



REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
FACULTAD DE METALURGIA ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Trabajo de Diploma

En opción al Título de

Ingeniero Eléctrico

Título: *Análisis del suministro eléctrico en la subestación 1TP-10
de la planta Hornos de Reducción de la empresa
“Comandante Ernesto Che Guevara”.*

Autor: *Marcos Antonio Guerrero Pérez.*

Tutor: *MSc. Osmany Pérez Aballe.*

Consultante: *Ing. José Reinier Lima Pérez.*

Moa 2014

Año 56 de la Revolución

DECLARACIÓN DEL AUTOR

Yo Marcos Antonio Guerrero Pérez autor del trabajo de diploma "Análisis del Suministro Eléctrico de la planta de hornos de la fábrica 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 todos los fines educativos e investigativos que estime necesarios.

Diplomante

Marcos Antonio Guerrero Pérez

Tutor

Osmany Pérez Aballe

Consultante

José Reinier Lima Pérez



PENSAMIENTO

"Si avanzo, seguidme; si me detengo, empujadme; si retrocedo, matadme"

Che.

AGRADECIMIENTO

Durante en el transcurso de estos seis años en mi vida hubo personas muy importantes como mis padres que siempre me dieron su apoyo incondicional, a mis hermanas, mi novia, mis amigos que fueron las personas que compartieron conmigo ese largo camino, a mis tutores, Osmany y Lima, a este grupo de personas les agradezco su gran apoyo y comprensión.

Gracias.

DEDICATORIA

Les dedico este trabajo a mis padres, mis hermanos, mi novia y toda mi familia, les agradezco a este grupo de personas por haberme apoyado en mis momentos más difíciles y les estaré eternamente agradecido.

Resumen

En el presente trabajo se analiza el suministro eléctrico de la planta Hornos de Reducción en la subestación 1TP-10 de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara con el objetivo de mejorar el rendimiento y disminuir las pérdidas en la planta, aplicando la vía más factible. Se hace referencia a investigaciones realizadas sobre el tema en cuestión, planteando la necesidad e importancia del problema. Se caracteriza la subestación donde se realiza la investigación; la variante propuesta para mejorar el suministro de la planta y la descripción del analizador de redes empleado para registrar las mediciones. Se analiza el comportamiento de las variables eléctricas y se propone una variante para mejorar el suministro de la planta. Al aplicarse el método para mejorar el suministro de la planta se logra un ahorro de \$ 37606.8 USD al año.

Summary

Presently work is observed the necessity to investigate the electric supply of the plant Ovens of Reduction in the substation 1TP-10 of the Company Ernesto Che Guevara with the objective of to improve the yield and to diminish the losses in the plant, applying the most feasible road. Reference is made to investigations carried out on the topic in question, outlining the necessity and importance of the topic. The substation is characterized where he/she is carried out the investigation; the variant proposal to improve the supply of the plant and the analyzers of nets description used to register the mensurations. They are analyzed the behavior of the electric variables and he/she intends a variant to improve the supply of the plant. When being applied the method to improve the supply of the plant a saving it is achieved to \$ 37606.8 USD of the year.

Índice

Resumen	5
Summary	6
Introducción General	10
CAPÍTULO I MARCO TEÓRICO-METODOLÓGICOS DE LA INVESTIGACIÓN	12
1.1 Introducción.	12
1.2 Factor de potencia.	13
1.3 Pérdidas de energía eléctrica en los transformadores.	14
1.4 Método en la utilización para el cálculo de la potencia reactiva.	16
1.4.1 Energía reactiva y sus efectos.	20
1.4.2 Balaceo y Compensación de la potencia reactiva en empresas.	20
1.4.3 Compensadores de Potencia Reactiva.	21
1.5 Elementos de influencia en el balance de la potencia reactiva.	22
1.5.1 Selección de los bancos de condensadores a utilizar para la compensación de potencia reactiva.	23
1.5.2 Diferentes métodos para la compensación de potencia reactiva.	24
1.5.3 Componentes que permiten el funcionamiento correcto de un regulador automático para la compensación de reactivo en sistemas eléctricos industriales.	26
1.5.4 Determinación de la cantidad de condensadores a utilizar.	27
1.5.6 Provechos que brinda la compensación de reactivo.	29
1.5.7 Vías y métodos de reacomodo de cargas.	30
1.5.8 Compensación de potencia reactiva por compensadores sincrónicos.	30
1.5.9 Disminución del consumo de reactivo sin medios compensadores.	31
1.6 Análisis de los trabajos precedentes.	31

1.7 Conclusiones del capítulo.	34
CAPÍTULO II. DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE LA SUBESTACIÓN.	35
2.1 Introducción.	35
2.2 Descripción del flujo tecnológico de la UBP Horno de Reducción.	36
2.3 Descripción del sistema eléctrico de la planta Hornos de Reducción.	37
2.4 Caracterización de la subestación 1TP-10.	38
2.4.1 Descripción del CCM de la línea 9.	39
2.4.2 Descripción del CCM de la línea 10.	39
2.4.3 Descripción del CCM de la línea 11.	40
2.4.4 Descripción del CCM de la línea 12.	41
2.5 Grupos de cargas consumidoras de energía reactiva inductiva en la subestación 1TP-10.	43
2.6 Vías y métodos para el cálculo de reactivo necesario para corregir el factor de potencia.	43
2.7 Métodos utilizados por los analizadores de redes para los registros.	45
2.8 Características del analizador de redes utilizado.	46
2.9 Gráficos de cargas eléctricas.	47
2.10 Conclusiones del capítulo.	50
CAPÍTULO III MEJORAS EN EL SUMINISTRO ELÉCTRICO DE LA SUBESTACIÓN 1TP-10.	51
3.1 Introducción.	51
3.2 Mejoras del factor de potencia en el esquema de la subestación 1TP-10.	52
3.2.1 Cálculo de la potencia necesaria para corregir el factor de potencia.	53
3.3 Variante propuesta para la compensación de reactivo.	54
3.4 Ubicación para instalar los condensadores.	55

3.5 Selección de los equipos de compensación.	55
3.6 Mejoras del sistema de suministro asociada a la compensación de reactivo.	56
3.7 Cálculo de las pérdidas de los transformadores.	57
3.8 Análisis económico.	59
3.9 Conclusiones del capítulo.	61
CONCLUSIONES GENERALES	62
RECOMENDACIONES	63
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64
ANEXOS	66

Introducción General

A nivel mundial, los países del mundo tratan de cubrir sus necesidades de energía eléctrica a base de recursos naturales. La energía eléctrica es fundamental para el desarrollo industrial. Por los años setenta los recursos energéticos fue de pura necesidad reconocida por el mundo.

Gracias a la evolución tecnológica, se ha proporcionado tiempo suficiente para investigar. El mundo seguirá siendo vulnerable mientras tanto a la disminución en el suministro de petróleo que después de la II Guerra Mundial se convirtió en la fuente principal de energía. La dependencia de los recursos fósiles es general en el mundo actual.

Cuba, al igual que la mayor parte de los países insulares, careciendo de recursos energéticos satisface la mayor parte de las necesidades, para la transformación, el transporte y en menor medida para la producción de electricidad con la importación de recursos fósiles. Esta dependencia de los combustibles fósiles es general en el mundo contemporáneo. Aun cuando se alcancen altos niveles de participación de las fuentes nacionales de energía en el balance energético nacional, los combustibles convencionales (gas y petróleo) mantendrán su aporte determinante dentro del contexto nacional y seguirá la dependencia de combustibles importados para determinados sectores. 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 para el país la formación de una cultura general en la población que favorezca, unido al incremento de la eficiencia energética y del uso de las fuentes renovables de energía, la sostenibilidad del crecimiento del país. La compensación de potencia reactiva juega un papel importante en la planificación y explotación de los sistemas eléctricos industriales. Su objetivo principal consiste en proporcionar una colocación apropiada de los dispositivos compensadores. Trayendo consigo una mejora del factor de potencia en los sistemas eléctricos, provocando así de esta manera beneficios en el funcionamiento de las máquinas y disminución de las pérdidas, lo que se traduce en una mejoría de la disponibilidad y eficiencia del sistema.

Situación problemática:

La empresa "Comandante Ernesto Che Guevara" presenta instalaciones con pérdidas eléctricas en los controles realizados por baja eficiencia energética, como la subestación 1TP-10 en la planta Hornos de Reducción, causado por la existencia de motores y transformadores subcargados, provocando pérdidas de energía para la empresa.

Problema:

Desconocimiento del comportamiento energético de la red de baja tensión alimentada desde la subestación 1TP-10 en la planta Hornos de Reducción en la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara".

Hipótesis del trabajo:

Si se conocen el conjunto de causas que influyen en las pérdidas de energía eléctrica, así como la interrelación funcional y de consumo en la subestación 1TP-10 de la planta Hornos de Reducción en la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara", se podrá obtener el ahorro del portador energético.

Objetivo general:

Mejorar la eficiencia energética en la subestación 1TP-10 de la planta Hornos de Reducción en la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara".

Objetivos específicos:

1. Caracterizar el sistema de suministro eléctrico de la planta.
2. Caracterizar las cargas de la subestación 1TP-10 y seleccionar la mejor variante desde el punto de vista técnico-económico para la compensación del factor de potencia.
3. Proponer medidas que contribuyan al mejoramiento de la eficiencia en el uso de los parámetros eléctricos de la instalación

Campo de acción:

- Eficiencia energética

Objeto de estudio:

- Subestación 1TP10

CAPÍTULO I MARCO TEÓRICO-METODOLÓGICOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Introducción.

1.2 Fundamentos Teóricos de la Investigación.

1.3 Pérdidas de energía eléctrica en los transformadores.

1.4 Método en la utilización para el cálculo de la potencia reactiva.

1.5 Elementos de influencia en el balance de la potencia reactiva.

1.6 Análisis de los Trabajos Precedentes.

1.7 Conclusiones del capítulo.

1.1 Introducción.

En la actualidad los planes de la economía a nivel mundial precisan de un incremento incesante de la producción de energía eléctrica, lo que permite el equipamiento de diferentes ramas de la industria en la utilización de electricidad. Nosotros particularmente por nuestras condiciones geonaturales, no somos capaces de suministrar energía hidroeléctrica, por no contar con cuencas hidráulicas potentes y las reservas de petróleo son insuficientes y su costos internacional extremadamente caro. Para que la industria energética satisfaga nuestras necesidades energéticas con nuestros recursos naturales, por lo que es de suma importancia de su uso racional y eficiente y se convierte en una obligación, para nuestra economía la aplicación de todas las técnicas existentes que conlleven a su ahorro. [7]

En esta situación la racional y económica de la utilización de la energía eléctrica se ha convertido en una tarea suficientemente importante, no solo para las industrias, sino que para todos los que están relacionados con el consumo eléctrico.

Además se incrementan continuamente los costos de las industrias en sus operaciones, balancear la potencia reactiva juega un papel en la explotación de los sistemas eléctricos industriales y en su planificación. Su principal objetivo es proporcionar una

apropiada colocación de los dispositivos compensadores u otra variante factible económicamente y segura, y de esta manera una mejora del factor de potencia en los sistemas eléctricos. [6]

Al ejecutar una operación con bajo factor de potencia, una instalación eléctrica, aparte del pago de electricidad, también posee otras implicaciones de mayor o igual significación, como es la relación con la capacidad de los equipos de transformación y distribución de la energía eléctrica, y con el uso eficiente de aparatos y maquinas que funcionan con dicha energía. [13]

El hombre conociendo a actualidad los descubrimientos de la energía eléctrica, tiene grandes posibilidades de economizarla, no solo en los consumidores domésticos, sino también en todas las industrias, sobre todo las que utilizan motores asincrónicos con bajo factor de potencia. En estos casos, el aumento racional del factor de potencia es un escalón serio en la solución de los problemas generales de la economía de la electricidad.

Las cargas industriales son en su mayoría inductivas, siendo el origen del bajo factor de potencia. Su análisis es permanente y de obligada importancia para toda actividad que se relaciona con el ahorro y operación eficiente de las instalaciones eléctricas industriales. [13]

Este trabajo de diploma tiene como objetivo realizar un análisis y síntesis de los trabajos relacionados con la mejora del factor de potencia, las generalidades de la energía reactiva y la solución para el mejoramiento, su influencia en los índices técnico-económicos del trabajo de la unidad de producción, los métodos de medición y las formas racionales de aumentar este factor, como una de las vías eficientes para economizar energía eléctrica y ayudar en consideración a la protección del medio ambiente para no comprometer el crecimiento futuro del país.

