante en el EasyPower.

Tabla 3.6. Resumen del Reporte de los Generadores

Generator		Scheduled	Limits							Solution
Name	Type	Vpu	kW	kVAR	kVA	Pf	Vpu	Deg	Eq'pu	Deg
SUB 1SD-ARM 56	Sw	1.000	598	204	632	0.946	1.000	0.00	1.003	0.16
SUB 1SD-ARM3	Sw	1.000	605	206	639	0.947	1.000	0.00	1.003	0.16

Tabla 3.7. Resumen de Reporte del Sistema

Total	kW	kVAR	kVA	PF
Generation in System	1203	410	1271	0.947
Load in System	1184	1017	1561	0.758
Shunt Load in System	0	-641		
Losses in System	20	34		
Check of Balance	0	0		

Tabla 3.8. Reporte de Sobrecarga de los Transformadores

Transformer				Load		
Name	From Bus Name	To Bus Name	Load kVA	Rated kVA	Loaded%	OverLoaded%
1T	1SD ARM 3	SECC 1	639	1792	35.7%	-64.3%
2T	1SD ARM 56	SECC 2	632	1792	35.3%	-64.7%

Comparando la tabla 3.7 con la 2.3 se observa una disminución de las pérdidas del sistema de 7 kW, producto a que los condensadores están más cercanos a las cargas donde se produce la corriente reactiva y esta no circula por las líneas del

sistema por tanto el efecto Joule es menor, también se obtienen los beneficios de la variante 1.

Como en esta variante se logra elevar el factor de potencia a 0.95 al igual que en la variante 1 los beneficios obtenidos son iguales, por tanto, los resultados de liberación de potencia, corriente y pérdidas en los transformadores son los mismos para ambas variantes.

Cálculo de pérdidas por efecto Joule.

La simulación de las mejoras mostró una reducción de 7 kWh de energía consumida con respecto al esquema actual de la planta. Conocemos por cálculo que las pérdidas en los transformadores se reducen a 3.94 kWh, por lo tanto la diferencia entre la energía total que se ahorra en el sistema y la de los transformadores nos da la reducción de la pérdidas Joule, según expresión 3.1.

$$\Delta E_a = 3.06 \cdot 8760 = 26\ 805.6 \text{ kWh/año}$$

3.5. Análisis Económico.

La instalación de los bancos de condensadores es uno de los métodos más utilizados en la industria, pues compensa el consumo de la potencia reactiva, disminuye el consumo de energía por concepto de pérdidas en los consumidores, transformadores; con el consiguiente ahorro de energía para la industria.

El análisis realizado en el trabajo es sobre la base de la posible instalación de bancos de condensadores para compensar el consumo de potencia reactiva y mejorar el factor de potencia y así reducir las pérdidas existentes en la planta.

Gastos de adquisición

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.

Tabla 3.9: Representación de los costos de adquisición de la variante 1.

Descripción	Potencia (kVAr)	Cantidad	Costo (CUC)
Banco de condensadores	330	2	19662
Regulador.		2	420
Flete Marítimo (USD)			2152.8
Seguro (USD)			215.6
Costo total de adquisición (USD)			22450.4

Tabla 3.10: Representación de los costos de adquisición de la variante 2.

Descripción	Potencia (kVAr)	Cantidad	Costo (CUC)
Banco de condensadores	100	2	6438
	90	2	5046
	140	2	9048
Regulador.		6	1260
Flete Marítimo (USD)			2152.8
Seguro (USD)			215.6
Costo total de adquisición (USD)			24160.4

Si asumimos que la empresa paga 0.35 CUC por kWh promediando las tarifas del SEN y la de generación en la empresa. Entonces se puede determinar el ahorro anual por concepto de la compensación teniendo en cuenta las pérdidas

$$\text{Ahorro / año} = \text{costo de la energía} * \text{energía ahorrada} \quad (3.2)$$

Ahorro / año = 15 330 CUC para la variante 1

Ahorro / año = 21 462 CUC para la variante 2

Amortización de las variantes propuestas.

Realizaremos el cálculo de la amortización por cada una de las mejoras propuestas. Las propuestas realizadas para mejorar la distribución no requieren de inversión, la

compensación de reactivo se amortizara a través de la energía ahorrada por este concepto.

$$T_{\text{Años}} = \frac{\text{Costo total de la inversión}}{\text{Ahorro/Año}} \quad (3.3)$$

$T_{\text{años}} = 1.46$ Años para la variante 1.

$T_{\text{años}} = 1.12$ Años para la variante 2.