1.2 Factor de potencia.

¿Qué es el factor de potencia de una instalación?

El factor de potencia en general es un tema muy importante para las industrias. Se puede definir como la relación entre la potencia activa (kW) y la potencia aparente (kVA) y es indicativo de la eficiencia con que se está utilizando la energía eléctrica para

producir un trabajo útil. Un bajo factor de potencia (varía entre 0 y 1) limita la capacidad de los equipos y los arriesga a sobrecargas peligrosas y pérdidas excesivas de energía. [8]

Adicionalmente provoca recargos en la cuenta de energía eléctrica, los cuales llegan a ser significativos cuando el factor de potencia es reducido. El origen del bajo factor de potencia son las cargas de naturaleza inductiva, principalmente motores de inducción. El primer paso en la corrección de un problema de factor de potencia es prevenirlos mediante la selección y operación correcta de los equipos. Los sistemas de compensación de reactivos (condensadores principalmente) son una forma práctica y económica de mejorar el factor de potencia. Tradicionalmente siempre el factor de potencia se ha denominado "coseno de φ " ($\cos \varphi$) dado que trigonométricamente coincide con el coseno del ángulo que forman ambos vectores de potencia ¿cuáles?, siendo φ el ángulo de desfase entre tensión y corriente. Así pues el factor de potencia se puede definir brevemente como un "indicador del correcto aprovechamiento de la energía eléctrica. La potencia reactiva, la cual no produce un trabajo físico directo en los equipos, es necesaria para producir el flujo electromagnético que pone en funcionamiento elementos tales como: motores, transformadores y otros equipos de refrigeración. Cuando la cantidad de estos equipos es apreciable los requerimientos de potencia reactiva también se hacen significativos, lo cual produce una disminución exagerada del factor de potencia. [7]

1.3 Pérdidas de energía eléctrica en los transformadores.

Las pérdidas que ocurren en los transformadores están dadas fundamentalmente por las pérdidas activas (P) y reactivas (Q). Las pérdidas activas están dadas, cuando el transformador está con carga, por las pérdidas en el cobre, por el calentamiento de los enrollados y cuando el transformador está trabajando en vacío. Las pérdidas reactivas del transformador están dadas, cuando está con carga, por la dispersión del flujo magnético y cuando está trabajando en vacío. [6]

Para determinar estas pérdidas se utiliza la siguiente metodología de cálculo.

El consumo de energía eléctrica, por concepto de pérdidas, de un transformador durante un tiempo dado será:

$$\Delta E_a = \Delta PT \text{ (kW)} \quad (1.16)$$

Dónde:

$\Delta P'_t$: pérdidas activas referidas totales del transformador; (kW)

T: tiempo de trabajo de los transformadores; (horas)

Las pérdidas activas referidas totales se calculan por la siguiente expresión:

$$\Delta P'_t = \Delta P'_{sc} + K^2 \Delta P_{cc} \text{ (kW)} \quad (1.17)$$

$$\Delta P'_{sc} = \Delta P_{sc} + \Delta Q_{sc} \text{ (kW)} \quad (1.18)$$

Dónde:

$\Delta P'_{cc}$: pérdida referida de cortocircuito; (kW)

K_c : coeficiente de carga

S_c : carga real del transformador; (kVA)

La potencia reactiva demandada por el transformador se calcula de la siguiente forma:

$$\Delta Q_{sc} = S_N \frac{I_{sc}}{100} \text{ (kVAr)} \quad (1.19)$$

Dónde:

ΔQ_{sc} : potencia reactiva demandada por el transformador sin carga

I_{sc} : corriente del transformador sin carga

U_{cc} : voltaje de cortocircuito del transformador; (%)

Este cálculo de las pérdidas en los transformadores se realiza con ayuda de catálogos y los datos nominales como:

- ✓ Tipo de transformador, conexión.
- ✓ Potencia nominal del transformador en kVA.
- ✓ Tensión nominal en el primario.
- ✓ Tensión en el secundario.
- ✓ Tensión en cortocircuito.

- ✓ Potencia en vacío.

Debemos de referirnos qué es potencia reactiva y los efectos que ocasionan dicha potencia antes de analizar primeramente el tema de compensación de potencia reactiva.

Esta potencia reactiva ha sido tradicionalmente suministrada por las empresas de electricidad, aunque puede ser suministrada por las propias industrias. Al ser suministrada por las empresas de electricidad deberá ser producida y transportada por las redes, ocasionando necesidades de inversión en capacidades mayores de los equipos y redes de transporte. Se caracterizan porque la intensidad que demandan, está desfasada (90°) con respecto a la tensión de alimentación. Un ejemplo típico de esto son los condensadores que almacenan durante un intervalo de tiempo energía en forma de campo magnético, que posteriormente es devuelta a la red. Esta energía circulante no es aprovechable para la obtención de trabajo útil. La intensidad que demanda este tipo de elementos es la llamada intensidad reactiva, y la potencia asociada a esta intensidad es la potencia reactiva (Q). Generalmente las cargas no son puramente resistivas, ni reactivas, por lo tanto, la corriente que demandan tendrá una componente activa y otra reactiva, y lo mismo ocurrirá con las potencias. Por lo tanto la relación entre la potencia activa y la aparente demandada por una determinada carga es lo que se define como factor de potencia, permitiéndonos identificar los aparatos cuyo consumo de reactiva es más o menos importante. Un buen factor de potencia es 1, que implicara que no hay consumo de potencia reactiva. Un factor de potencia malo es generalmente inferior a 0.90 e implicará un consumo importante de reactivo. Cuando la intensidad demandada por la carga está atrasada con respecto a la tensión se dice que esta tiene carácter inductivo (FP inductivo), mientras que si está adelantada se dice que tiene carácter capacitivo (FP capacitivo). Normalmente, la potencia activa es expresada en kilowatt (kW), la potencia reactiva en Kilovatios amperios reactivos (kVAr) y la potencia aparente en Kilovatios amperios (kVA). [5]

1.4 Método en la utilización para el cálculo de la potencia reactiva.

Utilizando la relación existente en el triángulo de potencia [13]

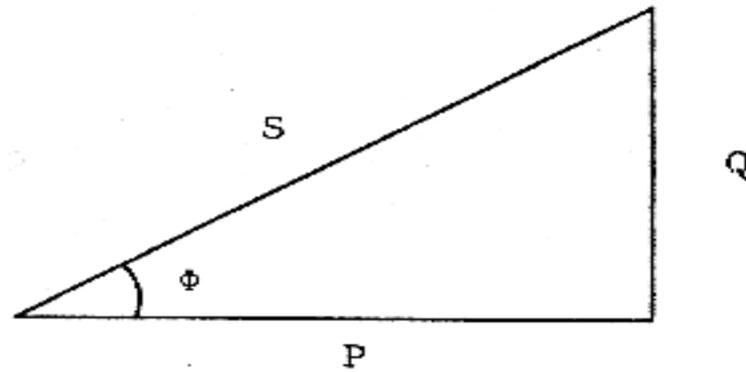


Figura 1.1. Triángulo de potencia.

Dónde:

P: Potencia activa (kW).

Q: Potencia reactiva (kVAr).

S: Potencia aparente (kVA).

φ : Factor de potencia.

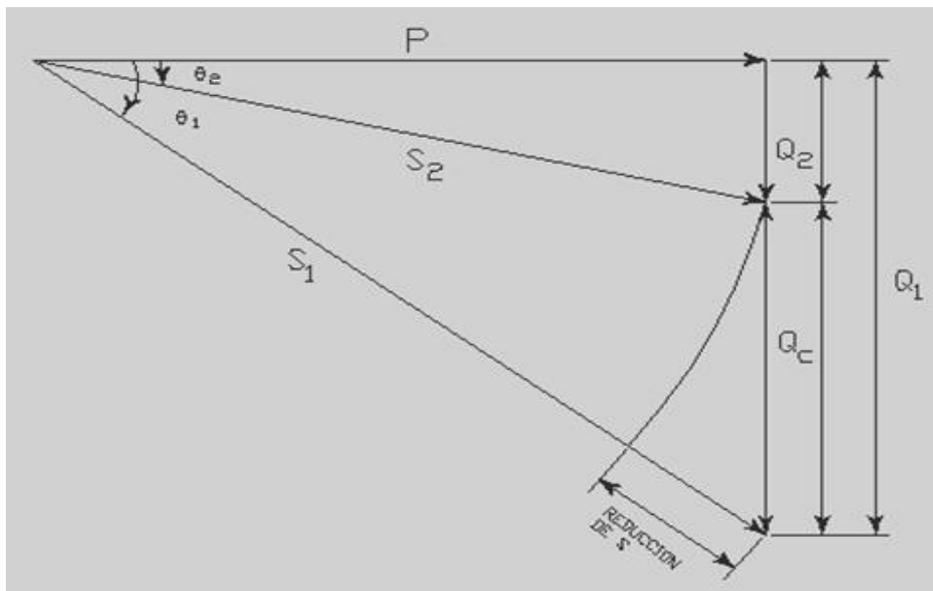


Figura 1.2. Triángulo de potencia del factor de potencia.

S_1 = Potencia aparente antes de la corrección del factor de potencia.

S_2 = Potencia aparente después de la corrección del factor de potencia.

P = potencia activa.

Q_1 = Potencia reactiva inductiva antes de la corrección del factor de potencia.

Q_2 = Potencia reactiva inductiva después de la corrección del factor de potencia.

$Q_C = Q_1 - Q_2$ = compensación de potencia reactiva por medio de capacitores.

φ_1 = ángulo de fase antes de la corrección del factor de potencia.

φ_2 = ángulo de fase después de la corrección del factor de potencia.

De la figura 1.1 se obtienen las siguientes relaciones:

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} \quad (1.1)$$

$$\tan\varphi = \frac{Q}{P} \quad (1.2)$$

$$\sin\varphi = \frac{Q}{S} \quad (1.3)$$

Como la potencia activa se mantiene constante en expresión 1.2.

$$Q = P \cdot \tan\varphi \quad (1.4)$$

De donde se obtiene que:

$$Q = P \cdot \tan\varphi_1 \text{ (coeficiente medio)}. \quad (1.5)$$

$$Q = P \cdot \tan\varphi_2 \text{ (coeficiente normativo)}. \quad (1.6)$$

La potencia reactiva requerida para mejorar el factor de potencia:

$$Q = P (\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2) \quad (1.7)$$

Por lo tanto capacidad liberada se nombra al valor de potencia que se encuentra en el sistema pero no es utilizado.

Al mejorar el factor de potencia, podemos sumarle cargas en el sistema, puesto que con la compensación del factor de potencia se libera capacidad en el sistema. Una de las formas que se utiliza para calcular la capacidad liberada es utilizando las expresiones que a continuación se relacionan. [2]

$$P_1 = S_1 \cdot \cos\varphi_1 \quad (1.8)$$

$$P_2 = S_2 \cdot \cos\varphi_2 \quad (1.9)$$

Combinando ambas ecuaciones

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

Despejando S_2 de la ecuación 1.10.

$$S_2 = S_1 \frac{\cos \varphi_1}{\cos \varphi_2} \quad (1.11)$$

Dónde:

S_1 : potencia aparente instalada.

S_2 : potencia aparente después de la compensación.

$\cos \varphi_1$: antes de la mejora.

$\cos \varphi_2$: después de la mejora.

De la diferencia entre estas dos potencias se obtiene la liberada.

Corrientes antes y después de la mejora del factor de potencia.

$$P = \sqrt{3} U \cdot I \cos \varphi \quad (1.12)$$

Dónde:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} * U * \cos \varphi} \quad (1.13)$$

Potencia activa liberada después de la compensación.

$$P_L = P_1 \left(\frac{\cos \varphi_1}{\cos \varphi_2} \right) \quad (1.14)$$

Incremento de voltaje a causa de la compensación.

Cuando se conectan un banco de condensadores en la carga ocurre una elevación de voltaje en el secundario del transformador.

$$\Delta U \% = \frac{kVAr}{kVA_n} * X \% \quad (1.15)$$

Generalmente, la elevación de voltaje que los condensadores producen en las industrias, oscila entre 1% y 5%, de acuerdo con los valores más usuales de reactancia en tanto por ciento, capacidad nominal y capacidad en kVAr.