CONCLUSIONES

Al término de nuestro trabajo arribamos a las siguientes conclusiones:

1. El consumo de potencia reactiva de la instalación representa el 64% del consumo de potencia aparente, lo cual deteriora el indicador factor de potencia hasta un promedio de 0,76 provocado por los motores asincrónicos en régimen subcargado.
2. Se mejoró la eficiencia energética en el uso de la energía eléctrica, el sistema eléctrico es más operativo y flexible, a partir de la disminución en las pérdidas de energía en los transformadores y líneas; con una adecuada compensación de la potencia reactiva.
3. Con el empleo de la variante I se obtienen ahorros en un año de 15 330 CUC, por lo que las inversiones a realizar se amortizan en un período de 1.46 años. Para la variante II los ahorros son de 21 462 CUC al año, la amortización de la inversión se obtiene en 1.12 años. Por lo que podemos afirmar que desde el punto de vista económico es más factible el empleo de la variante II.

RECOMENDACIONES

Para darle continuidad y extender los resultados logrados se recomienda:

1. Aplicar los resultados obtenidos, en otras plantas de la empresa u otra entidad industrial.
2. Utilizar el presente trabajo como fuente de información y consultas bibliográfica para futuras investigaciones de este campo.
3. Mantener actualizado el diagrama monolineal de la planta en el software EasyPower, en función de los cambios que se ejecuten.

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. Electric General: PQM, Metering Units, instruction manual, Multilin, Inc, 1999.
3. Feodorov, A.A.; Rodriguez L, E. *Suministro eléctrico de empresas industriales*. Editorial Pueblo y Educación.1980.
4. FERNAO PIRES D, GOMES MARTINS A. and HENGELER ANTUNES C.A *"Multiobjective Model for VAR Planning in Radial Distribution Networks Based on Tabu Search"*. IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 20, No. 2, May 2005.
5. HERNANDEZ G. *"Eficiencia en el suministro eléctrico de baja tensión"*. Tesis de Maestría. 2000.
6. Ivanov, Smoloenski, A.V. *Máquinas Eléctricas*. Moscú: Editorial Mir, 1984.
7. Jones, K, M. *Introduction to special section, Static compensatation for AC power systems*. IEEE Proc. No 6. 1981
8. Klein, W. A.; Mallard, S. A.: *Reactive sources a method of evaluating they effectiveness*. IEEE. Trans. No. 5. 1964.
9. Lazarev, S, S. *Fiabilidad en sistemas eléctricos*. Editorial Instituto Energético de Moscú. 1989.
10. MALIUK S. *"Compensación de potencia reactiva en la producción"*. Stgo de Cuba. Edit.Oriente.1980.
11. *Manual de operaciones: Planta de Recuperación de Amoniaco*, Empresa "Cmdte Ernesto Che Guevara", Moa, 2012.
12. Stevenson, W. D; *Análisis de sistemas eléctricos de potencia. La Habana;* Editorial Pueblo y Educación, 1982.

13. VIEGO, P. F; ARMAS, M. A. *Temas Especiales de Sistemas Eléctricos Industriales*. Cienfuegos: Centro de estudios de la Energía y el Medio Ambiente de la Universidad de Cienfuegos “Carlos Rafael Rodríguez”.
14. VIEGO, P. F; Armas, M. A de. *Sistemas Eléctricos Industriales*. Universidad de Cienfuegos: Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente.
15. Yong-jun Zhang and Zhen Ren. *“Optimal Reactive Power Dispatch Considering Costs of Adjusting the Control Devices”*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 20, No. 3. August 2005.