1.4.1 Energía reactiva y sus efectos.

Las redes eléctricas están organizadas de forma que la generación de energía eléctrica está concentrada en determinados puntos, mientras que el consumo está disperso geográficamente. Esto implica la necesidad de transportar energía activa a grandes distancias. Ahora bien, en los consumidores, y en las propias líneas de transporte, se consume o genera energía reactiva que también hay que transportar. Esto presenta una serie de inconvenientes entre los que podemos mencionar: mayores caídas de tensión, mayores pérdidas por efecto joule y menor capacidad para transportar potencia activa.

La energía reactiva puede jugar un papel importante en diferentes aspectos dinámicos, como pueden ser los cambios de voltajes repentinos por las variaciones bruscas de la carga. Desde el punto de vista del cliente de una empresa eléctrica esto repercute en la calidad del servicio, y en las tarifas que se le aplican, ya que la empresa penaliza la demanda de energía reactiva por las razones ya comentadas anteriormente. [4]

1.4.2 Balaceo y Compensación de la potencia reactiva en empresas.

El balanceo y 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 varios métodos para el diseño de compensación de potencia reactiva, pero en todos ellos la finalidad es la selección y ubicación en la red de los condensadores. Estos beneficios generalmente se cuantifican mediante la evaluación de los ahorros netos derivados de la reducción de pérdidas de energía, pero también pudieran incluir el beneficio de la empresa por el mejoramiento de la calidad del servicio, al no incurrir en penalizaciones derivadas de las violaciones a eventuales regulaciones relacionadas con el asunto. Por sus características, la selección y ubicación de condensadores es un obstáculo que admite innumerables soluciones posibles para un caso dado, y cada metodología trata de obtener la solución más eficiente.

Son tres los objetivos básicos que se pretenden con la compensación reactiva en la carga: corrección del factor de potencia, 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.

Esta mejora es realizada debido a que un bajo factor de potencia puede producir efectos en la reducción de voltajes en la planta cuando los kVAr son exigidos del sistema de distribución. Cuando el factor de potencia decrece, la corriente total del línea se incrementa (mayormente corriente reactiva) causando grandes caídas de voltaje a través de la impedancia de línea. Esto se debe a que la caída de voltaje en una línea es igual a la corriente que fluya multiplicada por la impedancia de la línea. Para mayores corrientes mayor será la caída de voltaje, produciendo un impacto perjudicial en el pago de electricidad, teniendo otras implicaciones de igual o mayor significación, particularmente en relación con la capacidad de los equipos de transformación y distribución de la energía eléctrica y con el uso eficiente de las máquinas y aparatos que funcionan con electricidad. Sin embargo, su análisis es un problema permanente y de obligada importancia para todos aquellos cuya actividad se relaciona con la operación eficiente de las instalaciones eléctricas industriales y el ahorro de energía.

1.4.3 Compensadores de Potencia Reactiva.

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

- 1) Bancos de condensadores.
- 2) Condensadores sincrónicos (motores sincrónicos sobreexcitados).
- 3) 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. [8]

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 sobre compensación en el sistema eléctrico.

1.5 Elementos de influencia en el balance de la 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.

1.5.1 Selección 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, ya que en períodos de carga reducida, la potencia reactiva capacitiva puede superar la de la carga y la empresa industrial se convierte en un generador de potencia reactiva al sistema. En estas condiciones, puede aparecer sobrevoltaje en algunos puntos del sistema de distribución industrial e incluso incrementarse las pérdidas por la transferencia en sentido inverso de esta potencia reactiva [8]. 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 voltaje.
- 2) Controlados por factor de potencia.
- 3) Controlados por tiempo.
- 4) Controlados por corriente.

Control por voltaje

El control por voltaje puede emplearse cuando el voltaje en el punto de conexión del condensador se reduce ante un incremento de la carga. Requiere una señal de voltaje y tiene la ventaja de evitar cualquier tipo de sobrevoltaje, debido a los condensadores, sin seguir el ciclo primordialmente de carga reactiva

Control por factor de potencia

El control por factor de potencia es uno de los más empleados en la actualidad en los centros de distribución de baja tensión de las industrias e instalaciones de servicios, basándose en obtener señales de voltaje y de corrientes de la red que permiten determinar el factor de potencia y por lo tanto controlar este parámetro a un valor prefijado.

Control por corriente

Se utiliza cuando la variación de voltaje con el incremento de la carga es muy baja para utilizar un control por voltaje. 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 censor debe medir la corriente en el lado de la carga.

Control por tiempo.

Este es el tipo de control más barato y sencillo. Normalmente es un control on/off que se programa para que todos los días conecte el banco solo en el periodo de tiempo en que resulte más necesario el reactivo, evitando la sobre compensación en el resto del día.

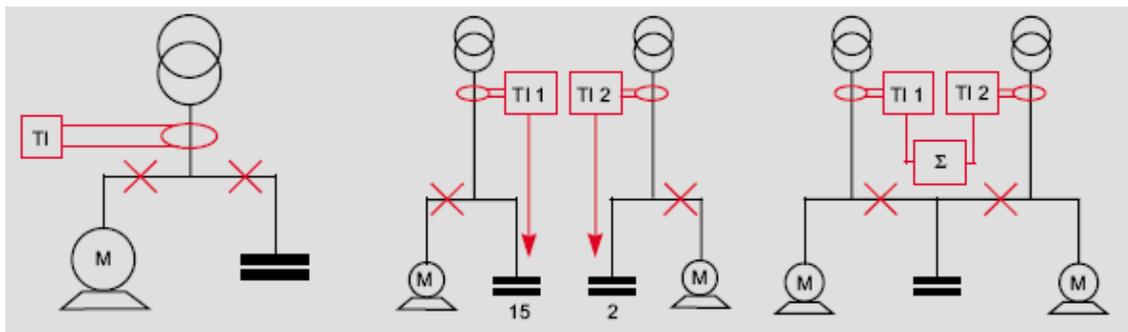


Figura 1.3 Conexión de los transformadores para el control del factor de potencia.

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.

1.5.2 Diferentes métodos para la compensación de potencia reactiva.

Compensación global.

Ventajas:

- ✓ Suprime las penalizaciones por un consumo excesivo de energía reactiva.
- ✓ Ajusta la potencia aparente 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.

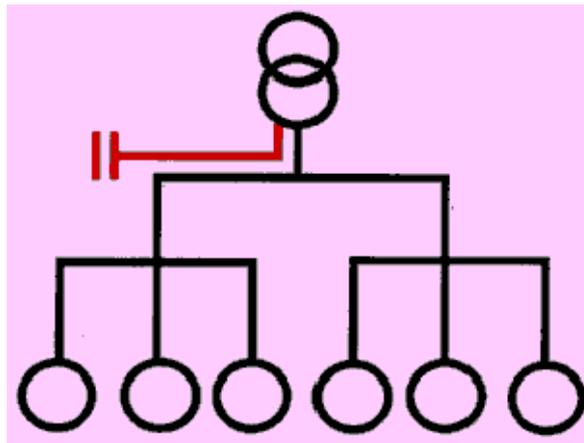


Figura 1.4 Compensación global.

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).

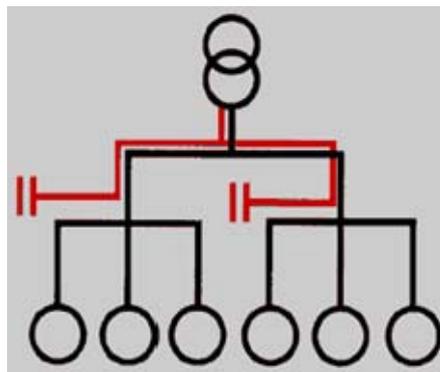


Figura 1.5 Compensación parcial.

1.5.3 Componentes que permiten el funcionamiento correcto de un regulador automático para la compensación de reactivo en sistemas eléctricos industriales.

Los elementos internos:

Un equipo de compensación automático debe ser capaz de adecuarse a las variaciones de potencia reactiva de la instalación para conseguir mantener el $\cos \varphi$ objetivo de la instalación. Un equipo de compensación automático está constituido por 3 elementos principales:

El regulador:

Cuya función es medir el $\cos \varphi$ de la instalación y dar las órdenes a los contactores para intentar aproximarse lo más posible al $\cos \varphi$ objetivo, conectando los distintos escalones de potencia reactiva. Además de esta función, los actuales reguladores incorporan funciones complementarias de ayuda al mantenimiento y la instalación.

Los contactores:

Son los elementos encargados de conectar los distintos condensadores que configuran la batería. El número de escalones que es posible disponer en un equipo de compensación automático depende de las salidas que tenga el regulador.

Los condensadores:

Son los elementos que aportan la energía reactiva a la instalación. Normalmente la conexión interna de los mismos está hecha en delta.

Los elementos externos.

Para el funcionamiento de un equipo de compensación automático es necesaria la toma de datos de la instalación; son los elementos externos que le permiten actuar correctamente al equipo:

La lectura de intensidad:

Se debe conectar un transformador de intensidad que lea el consumo de la totalidad de la instalación.

La lectura de tensión: Normalmente se incorpora en la propia batería de manera que al efectuar la conexión de potencia de la misma ya se obtiene este valor. Esta información de la instalación (tensión e intensidad) le permite al regulador efectuar el cálculo del factor de potencia existente en la instalación en todo momento y le capacita para tomar la decisión de introducir o sacar escalones de potencia. [2]

1.5.4 Determinación de la cantidad de condensadores a utilizar.

Para la determinación de la cantidad de condensadores que deben ser utilizados en la compensación se pueden tomar diferentes vías entre las que se pueden mencionar la medición de la energía activa y reactiva en instalaciones ya existentes, se puede calcular la potencia necesaria del condensador para obtener el factor de potencia deseado. También se pueden conectar durante cierto tiempo registradores de la potencia activa y reactiva para obtener información sobre el consumo de energía reactiva. Si se desea alcanzar un valor determinado del factor de potencia, en una instalación cuyo factor de potencia existente es muy bajo, se determina este con ayuda de un contador de energía activa, un amperímetro y un voltímetro. Existen diferentes métodos para realizar estas mediciones. [7]

Cuando se van a realizar estudios del factor de potencia, es imprescindible contar con suficiente cantidad de datos, o en su defecto tomarlos en las instalaciones. Si el estudio es solo para propósitos de disminución de la tarifa, es suficiente con la información de su factura para determinar los kVAr requeridos.

Por lo general se recomienda realizar registros trifásicos donde se monitoree cada fase y el total de la planta: Potencia Activa (kW) y Reactiva (kVAr), Voltaje y Energía (kWh). Los valores de corriente, potencia aparente (kVA) y factor de potencia (FP) se calcula a partir de las lecturas anteriores, sin embargo, si el registrador dispone de la suficiente capacidad podrán ser leídos también. Los intervalos de medición recomendados oscilan entre cada 5 y cada 15 minutos como máximo. A menores intervalos de medición, tendremos mayor exactitud en la medición, sin embargo esto dependerá de la capacidad del registrador que se utilice y del tipo de empresa a registrar. Aquellas empresas donde sus ciclos de carga varían 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 de instalar sin el riesgo de caer en sobre compensación reactiva. También es importante, registrar con las mediciones, el grado de distorsión armónica existente; con el objetivo de evitar la posibilidad de resonancia entre estos y los bancos de condensadores a instalar. [10]

1.5.5 Efectos que provocan un bajo factor de potencia en la distribución.

La potencia reactiva, la cual no produce un trabajo físico directo en los equipos, es necesaria para producir el flujo electromagnético que pone en funcionamiento elementos tales como: motores, transformadores, lámparas fluorescentes, equipos de refrigeración y otros similares. Cuando la cantidad de estos equipos es apreciable los requerimientos de potencia reactiva también se hacen significativos, lo cual produce una disminución exagerada del factor de potencia. Un alto consumo de energía reactiva puede producirse como consecuencia principalmente de:

- ✓ Un gran número de motores.
- ✓ Presencia de equipos de refrigeración y aire acondicionado.
- ✓ Subutilización de la capacidad instalada en equipos electromecánicos, por mala planificación y operación del sistema eléctrico de distribución.
- ✓ Mal estado físico de la red eléctrica y de los equipos de la industria.

Cargas puramente resistivas, tales como alumbrado incandescente, resistencias de calentamiento, etc. no causan este tipo de problema ya que no son consumidores de reactivo.

Sin embargo, podemos comprobar la presencia de armónicos en las redes, éstos también suponen pérdidas en las mismas, las cuales contribuyen a elevar más aún la energía aparente necesaria.

La potencia aparente es de mayor dimensión que la original debida únicamente a las pérdidas puramente inductivas. Esto nos lleva, por tanto, a las siguientes conclusiones:

- ✓ El único concepto de factor de potencia, como tal, que debemos manejar es el del cociente P/S. Es un parámetro que nos da una idea de la proporción de energía generada que es transformada en trabajo útil. Dicho de otro modo, nos indica el nivel de pérdidas que tenemos en la instalación. Estas pérdidas engloban, como

acabamos de decir, tanto a las pérdidas puramente inductivas debido a las corrientes de sincronismo de motores, etc., como a las corrientes armónicas de nuestra instalación.

- ✓ Un bajo factor de potencia es, por tanto, el resultado de un alto contenido de cargas inductivas como de cargas no lineales, consumidoras de corrientes no sinusoidales.
- ✓ El factor de potencia representa las pérdidas de carácter puramente inductivo dentro de la instalación, a las cuales debemos añadir (en muy menor proporción) las pérdidas a frecuencias armónicas.
- ✓ El factor de potencia nunca puede ser >1 , siendo ésta la situación óptima.
- ✓ Los analizadores de redes de última generación muestran ambos valores cuando se monitorean en línea los parámetros de potencia.

1.5.6 Provechos 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 proporcionan 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 la empresa.
- ✓ 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 Vías y métodos de reacomodo de cargas.

El método consiste en una mejor distribución de las cargas en los motores o sea eliminar el uso de motores asíncronos y transformadores con carga incompleta y el trabajo al vacío de los equipos. Por eso consideramos necesaria la correcta selección de los motores, los transformadores, conductores, etc. En lugares donde ya hay equipamiento instalado y en operación este método se aplica redistribuyendo las cargas, de manera que queden combinadas en una misma subestación equipos consumidores y generadores de reactivo, circulando este último entre ellos y teniendo un correcto control del voltaje en las barras. [11]

1.5.8 Compensación de potencia reactiva por compensadores sincrónicos.

Los compensadores sincrónicos son motores sincrónicos de construcción aligerada, sin carga en el eje, que pueden trabajar tanto en régimen de generación de potencia reactiva (sobre excitado), como en el régimen de consumo (sub excitado). Los motores sincrónicos pueden también actuar como generadores de reactivo, ellos generan potencia reactiva de la misma manera que un generador convencional. La posibilidad de generar energía reactiva es una función de la excitación en el caso de los compensadores sincrónicos y en los motores sincrónicos, es en función de la carga. Los compensadores sincrónicos se emplean para la compensación de factor de potencia de la red y para mantener el nivel normal de voltaje de la red, en las regiones de concentración de las cargas de consumo. El régimen de trabajo de sobreexcitación de un compensador sincrónico es normal, cuando él entrega a la red potencia reactiva. [4]

En relación con esto, los compensadores sincrónicos, como las baterías de condensadores empleados para estos fines, situados en las subestaciones de consumo, se llaman también generadores de potencia reactiva. Sin embargo en el período de disminución de la carga de consumo (por la noche) frecuentemente surge la necesidad de trabajar los compensadores sincrónicos también en el régimen de subexcitación, cuando ellos consumen de la red corriente inductiva y potencia reactiva, ya que en estos casos el voltaje de la red tiende a aumentar y para mantenerlo en el nivel normal, es necesario cargar la red con corrientes inductivas, las que provocan en ella caídas de voltajes complementarias. Por esto, cada compensador sincrónico está

provisto de un regulador automático de excitación o de voltaje, el cual regula la magnitud de su corriente de excitación, de manera que el voltaje en los terminales del compensador sincrónico, se mantiene constante. Los compensadores sincrónicos no poseen primarios y desde el punto de vista del régimen de trabajo, en esencia son motores sincrónicos que trabajan en vacío. Por eso a diferencia del caso al que le correspondan los compensadores sincrónicos se cargan bien con una corriente activa no muy grande y consumen de la red potencia activa para cubrir sus pérdidas. Los compensadores sincrónicos se construyen para una potencia aparente de hasta 10000kVAR.

1.5.9 Disminución del consumo de reactivo sin medios compensadores.

En primer orden deben considerarse los medios para la reducción del consumo de potencia reactiva, sin la aplicación de medios compensadores, por cuanto para su ejecución, en términos generales, no se requieren grandes inversiones capitales. A ellos pertenecen los siguientes:

- 1) Ordenamiento del proceso tecnológico.
- 2) Sustitución de motores asincrónicos subcargados, por otros de menor potencia.
- 3) Reducción del voltaje de los motores que sistemáticamente trabajan con poca carga.
- 4) Limitación del trabajo de los motores al vacío.
- 5) Sustitución de motores asincrónicos por motores sincrónicos.
- 6) Elevación de la calidad de la reparación de los motores.
- 7) Sustitución de los transformadores subcargados.

1.6 Análisis de los trabajos precedentes.

Carrillo, G; Gabriel, C.O. 2001 [1]. Propone una metodología mediante algoritmos genéticos para la selección de condensadores, además expone el efecto de la potencia reactiva sobre conductores y transformadores. En este trabajo no se tienen en cuenta elementos como las variaciones voltajes, sino que se centra en la mejora del factor de potencia solo con fines de la bonificación por parte de la empresa eléctrica.

Fernão Pires D., Gomes Martins A. y Henggeler Antunes C. 2005 [3]. Presentan un modelo multicriterial con la utilización de una técnica heurística basada en Búsqueda Tabú para proporcionar la ubicación de condensadores en redes de distribución radiales. Esta formulación tiene en cuenta dos funciones objetivo: minimizar las pérdidas de la línea y minimizar los costos del banco de condensadores. La metodología presentada lleva la búsqueda potencialmente hacia una región de las soluciones con las características buenas, permitiendo al investigador escoger la solución que mayormente lo satisfaga tomando en consideraciones sus preferencias. El método resultó ser eficaz y se desarrolló fundamentalmente para sistemas radiales de distribución, comprobándose la efectividad del método para resolver este problema de optimización.

Feodorov A.A; Rodrigez López, E. [4]. Suministro eléctrico de empresas industriales La Habana. 1980 [10]. 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.

González, I. 1999 [5]. 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.

Hernández, G. 2000 [6]. Realiza la compensación de la potencia reactiva para una red industrial con la utilización de la programación lineal, utilizando en la función objetivo los costos de compensación y como restricciones la variación de la potencia y la cantidad de reactivo necesario a instalar en cada nodo. En el trabajo no se consideraron las cargas no lineales ni el carácter discreto del problema de compensación de potencia reactiva de los sistemas de suministro eléctrico.

López, M.J, 2004 [7]. Expone las causas, efectos y soluciones para mejorar el factor de potencia. Aborda el efecto de los convertidores electrónicos y cargas no lineales en

específico, no profundiza 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 la energía de la empresa.

Maliuk S. 1980 [8]. Profundiza de forma muy acertada en la influencia del factor de potencia en la industria. Analiza la compensación del reactivo a través de condensadores y la utilización de los motores sincrónicos sobreexcitados para la entrega de reactivo, disminuyendo considerablemente las pérdidas en el sistema.

Viego, P.F; de Armas, M.A, 2006 [10]. El 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.

Ying-Yi Hong, y Saw-Yu Ho, 2005 [12]. Muestran un método basado en los algoritmos genéticos para determinar la configuración de la red que garantice mínimas pérdidas de potencia. En el método propuesto, formularon el problema de forma multicriterial, para condiciones normales y de contingencias. Las configuración del sistema para las soluciones esperadas, fueron logradas en redes de 16 y 33 nodos, lográndose eficazmente la minimización de las pérdidas.

Yong-jun Zhang and Zhen Ren, 2005 [13]. Presentan un modelo que ajusta los costos de los dispositivos correctores (de la potencia reactiva) con el objetivo de disminuir las pérdidas de energía para un estado determinado de la carga. Se presenta la simulación para demostrar que el modelo propuesto refleja el principio de maximización de ganancia, donde se puede disminuir las pérdidas de potencia activa.

En general todos los problemas de ubicación óptima de condensadores en sistemas de distribución buscan obtener la cantidad (fija o conmutable), ubicación y capacidad de los mismos, de manera que compensen la potencia reactiva para la obtención de la disminución de las pérdidas y se mejoren los indicadores de eficiencia del sistema.

1.7 Conclusiones del capítulo.

En el presente capítulo se fundamentó la teoría que permitirá el desarrollo de una posterior investigación, arribándose a las siguientes conclusiones:

1. Se estableció el Marco - Teórico Metodológico de la Investigación.
2. Se definieron los principales conceptos sobre el tema y las expresiones matemáticas que se utilizarán durante la investigación.
3. Se realizó el análisis de los trabajos precedentes.

CAPÍTULO II. DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE LA SUBESTACIÓN.

2.1 Introducción.

2.2 Descripción del flujo tecnológico de la UBP Horno de Reducción.

2.3 Descripción del sistema eléctrico de la planta Hornos de Reducción.

2.4 Caracterización de la subestación 1TP-10.

2.5 Grupos de cargas consumidoras de energía reactiva inductiva en la subestación 1TP-10.

2.6 Vías y métodos para el cálculo de reactivo necesario para corregir el factor de potencia.

2.7 Métodos utilizados por los analizadores de redes para los registros.

2.8 Características del analizador de redes utilizado.

2.9 Gráficos de cargas eléctricas.

2.10 Conclusiones del capítulo.

2.1 Introducción.

Para un mejor entendimiento del presente trabajo investigativo, es necesario conocer las características del sistema donde se desarrollará el mismo. En el presente capítulo, se realizará una descripción panorámica del sistema de suministro eléctrico en cuanto a la estructuración de las cargas eléctricas que lo conforman donde se realizará la caracterización del comportamiento de diferentes parámetros como el factor de potencia, la potencia activa, la potencia reactiva.

La corriente en los equipos eléctricos absorbe de la red una combinación de corriente reactiva y una corriente resistiva. Pocas cargas consumen corriente que está en fase con la tensión, normalmente, la presencia de cargas de carácter inductivo causan

retraso de la corriente con respecto a la tensión, de tal manera que en parte del ciclo de alterna, tensión y corriente tienen signos diferentes.

2.2 Descripción del flujo tecnológico de la UBP Horno de Reducción.

Este proceso tiene como objetivo, reducir en el mineral alimentado óxido de níquel a níquel metálico, para su posterior lixiviación amoniacal. La planta cuenta con 24 hornos, 12 transportadores rotatorios e igual número de enfriadores. El mineral antes del proceso de reducción, se somete a un proceso de secado y molienda en la planta de preparación de mineral, donde se le reduce la humedad hasta un 4% aproximadamente y se tritura hasta una fineza de alrededor de un 83% de la malla menor 0,074mm. Luego en los transportadores de banda se alimenta alrededor de 2,9% de petróleo tecnológico al mineral, lográndose una homogeneización bastante completa con la desventaja de una pérdida de combustible en el trayecto hasta su alimentación. Ver anexo 1.

El mineral, después de pasar por la sección de molienda, es enviado mediante transporte neumático a los 6 silos (225 – S1) como forma de almacenaje, los cuales tienen una capacidad de 1500 ton cada uno, lo que facilita una operación en los hornos de unas 16 horas. En la sección de los silos se encuentran 9 bombas tipo TA-36 (225-BO) de una capacidad de 120 t/h, mediante las cuales el mineral es bombeado hasta las tolvas de los hornos (225 TV) que son 12 en total, dispuestas una para cada dos hornos. Estas tolvas permiten realizar una operación de 8 horas a cada horno.

Llegando a las tolvas este mineral pasa a los dosificadores de pesaje automático (225 – BA – 201), los cuales se encargan de garantizar un suministro parejo al horno, de acuerdo al tonelaje fijado, estos equipos tiene una capacidad hasta 22 t/h, después que el mineral es pesado, se produce la descarga del mismo al sinfín alimentador (225-TR-202) el cual transporta el mineral al horno hacia el hogar cero. El mineral una vez dentro del horno es sometido al proceso de reducción, el que se logra estableciendo un perfil de temperatura dentro del mismo y una concentración determinada de gases reductores (CO-H₂) para ello el horno dispone de 9 cámaras de combustión con quemadores de baja presión para la combustión incompleta del petróleo, el cual permite además de lograr el perfil de temperatura enriquecer la atmósfera reductora.

El proceso de reducción se realiza en un horno de hogares múltiples tipo IIM 17 K-6, 8, de 23,5 m de alto y 6,8m de diámetro, con 17 hogares. Además, el horno (225-HR-205). Cuenta con un eje central al cual se le articulan 68 brazos (4 en cada hogar). Estos brazos tienen dispuestos dientes o paletas, con la que mediante la rotación del eje central facilitan el traslado de mineral de un hogar a otro. El movimiento de mineral de un hogar a otro se realiza en forma de zigzag, ya que los hogares pares tienen su descarga por la periferia y los hogares impares por el centro.