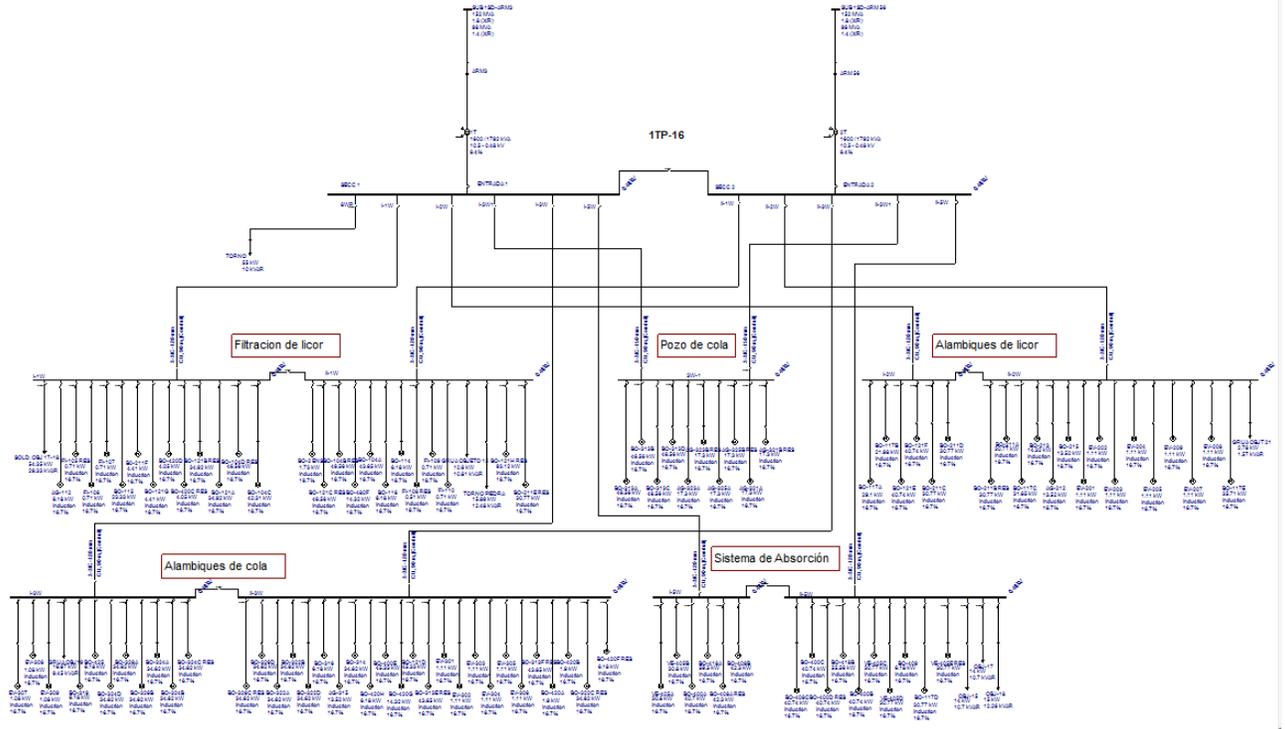
ANEXO 1

Representación de las mediciones del día de mayor demanda de las realizadas al transformador 1.

Ia(A)	Ib(A)	Ic(A)	Ua(V)	Ub(V)	Uc(V)	P(kW)	Q(kVAr)	S(kVA)	F.P	THD	THD	THD	THD	THD	THD
										Ia(%)	Ib(%)	Ic(%)	Van(%)	Vbn(%)	Vcn(%)
767	783	775	251	251	250	478,3	424,18	639,33	0,75	1,48	1,18	1,13	2,30	1,45	1,58
780	797	789	251	251	250	477,8	439,73	649,7	0,73	1,18	1,20	1,30	2,18	1,28	1,33
765	782	774	251	251	250	476,9	424,69	638,65	0,75	1,28	1,40	1,20	2,00	1,45	1,80
767	782	773	251	251	250	477,6	424,35	638,92	0,75	1,13	1,13	1,18	1,88	1,45	1,45
758	774	763	251	251	250	471	421,31	632,02	0,75	1,18	1,20	1,20	1,93	1,55	1,48
766	781	773	251	251	250	476,8	424,33	638,3	0,75	1,25	1,25	1,00	2,08	1,35	1,58
758	773	765	251	251	250	470,6	420,91	631,44	0,75	1,28	1,10	1,40	2,05	1,25	1,78
763	778	767	251	250	250	472,8	423,01	634,5	0,75	1,18	1,30	1,35	2,00	1,53	1,70
765	780	772	251	251	250	476,4	422,62	636,9	0,75	1,20	1,20	1,18	1,93	1,35	1,75
760	776	767	251	251	250	472,2	423,39	634,27	0,75	1,23	1,13	1,30	2,28	1,58	1,55
757	772	763	251	251	250	469,5	421,99	631,35	0,74	1,38	1,15	1,20	2,30	1,58	1,73
756	771	764	251	251	250	468,4	422,39	630,8	0,74	1,33	1,05	1,28	2,08	1,28	1,63
813	830	821	251	251	250	505,2	445,67	673,72	0,75	1,23	1,45	1,28	2,00	1,55	1,45
777	794	782	251	251	250	485,9	425,73	646,53	0,75	1,25	1,20	1,23	1,98	1,45	1,80
830	846	837	251	251	250	518,3	448,88	685,87	0,76	1,08	1,15	1,20	2,68	1,30	1,60
828	844	835	251	251	250	517,4	448,16	684,64	0,76	1,20	1,18	1,35	2,33	1,48	1,65
774	793	781	251	251	250	478,9	432,71	645,51	0,74	1,25	1,28	1,30	2,03	1,55	1,75
838	855	844	251	251	250	519,9	456,28	691,74	0,75	1,20	1,10	1,25	2,38	1,48	1,80
809	827	817	251	251	250	501,5	445,76	671,27	0,75	1,23	1,25	1,63	2,28	1,48	1,58
752	766	758	251	251	250	465,6	420,63	627,63	0,74	1,48	1,10	1,33	1,90	1,25	1,68
752	767	760	252	252	251	465,6	423,02	629,16	0,74	1,25	1,43	1,25	1,85	1,68	1,85
765	783	774	252	251	251	478	425,23	639,92	0,75	1,20	1,33	1,13	1,93	1,45	1,68
829	847	836	251	251	250	518,3	450,23	686,86	0,76	1,38	1,23	1,45	2,20	1,63	1,53
831	849	839	251	251	250	519,8	450,02	687,88	0,76	1,15	1,35	1,35	2,33	1,50	1,75
824	842	830	252	252	251	513,7	449,86	683,08	0,76	1,25	1,18	1,18	1,90	1,45	1,35
831	847	836	251	252	250	520,5	449,35	687,92	0,76	1,25	1,20	1,28	2,35	1,53	1,43
824	841	830	251	252	250	514,2	449,26	683,07	0,75	1,25	1,25	1,25	2,08	1,65	1,53
809	827	815	252	252	251	502,3	446,6	672,81	0,75	1,15	1,35	1,38	2,13	1,45	1,93
826	845	836	252	252	251	517,3	451,32	686,84	0,75	1,18	1,28	1,13	2,50	1,65	1,58