2.3 Descripción del sistema eléctrico de la planta Hornos de Reducción.

En la planta Hornos de Reducción se ubican siete subestaciones de las cuales tres se alimentan desde la subestación principal de la empresa (DDP) y las otras cuatro se alimentan desde la subestación 1SD. Las subestaciones TP-6, TP-8 y 1TP-10 son las subestaciones de mayor importancia ya que de ellas se alimentan todos los equipos principales de los 24 hornos con que cuenta dicha planta. Las subestaciones 1TP-30 y 1TP-31 son las encargadas del alumbrado general. La subestación 1TP-11 es la que alimenta todo el equipamiento eléctrico de los electrofiltros y transporte neumático. La subestación TP-7 es una subestación de respaldo para los mecanismos auxiliares de los enfriadores. A continuación se muestra en la tabla 2.1 los datos de los transformadores de potencia que están instalados en la planta. Ver también Anexo 2 y 3.

Tabla 2.1: Características de los transformadores de la planta Hornos de Reducción.

Ubicación	Serie	Tipo	S (kVA)	Un (kV)	In (A)	Ucc %	Conex.	Tap's	Cant. Aceite (Lts)	Tipo de Aceite	Peso Total (kg)	Año Fab.
TP-6 (1T)	5675	TM	1600	10/0,48	92,4/1925	6.4	D/Yo-11	I	1960	DIALA	7980	1983
TP-6 (2T)	5669	TM	1600	10/0,48	92,4/1925	6.4	D/Yo-11	I	1960	Isovoltai ne	7990	1983
TP-8 (1T)	5444	TM	1600	10/0,48	92,4/1925	6.4	D/Yo-11	I	1960	DIALA	7990	1983
TP-8 (2T)	5669	TM	1600	10/0,48	92,4/1925	6.4	D/Yo-11	I	1960	Isovoltai ne	7990	1983
1TP-10 (1T)	5424	TM	1600	10/0,48	92,4/1925	6.4	D/Yo-11	I	1960	DIALA	7990	1983
1TP-10 (2T)	5570	TM	1600	10/0,48	92,4/1925	6.4	D/Yo-11	I	1960	DIALA	7990	1983
1TP-11 (1T)	5569	TM	1600	10/0,48	92,4/1925	6.4	D/Yo-11	I	1960	DIALA	7990	1983
1TP-11 (2T)	5590	TM	1600	10/0,48	92,4/1925	6.4	D/Yo-11	I	1960	DIALA	7990	1983
1TP-30	1782	TMZ	630	10/0,38	36,4/910	5.58	D/Yo-11	III	600	DIALA	3400	1983
1TP-31	1785	TMZ	630	10/0,38	36,4/910	5.58	D/Yo-11	III	600	DIALA	3400	1983
TP-7	1797	TM	630	10/0,48	36,4/758	6.6	D/Yo-11	I	1960	DIALA	3400	1983

2.4 Caracterización de la subestación 1TP-10.

Esta investigación se realizó en la subestación 1TP-10 donde se hicieron mediciones en las líneas que la componen. La misma se alimenta desde las secciones I y III de la subestación principal de la empresa (DDP). Los transformadores de potencia que tienen una conexión estrella-delta aterrado con características de potencia aparente (S) de 1600kVA y relación de transformación de 13,8./0.48kV y 92.5/1925A. Está dividida en dos secciones, alimentadas de forma independiente, de las cuales se alimentan todo el equipamiento eléctrico perteneciente a cuatro líneas de producción (8 hornos) donde cada línea presenta una carga aproximada de 350A. Además se alimentan tres ventiladores de aire para la combustión de 220kW cada uno y otros equipos auxiliares como tres bombas de agua de los fosos, grúas polipatos y circuitos de soldadura. Todos estos equipos se encuentran en centros de control de motores (CCM). Ver anexo 4.

En la figura 2.1 se puede visualizar la posición de los elementos que componen cada línea de producción. Además el resto de las líneas se muestran en el anexo-5.

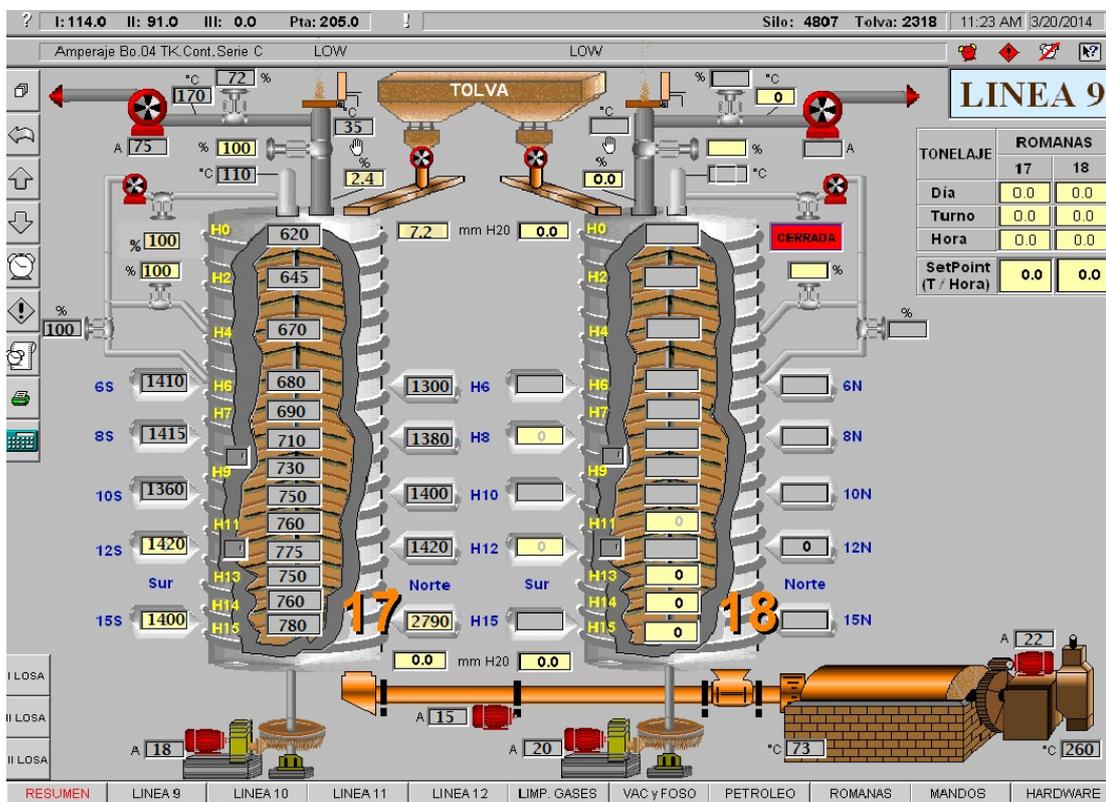


Figura 2.1. Visualización del CITEC.

2.4.1 Descripción del CCM de la línea 9.

El CCM de la línea 9: A través sus barras colectoras le suministra la energía eléctrica a catorce motores de la siguiente forma:

- ✓ Enfriador 9, el suministro ocurre mediante el interruptor tipo NZM (NZM9-250) con $I_n=160A$, $I_{op}=2000A$ del fabricante MOELLER, el cual es controlado por el relé MM2 con TC=200/5 del tipo MULTILÍN, fabricante General Electric.
- ✓ Mecanismo auxiliar 9: El suministro se realiza mediante el interruptor tipo NZM (NZMH6) de $I_n=30A$, $I_{op}=260A$ del fabricante MOELLER.
- ✓ Transportador 9: Se alimenta mediante el interruptor tipo NZM (NZM6B-63) de $I_n=60A$, $I_{op}=800A$ de la firma MOELLER.
- ✓ Eje central 17 y 18: El suministro se realiza mediante el interruptor tipo NZM (NZM6B-63) con $I_n=60A$, $I_{op}=600A$, de la firma MOELLER, y este es controlado por el relé 239 con TC=50/1 del tipo MULTILÍN, fabricante General Electric.
- ✓ Mezcladora 17 y 18: Se alimenta mediante el interruptor tipo NZM (NZM68-63) de $I_n=60A$, $I_{op}=400A$ del fabricante MOELLER.
- ✓ Ventilador postcombustión 17 y 18: El suministro se realiza mediante el interruptor tipo NZM (NZM6B-63) de $I_n=50A$, $I_{op}=320A$ del fabricante MOELLER.
- ✓ Toma muestra 9: Se alimenta a través del interruptor tipo NZM (NZMH4-10) de $I_n=10A$, $I_{op}=28A$ del fabricante MOELLER.
- ✓ Romanas 17 y 18: Se alimenta a través del interruptor tipo NZM (NZMH4-10) de $I_n=10A$, $I_{op}=28A$ del fabricante MOELLER.
- ✓ Ventilador de succión de gases 17 y 18: Se alimenta mediante el interruptor tipo NZM (NZM9-250) de $I_n=160A$, $I_{op}=1150A$ del fabricante MOELLER.
- ✓ Este CCM de la línea 9 tiene un interruptor de entrada del tipo EMAX (E3S1600) del fabricante ABB. Además presenta un relé SR750 del tipo MULTILÍN, del fabricante General Electric el cual es el encargado de trabajar como protección y como transferencia. Este CCM se puede enlazar de forma manual y automática con el CCM de la línea 10.

2.4.2 Descripción del CCM de la línea 10.

CCM de la Línea 10: A través sus barras colectoras le suministra la energía eléctrica a catorce motores de la siguiente forma:

- ✓ Enfriador 10, el suministro se efectúa mediante el interruptor tipo NZM (NZM9-250) con $I_n=160A$, $I_{op}=2000A$ del fabricante MOELLER, el cual es controlado por el relé MM2 con TC=200/5 del tipo MULTILÍN, fabricante General Electric.
- ✓ Mecanismo auxiliar 10: El suministro se realiza mediante el interruptor tipo NZM (NZMH6) de $I_n=30A$, $I_{op}=260A$ del fabricante MOELLER.
- ✓ Transportador 10: Se alimenta mediante el interruptor tipo NZM (NZM6B-63) de $I_n=60A$, $I_{op}=800A$ de la firma MOELLER.
- ✓ Eje central 19 y 20: El suministro se realiza mediante el interruptor tipo NZM (NZM6B-63) con $I_n=60A$, $I_{op}=600A$, de la firma MOELLER, y este es controlado por el relé 239 con TC=50/1 del tipo MULTILÍN, fabricante General Electric.
- ✓ Mezcladora 19 y 20: Se alimenta mediante el interruptor tipo NZM (NZM68-63) de $I_n=60A$, $I_{op}=400A$ del fabricante MOELLER.
- ✓ Ventilador poscombustión 19 y 20: El suministro se realiza mediante el interruptor tipo NZM (NZM6B-63) de $I_n=50A$, $I_{op}=320A$ del fabricante MOELLER.
- ✓ Toma muestra 10: Se alimenta a través del interruptor tipo NZM (NZMH4-10) de $I_n=10A$, $I_{op}=28A$ del fabricante MOELLER.
- ✓ Romanas 19 y 20: Se alimenta a través del interruptor tipo NZM (NZMH4-10) de $I_n=10A$, $I_{op}=28A$ del fabricante MOELLER.
- ✓ Ventilador de succión de gases 19 y 20: Se alimenta mediante el interruptor tipo NZM (NZM9-250) de $I_n=160A$, $I_{op}=1150A$ del fabricante MOELLER.
- ✓ Este CCM de la línea 10 tiene un interruptor de entrada del tipo EMAX (E3S1600) del fabricante ABB. Además presenta un relé SR750 del tipo MULTILÍN, del fabricante General Electric el cual es el encargado de trabajar como protección y como transferencia. Este CCM se puede enlazar de forma manual y automática con el CCM de la línea 9.

2.4.3 Descripción del CCM de la línea 11.

CCM línea 11: A través sus barras colectoras le suministra la energía eléctrica a catorce motores de la siguiente forma:

- ✓ Enfriador 11, el suministro se efectúa mediante el interruptor tipo NSX250N MA220 con $I_n=250A$, $I_{op}=2000A$ del fabricante Schneider-Electric- Presenta como

- protección un relé 239 con TC=250/5 del tipo MULTILÍN, fabricante General Electric.
- ✓ Mecanismo auxiliar 11: El suministro se realiza mediante el interruptor tipo NSX100N de In=30A, Iop=200A del fabricante Schneider-Electric.
 - ✓ Transportador 11: Se alimenta mediante el interruptor tipo NSX100N MA100 de In=60A, Iop=500A de la firma Schneider-Electric. Presenta como protección un relé 239 con TC=50/5 del tipo MULTILÍN, fabricante General Electric.
 - ✓ Eje central 21 y 22: El suministro se realiza mediante el interruptor tipo NSX100N MA50 con In=50A, Iop=500A, de la firma Schneider-Electric. Presenta como protección un relé 239 con TC=50/5 del tipo MULTILÍN, fabricante General Electric.
 - ✓ Mezcladora 21 y 22: Se alimenta mediante el interruptor tipo GV2P14 de In=10A del fabricante Schneider-Electric.
 - ✓ Ventilador poscombustión 21 y 22: El suministro se realiza mediante el interruptor tipo NSX100N de In=100A, con unidad de protección Micrologic 6.2 E-M25 del fabricante Schneider-Electric.
 - ✓ Toma muestra 11: Se alimenta a través del interruptor tipo GV2P08 de In=8A, del fabricante Schneider-Electric.
 - ✓ Romanas-21 y 22: Se alimenta a través del interruptor tipo GV2P08 de In=8A, del fabricante Schneider-Electric.
 - ✓ Ventilador de succión de gases 21 y 22: Se alimenta mediante el interruptor tipo NSX160N de In=160A, con unidad de protección Micrologic 6.2E-M150 del fabricante Schneider-Electric.
 - ✓ Este CCM de la línea 11 tiene un interruptor de entrada del tipo NW10NA de 1000A del fabricante Schneider-Electric. Este CCM se puede enlazar de forma manual y automática con el CCM de la línea 12.

2.4.4 Descripción del CCM de la línea 12.

CCM línea 12: A través sus barras colectoras le suministra la energía eléctrica a catorce motores de la siguiente forma:

- ✓ Enfriador 12: El suministro se efectúa mediante el interruptor tipo NSX250N MA220 con In=250A, Iop=2000A del fabricante Schneider-Electric- Presenta como

- protección un relé 239 con TC=250/5 del tipo MULTILÍN, fabricante General Electric.
- ✓ Mecanismo auxiliar 12: El suministro se realiza mediante el interruptor tipo NSX100N de In=30A, Iop=200A del fabricante Schneider-Electric.
 - ✓ Transportador 12: Se alimenta mediante el interruptor tipo NSX100N MA100 de In=60A, Iop=500A de la firma Schneider-Electric. Presenta como protección un relé 239 con TC=50/5 del tipo MULTILÍN, fabricante General Electric.
 - ✓ Eje central 23 y 24: El suministro se realiza mediante el interruptor tipo NSX100N MA50 con In=50A, Iop=500A, de la firma Schneider-Electric. Presenta como protección un relé 239 con TC=50/5 del tipo MULTILÍN, fabricante General Electric.
 - ✓ Mezcladora 23 y 24: Se alimenta mediante el interruptor tipo GV2P14 de In=10A del fabricante Schneider-Electric.
 - ✓ Ventilador postcombustión 23 y 24: El suministro se realiza mediante el interruptor tipo NSX100N de In=100A, con unidad de protección Micrologic 6.2E-M25 del fabricante Schneider-Electric.
 - ✓ Toma muestra 12: Se alimenta a través del desconectivo tipo GV2P08 de In=8A, del fabricante Schneider-Electric.
 - ✓ Romanas 23 y 24: Se alimenta a través del interruptor tipo GV2P08 de In=8A, del fabricante Schneider-Electric.
 - ✓ Ventilador de succión de gases 23 y 24: Se alimenta mediante el interruptor tipo NSX160N de In=160A, con unidad de protección Micrologic 6.2E-M150 del fabricante Schneider-Electric.
 - ✓ Este CCM de la línea 12 tiene un interruptor de entrada del tipo NW10NA de 1000A del fabricante Schneider-Electric. Este CCM se puede enlazar de forma manual y automática con el CCM de la línea 11.

Comportamiento de la corriente en el CITECT SCADA.

Mediante la figura 2.2 podemos apreciar el comportamiento de la corriente en algunos motores que se alimentan desde la subestación 1TP-10 donde los mismos se encuentran subcargados.

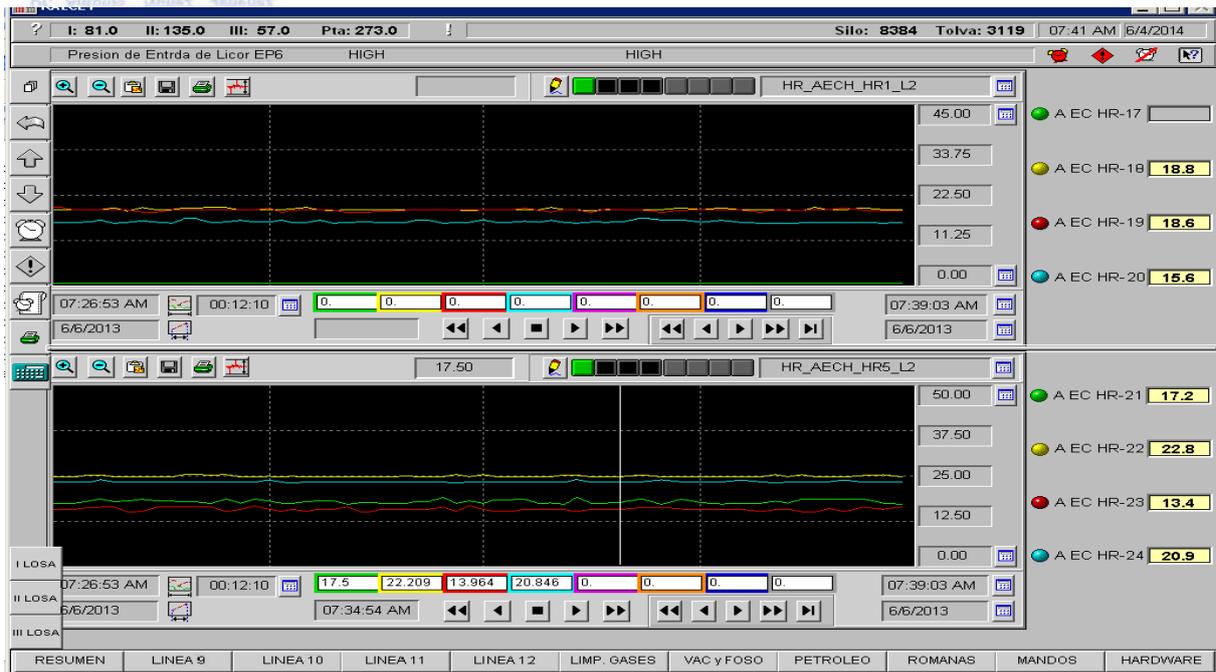


Figura 2.2: Comportamiento de la corriente en el CITECT SCADA.

2.5 Grupos de cargas consumidoras de energía reactiva inductiva en la subestación 1TP-10.

Los grupos de cargas consumidoras de energía reactiva inductiva en la subestación 1TP-10 se muestran a continuación:

- ✓ Transformadores.
- ✓ Motores.
- ✓ Lámparas de carga.
- ✓ Balastos
- ✓ Soldadora de arco.

Está descartado, que se debe intentar reducir al máximo la proporción de energía reactiva, tanto en redes como en instalaciones, para lo cual resulta necesario medirla y cuantificarla.

2.6 Vías y métodos para el cálculo de reactivo necesario para corregir el factor de potencia.

Para calcular el valor del condensador a instalar en la industria para la corrección del factor de potencia, se utilizan varios métodos entre los cuales se encuentran:

- ✓ **A partir de la factura eléctrica.**

La empresa suministradora proporciona los datos de energía activa y reactiva durante un período de tiempo determinado (normalmente 2 meses), a partir de estos datos, obtenemos la potencia de condensadores.

Por ejemplo: Para un período de 2 meses los consumos han sido los siguientes:

* Energía reactiva: 63.590 KVAR/h

* Energía activa: 54.350 KWh

Suponiendo una jornada de trabajo de 8 horas y 25 días al mes y tomando como valor del $\cos \varphi 2 = 0,9$. Con un contador de potencia activa, un voltímetro y un amperímetro. Considerando una red trifásica equilibrada, con ayuda de un fasímetro obtenemos directamente el $\cos \varphi 1$; además medimos V e I.

$$P = \sqrt{3} * V * I * \cos \varphi 1$$

Cuando la carga total de una planta que se va a compensar no presenta variaciones importantes durante la jornada de trabajo, el cálculo de la potencia reactiva de los condensadores a instalar (kVAr_c) puede realizarse a partir de la factura eléctrica. Para esto se escoge el mes donde el reporte de energía reactiva sea más elevado y se toman los valores de KWh y kVAr facturados. Se determina el factor de potencia promedio existente en la instalación, al que se le denominará factor de potencia. La potencia reactiva necesaria de los condensadores, para corregirlo a un nuevo valor de factor de potencia 2, se puede calcular aplicando directamente la siguiente expresión derivada de las relaciones del triángulo representativo de la potencia aparente, activa y reactiva:

$$kVAR_c = kW(\tan \varphi 1 - \tan \varphi 2)$$

$$\tan \varphi 1 = \tan(\cos \varphi 1^{-1})$$

✓ **Con mediciones en condiciones de demanda máxima.**

Si la carga presenta cambios significativos, puede emplearse tanto el factor de potencia, como la potencia en condiciones de demanda máxima. Se debe tener cuidado que los condensadores así seleccionados, cuando se esté en condiciones de mínima carga, no causen una sobre compensación, ya que ésta representaría en una elevación de la tensión, lo cual podría alcanzar niveles peligrosos. Si esto ocurriera, debe considerarse la utilización de bancos desconectables o de regulación automática, con los que se puede mantener un factor de potencia dentro de un rango apropiado.

Otra alternativa para evitar una sobrecompensación, consiste en instalar los condensadores junto con las cargas, de tal forma que sólo estén en servicio cuando éstas estén conectadas. Esta solución, generalmente más costosa, se llega a justificar en equipos de capacidad importante.

✓ **A partir de los parámetros eléctricos de la instalación.**

Para nuevas instalaciones, el cálculo de la capacidad de los bancos de condensadores se realiza efectuando el balance de la potencia activa y reactiva de todos los receptores de la instalación, teniendo en cuenta los factores de utilización, de coincidencia y otros. Con esos resultados, se calculan los valores totales de P y Q y se determina el factor de potencia.

✓ **Mediante técnicas computacionales.**

Los condensadores son ampliamente usados en los sistemas de distribución para reducir las pérdidas de energía, liberar capacidad en el sistema y mantener un perfil de voltaje dentro de los límites permisibles. La calidad de estas prestaciones depende de la posición, tamaño, el tipo y número de los condensadores. La localización óptima de condensadores, así como la determinación de la capacidad adecuada a emplear, se hace notablemente difícil si se tienen en cuenta los siguientes factores:

- ✓ Carga no uniformemente distribuida.
- ✓ Distintos niveles de carga en función del tiempo.
- ✓ Presencia de diferentes calibres de conductores a lo largo del circuito.
- ✓ Existencia de numerosas ramificaciones.
- ✓ Pérdidas de potencia en líneas y transformadores.
- ✓ Redes de distribución con configuración Radial.

2.7 Métodos utilizados por los analizadores de redes para los registros.

Con la utilización de estos instrumentos en los puntos que se seleccionen del sistema, se pueden tener todos los valores necesarios, con los intervalos adecuados, para calcular los bancos de condensadores fijos o regulados, teniendo en cuenta las variaciones de la carga, la regulación de tensión, etc. Este fue el método utilizado en la investigación; se realizaron mediciones de las principales variables en cada una de las secciones individualmente y las dos secciones simultáneamente del banco de transformadores de la subestación, adquiriéndose mediciones eléctricas tales como

corriente, voltaje, potencia activa, potencia reactiva, potencia aparente y factor de potencia. El analizador de redes nos permitió hacer mediciones continuas cada 100 milisegundos durante cinco días en cada una de las secciones pertenecientes al Banco de Transformadores de la subestación. El analizador se configuró con el método para cargas trifásicas que posee el internamente.

2.8 Características del analizador de redes utilizado.

Serie: PQM-1000 (Medidor de la Calidad de la Energía Portátil)

Display de LCD

Teclado de membrana, tiene cuatro teclas para control y programación.