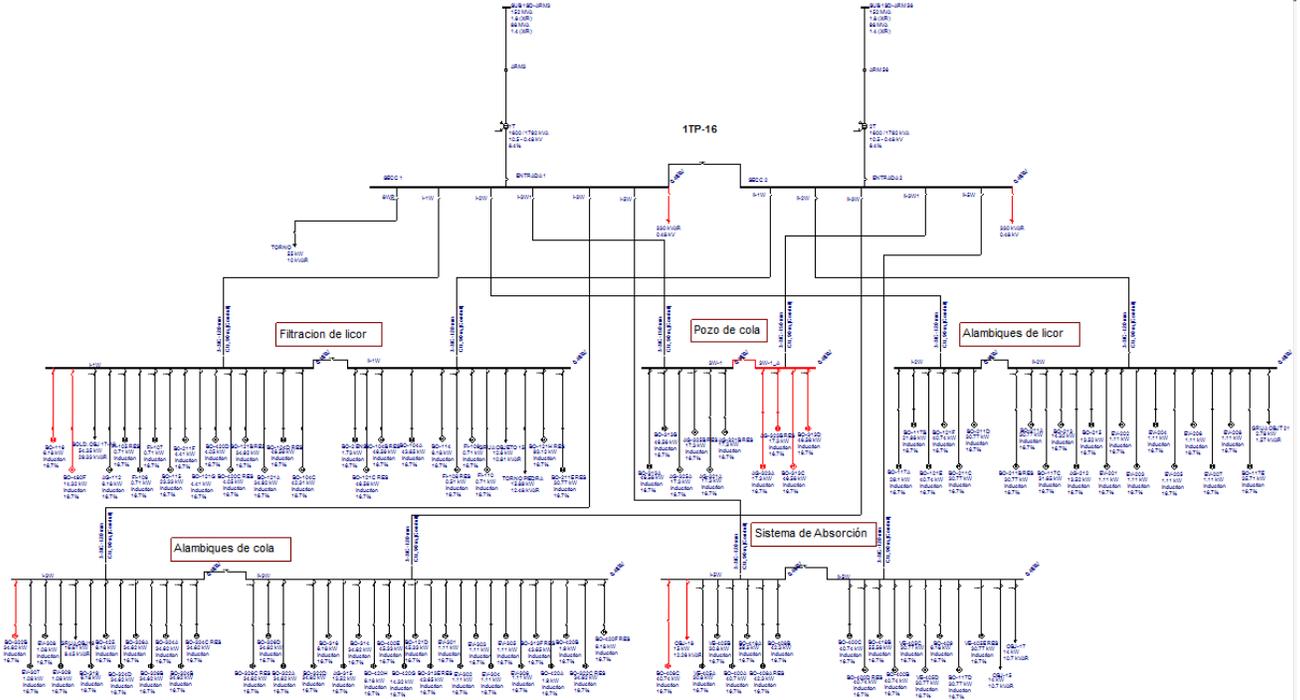
ANEXO 2

Monolineal actualizado en Easy Power.



ANEXO 3

Configuración de la variante 1.



ANEXO 4

Configuración de la variante 2.