Posibilidad de comunicación: RS - 232 y RS - 435

Alimentación: monofásicas, 110 a 230 V CA

Tensión de tolerancia: - 15 % a 10 %

Frecuencia de trabajo: 50 a 60 HZ

Tensión: 24 a 110 V

Consumo: 3 a 6 VA

Clase de precisión: Tensión 0,5 %

Corriente 0,5 %



Figura 2.3 Representación del analizador de redes utilizado.



Figura 2.4 Representación del software, activación de la Data Logger.

El software utilizado pertenece a la GE Power manager/PQM, el cual es parte de la Multilim, a través del cual se pueden realizar varias operaciones del equipamiento, así como análisis de la calidad de la energía y otros.

En el período de mediciones en la subestación 1TP-10 se obtuvieron valores de las variables más importantes para el comportamiento del factor de potencia, son los valores de potencia reactiva (Q), potencia activa (P) y potencia aparente (S), donde al saber ya que los motores están subcargados se detectó a través de las mediciones del factor de potencia un bajo valor del factor de potencia donde se desea tomar como solución, la conexión de un banco de condensadores automáticos para mejorar el factor de potencia ya que los motores de la planta 1TP-10 necesita un valor de potencia mayor para el arranque de los motores por el alto par de arranque que presentan los mismos.

2.9 Gráficos de cargas eléctricas.

El soporte de la solución racional del complicado conjunto de problemas técnico – económico del suministro eléctrico en empresas está en la correcta determinación de las cargas eléctricas probables. Las magnitudes de las cargas eléctricas determinan la selección de todos los elementos e índices técnicos económicos del proyectado sistema de suministro. De la correcta valoración de las cargas esperadas dependen los gastos capitales: gastos de metal no ferroso, de pérdidas de energía eléctrica de explotación, etc. Los errores en la determinación de las cargas eléctricas conducen al empeoramiento de los índices técnico económicos de la empresa.

La carga eléctrica caracteriza el consumo de energía eléctrica de: receptores independientes, grupos de receptores y la empresa en su conjunto. Para la proyección

y explotación de sistemas de suministros eléctricos de empresas son fundamentales tres tipos de cargas: potencia activa (P), potencia reactiva (Q) y corriente (I).

Las cargas eléctricas pueden ser observadas, visualmente, por medio de instrumentos de medición o registradas por equipos registradores. Los cambios de las cargas pueden ser registrados en forma de una curva continua, o escalonada. Las curvas de cambio de potencia activa, reactiva y de corriente, con respecto al tiempo, se denominan gráficos de carga de potencia activa, reactiva y de corriente, respectivamente.

Los gráficos pueden ser clasificados en:

- ✓ En grupos receptores.
- ✓ Individuales para receptores.
- ✓ Independientes de energía eléctrica.

En la tabla 2.2 se muestra las mediciones tomadas durante una hora en un día, de las potencias, Potencia Activa (P (kW)), Potencia Reactiva (Q (kVAr)), Potencia Aparente (S (kVA) y el factor de potencia (FP).

Tabla 2.2: Muestra de las mediciones.

	P(kW)	Q(kVAr)	S(kVA)	FP
1	736	639	975	0,75
2	726	628	960	0,76
3	624	607	871	0,72
4	665	606	900	0,74
5	683	620	923	0,74
6	717	616	946	0,76
7	781	655	1019	0,77
8	721	626	955	0,76
9	642	621	893	0,72
10	675	630	923	0,73
11	801	691	1057	0,76
12	787	680	1041	0,76
13	693	644	946	0,73
14	689	636	938	0,73
15	693	645	947	0,73
16	715	638	958	0,75
17	672	634	925	0,73
18	687	638	938	0,73
19	664	628	914	0,73

20	691	632	936	0,74
21	659	628	911	0,72
22	603	622	867	0,70
23	719	652	971	0,74
24	751	650	993	0,76

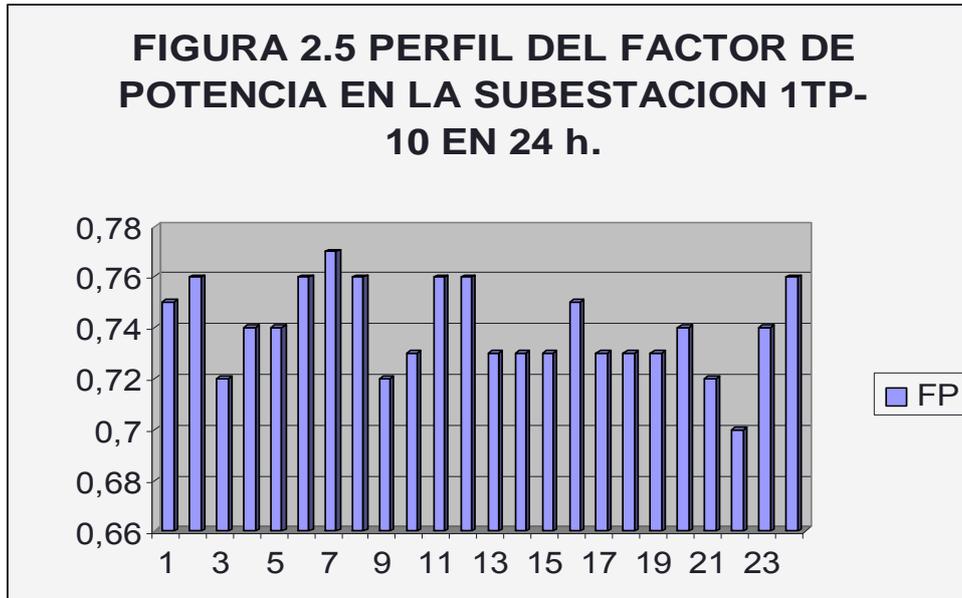


Figura 2.5: Perfil del factor de potencia en la subestacion 1TP-10

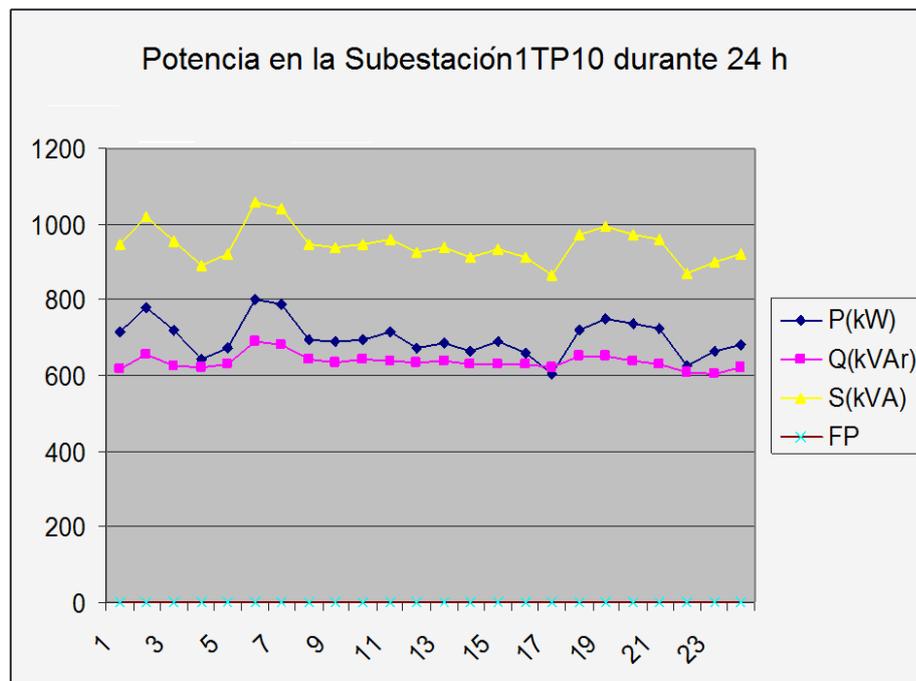


Figura 2.6: Perfil de potencias en la subestacion 1TP-10 durante 24 h.

Mediante la observación y análisis se comprobó que el principal degradante que posee el suministro energético de la instalación es el elevado consumo de potencia reactiva asociado al régimen de trabajo de los motores conectados a ella.

Se realizó además el análisis de los armónicos en tensión y corriente por lo que se pudo constatar que los valores se encuentran dentro de los permisibles por las normas de la entidad.

2.10 Conclusiones del capítulo.

1. Se dieron a conocer las características de la subestación de 1TP-10 y mediante las mediciones se detectó el bajo factor de potencia que existe en la planta.
2. Realización del levantamiento de cargas y registro de las mediciones de los diferentes parámetros eléctricos.
3. Descripción del instrumento de medición con que se obtuvieron las mediciones.

CAPÍTULO III MEJORAS EN EL SUMINISTRO ELÉCTRICO DE LA SUBESTACIÓN 1TP-10.

3.1 Introducción.

3.2 Mejoras del factor de potencia en el esquema de la subestación 1TP-10.

3.3 Variante propuesta para la compensación de reactivo.

3.4 Ubicación para instalar los condensadores.

3.5 Selección de los equipos de compensación.

3.6 Mejoras del sistema de suministro asociada a la compensación de reactivo.

3.7 Cálculo de las pérdidas del transformador.

3.8 Análisis económico.

3.9 Conclusiones del capítulo.

3.1 Introducción.

La energía reactiva generalmente está asociada a los campos magnéticos internos de los motores y transformadores, por lo que no puede ser suprimida. Por otro lado, su circulación por las líneas y transformadores de sistemas eléctricos de distribución produce pérdidas de energía, siendo necesaria su compensación desde un punto de vista técnico económico.

Los bancos de condensadores se emplean frecuentemente en los sistemas eléctricos de potencia para la compensación de la demanda de potencia reactiva de las cargas y el mejoramiento del perfil de voltaje del sistema. Si los bancos de condensadores no son correctamente ubicados y seleccionados en los nodos del circuito no solamente pueden incrementarse las pérdidas, sino también se pueden amplificar los problemas de armónicos en caso de existencia de los mismos.

El objetivo del presente capítulo, es la compensación de la potencia reactiva en una de las subestaciones principales de la planta Hornos de Reducción en la empresa de níquel Comandante Ernesto Che Guevara.

3.2 Mejoras del factor de potencia en el esquema de la subestación 1TP-10.

Una industria como la referida en nuestro trabajo tiene un factor de potencia natural que puede ser relativamente bajo, en el rango de 0.7 a 0.8 inductivo. Este bajo factor de potencia se debe en gran medida a la presencia de motores asíncronos subcargados en los esquemas de los CCM. En la medida en que la planta está más motorizada, puede esperarse un empeoramiento del factor de potencia, a no ser 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:

- a) Reducción del consumo de potencia reactiva, sin la aplicación de medios compensadores.
- b) 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.
- ✓ Seleccionar correctamente el tipo de motor.
- ✓ Sustitución de los motores asíncronos subcargados por otros de menor potencia.
- ✓ Reducir la tensión de los motores que frecuentemente trabajan con poca carga.
- ✓ Limitación del trabajo de los motores en vacío.
- ✓ Sustituir los motores asíncronos por motores síncronos.

- ✓ Elevar la calidad de la reparación de los motores.
- ✓ Sustituir los transformadores subcargados.

Normalmente 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 ninguna necesidad se debe sobre compensar 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 no se anula totalmente, sino 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 trabajo nuestro 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 puede observar 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 a las 12.00h, además se tomó el valor promedio del factor de potencia el cual resultó ser 0.74 con lo cual todo quedó listo para aplicar los procedimientos de cálculo directo y determinar la capacidad del banco de condensadores necesario para corregir el factor de potencia a un valor de 0.98.

El valor máximo de potencia activa obtenida se escoge y 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.

Generalmente la energía reactiva está asociada a los campos magnéticos internos de los motores y transformadores, por lo que no puede ser suprimida. Por otro lado, su circulación por las líneas y transformadores de sistemas eléctricos de distribución produce pérdidas de energía, siendo necesaria su compensación desde un punto de vista técnico económico.

Frecuentemente se emplean los bancos de transformadores en los sistemas eléctricos de potencia para la compensación de la demanda de potencia reactiva de las cargas y el mejoramiento del perfil de voltaje del sistema. Si los bancos de condensadores no son correctamente ubicados y seleccionados en los nodos del circuito no solamente pueden incrementarse las pérdidas, sino también se pueden amplificar los problemas de armónicos en caso de existencia de los mismos.

3.3 Variante propuesta para la compensación de reactivo.

De todos los tipos de compensación de potencia reactiva planteados en el capítulo 1 se seleccionó la compensación central con banco automático debido a la gran variación de la carga durante todo el día y así evitaría una sobrecompensación en la planta donde se presenta a continuación la siguiente variante:

$$kVAr = kW(\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \quad (3.1)$$

Luego de haber aplicado el método anterior se determinó que la capacidad total entre los dos bancos para corregir el reactivo es de, 371 kVAr.



Figura 3.1. Muestra del banco propuestos.

3.4 Ubicación para instalar los condensadores.

En la instalación de los condensadores 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 del voltaje. Se puede hacer una corrección del grupo de cargas conectando en los transformadores primarios y secundarios de la planta, por ejemplo, en un dispositivo principal de distribución o en una barra conductora de control de motores.

Frecuentemente cuando cambian los flujos de potencia 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.

No debemos olvidar que la corrección se lleva a cabo sólo del punto considerado a la fuente de energía y no en dirección opuesta. 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.

En el caso estudio la distancia entre los nodos de carga y la barra principal de la subestación es relativamente corta por lo que se decidió instalar el banco en la barra principal paralelo a la carga con lo cual se toman ambas ventajas y se logra compensar el 100% del reactivo resultante.

3.5 Selección de los equipos de compensación.

Para la compensación se tomó la oferta de la firma CIRCUTOR, la misma ofrece una gama de equipos de compensación de la potencia reactiva en correspondencia con los kVAr.

El equipo de compensación automático seleccionado fue la serie VARI.

Esta serie puede albergar hasta 12 condensadores de polipropileno metalizado autogenerarse de muy bajas pérdidas con protección mediante fusibles, contadores,

impedancias limitadoras y resistencia de descarga rápida. Se puede señalar que la firma no oferta dispositivo con los kVAr obtenidos por lo que se ajustará a la oferta.

3.6 Mejoras del sistema de suministro asociada a la compensación de reactivo.

Se denomina capacidad liberada a aquel valor de potencia que se encuentra en el sistema pero no es utilizado.

Luego de la mejora del factor de potencia de ambas secciones, se le agregará 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.

$$S = 397,6 \text{ kVA}$$

Después de la mejora

$$S = 286,3 \text{ kVA}$$

Se libera 111,3 kVA

Corrientes antes y después de la mejora del factor de potencia.

$$I = 520.7 \text{ A}$$

Después de la mejora

$$I = 266.8 \text{ A}$$

Como se observa se logra una disminución de corriente producto al mejoramiento del factor de potencia, se considera que deben ser ajustadas las protecciones de sobrecorriente.

Potencia activa antes y después de la compensación.

$$P = 269.55 \text{ kW}$$

Después

$$P = 192.94 \text{ kW}$$

Con lo que se liberan 76.61 kW

✓ Corrientes antes y después de la mejora del factor de potencia.

$$I = 423.3 \text{ A}$$

Después de la mejora

$$I = 213.7 \text{ A}$$

Como se observa se logra una disminución de corriente producto al mejoramiento del factor de potencia, por lo que consideramos que deben ser ajustadas las protecciones de sobrecorriente.

✓ Potencia activa antes y después de la compensación.

$$P = 215.86 \text{ kW}$$

Después

$$P = 154.51 \text{ kW}$$

Con lo que se liberan 61.35 kW

3.7 Cálculo de las pérdidas de los transformadores.

A continuación se muestra el cálculo de las pérdidas en el transformador 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.

$$\Delta Q_{CC} = S_N \frac{U_{CC}}{100} \tag{3.2}$$

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

Cálculo del coeficiente de carga antes y después de la compensación.

Transformador 1

$$K_c = 0.25$$

Después de la mejora

$$K_c = 0.18$$

Transformador 2

$$K_c = 0.20$$

Después de la mejora

$$K_c = 0.14$$

Cálculo de las pérdidas referidas del transformador 1 con carga.

$$\Delta P'_{CC} = \Delta P_{CC} + KIP \cdot \Delta Q_{CC} \tag{3.3}$$

Donde:

K_{IP} : coeficiente de incremento de pérdidas.

$$\Delta P'_{CC} = 18 + 0,05 \cdot 88$$

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

Cálculos de las pérdidas del transformador 1 sin carga.

$$\Delta P'_{SC} = \Delta P_{SC} + K_{IP} \cdot Q_{SC} \quad (3.4)$$

$$\Delta P'_{SC} = 3,3 + 0,05 \cdot 91,2$$

$$\Delta P'_{SC} = 7,90 \text{ kW}$$

Con los valores de las pérdidas con carga y sin carga se calcula las pérdidas totales del transformador 1.

$$\Delta P'_t = 9.3 \text{ kW}$$

Después de la mejora

$$\Delta P'_t = 8.6 \text{ kW}$$

El consumo de energía es:

$$\Delta E_a = 81468 \text{ kWh}$$

Después de la mejora

$$\Delta E_a = 75336 \text{ kWh}$$

Se considera 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 se escoge un año de trabajo del transformador. Como se observa, las pérdidas se reducen debido al mejoramiento del factor de potencia y resulta un ahorro de energía de:

$$\Delta E_a = 6132 \text{ kWh/año}$$

Cálculo de las pérdidas referidas del transformador 2 con carga.

$$\Delta P'_{CC} = \Delta P_{CC} + K_{IP} \cdot \Delta Q_{CC} \quad (3.5)$$

Donde:

K_{IP} : coeficiente de incremento de pérdidas.

$$\Delta P'_{CC} = 18 + 0,05 \cdot 88$$

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

Cálculos de las pérdidas del transformador 2 sin carga.

$$\Delta P'_{SC} = \Delta P_{SC} + KIP \cdot \Delta Q_{SC} \quad (3.6)$$

$$\Delta P'_{SC} = 3,3 + 0,05 \cdot 91,2$$

$$\Delta P'_{SC} = 7,90 \text{ kW}$$

Con los valores de las pérdidas con carga y sin carga se calcula las pérdidas totales del transformador 2.

$$\Delta P'_t = 8.8 \text{ kW}$$

Después de la mejora

$$\Delta P'_t = 8.3 \text{ kW}$$

El consumo de energía es:

$$\Delta E_a = 77088 \text{ kWh/año}$$

Después de la mejora

$$\Delta E_a = 72708 \text{ kWh/año}$$

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

$$\Delta E_a = 4380 \text{ kWh/año}$$

3.8 Análisis económico.

En la actualidad la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara" se encuentra en una situación crítica con el equipamiento eléctrico. Por un lado se está frente a un equipamiento que presenta un grado significativo de atraso, para poder garantizar el tipo de información y operación que exigen en estos momentos las empresas, donde la eficiencia se ha convertido en un pilar en la estabilidad económica. Por otro lado existe un deterioro físico por el trabajo continuado en un rigor ambiental para el cual no fueron diseñados, sumándole, la falta de piezas de repuesto.

En la empresa se están desarrollando trabajos con el fin de dar solución a la problemática actual, de forma rápida y económica y además que cumplan los requisitos de una distribución adecuada de la energía eléctrica con un suministro eléctrico con

calidad, estabilidad y fiabilidad, y lo más importante evitar pérdidas, que en esta empresa pueden ser elevadas.

Para el mejoramiento del factor de potencia, es necesario realizar gastos en instalaciones, costos de los equipos y potencia de consumo de la misma.

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 combustible 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 las plantas.

Tabla 3.1: Representación de los costos de la variante propuesta.

Descripción del banco	Potencia (kVAr)	Cantidad	Costo (CUC)
Tipo: VARI-10-200-400. Peso: 143 Kg.	371	2	\$ 25418.25
Flete Marítimo (USD)			\$ 2152.8
Seguro (USD)			\$ 215.6
Costo total de adquisición (USD)			\$ 27786.65

Si asumimos que la empresa paga \$ 0.29 USD 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.

$$\text{Ahorro/año} = C_e * E_a \quad (3.5)$$

Donde

C_e = costo de la energía

E_a = energía ahorrada

$$\text{Ahorro / año} = 0.29 * (10512)$$

$$\text{Ahorro / año} = 3048,48 \text{ U.S.D.}$$

Para generar 1kWh es necesaria 0.021 T de petróleo.

$$\text{Cantidad de petróleo} = 0.021 * 13\,228 \text{ kWh/Año.} \quad (3.6)$$

Cantidad de petróleo= 277,8 T

El precio del petróleo en el mercado mundial ha estado muy inestable, en el corte realizado el 10 de febrero del 2014 la tonelada estaba a 124,2 USD.

Costo= 34 558,32 USD

Con lo anterior se concluye que:

$$\text{Ahorro / año} = A_e + A_p. \quad (3.7)$$

Donde

A_e = ahorro/año por consumo de energía

A_p = ahorro/año por concepto de consumo de petróleo

Por lo que el ahorro/año total sería \$ 37606.8 USD

Las propuestas realizadas para mejorar la distribución no requieren de inversión adicional al costo de adquisición y transportación del banco de condensadores, la compensación de reactivo se amortizara a través de la energía ahorrada por este concepto.

$$T_{\text{Años}} = \frac{\text{Costo total de la inversión}}{\text{Ahorro} / \text{Año}} \quad (3.8)$$

$$T_{\text{años}} = 0.73$$

O sea aproximadamente 7 meses por lo que consideramos que la variante es factible desde el punto de vista económico.

3.9 Conclusiones del capítulo.

1. La capacidad del banco para compensar el reactivo de la carga es de 371 kVAr.
2. Se logran mejoras sustentables de las variables del sistema después de aplicar la compensación.
3. La inversión se amortiza en 7 meses.

CONCLUSIONES GENERALES

1. Se detectó que la principal deficiencia es el bajo factor de potencia debido a que las cargas que se alimentan de la subestación antes mencionada trabajan en régimen subcargados.
2. Sugiriendo la conexión de un banco de condensadores automático en paralelo en cada una de las secciones de barra de la subestación 1TP-10 donde mejorarían el factor de potencia hasta 0.98.
3. Los cálculos realizados en este estudio dieron como resultado la eficacia de este banco de condensadores automático, mejora teóricamente el factor de potencia, donde al tenerse un mejor factor de potencia representa un ahorro de \$ 37606.8 USD en una amortización de 7 meses.

RECOMENDACIONES

1. Aplicar los resultados obtenidos en la investigación a la subestación caso de estudio.
2. Desarrollar un estudio similar en el resto de las subestaciones de la industria.
3. Utilizar el presente trabajo como referencia bibliográfica para futuras investigaciones de este campo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. 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.
2. ESTRADA, G. H; TOVAR, J. H. Metodología para la localización óptima de condensadores Mediante Sensibilidades Lineales. *Revista del IEEE América Latina*. [en línea]. Disponible en:
<http://www.ewh.ieee.org/reg/9/etrans/vol3issue2April2005.htm>
3. FERNAO PIRES D, GOMES MARTINS A. and HENGGELER 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.
4. FEODOROV A. A; RODRIGEZ LOPEZ, E. Suministro Eléctrico de Empresas Industriales. Editorial Pueblo y Educación.
5. GONZALEZ P.I, RAMIREZ. M S. *"Compensación de la potencia reactiva en sistemas eléctricos"*. Revista Geología y Minería. 1999.
6. HERNANDEZ G. *"Eficiencia en el suministro eléctrico de baja tensión"*. Tesis de Maestría. 2000.
7. 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].
8. MALIUK S. *"Compensación de potencia reactiva en la producción"*. Stgo de Cuba. Edit.Oriente.1980.
9. ROMEU, R. A; *Aplicación de MATLAB para la compensación de potencia reactiva en redes de distribución de energía vía algoritmos genéticos. conferencia internacional FIE 2008, del Área de interés explotación que y optimización de Sistemas de Energía Eléctrica de la Universidad de Oriente, Santiago de Cuba.*
10. 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", [s.a].

11. VIEGO, P. F; Armas, M. A de. *Sistemas Eléctricos Industriales*. Universidad de Cienfuegos: Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente.
12. YING-YI HONG, and SAW -YU HO. "*Determination of Network Configuration Considering Multiobjective in Distribution Systems*". IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 20, No. 2, May 2005.
13. 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.

ANEXOS

Anexo 1: Representación de la planta Hornos de Reducción.

Anexo 2: Transformador de la subestación 1TP-10.

Anexo 3: Esquema monolineal del sistema eléctrico de la planta Hornos de Reducción.

Anexo 4: Subestación 1TP-10.

Anexo 5: Líneas de producción.

Anexo 6: Mediciones.

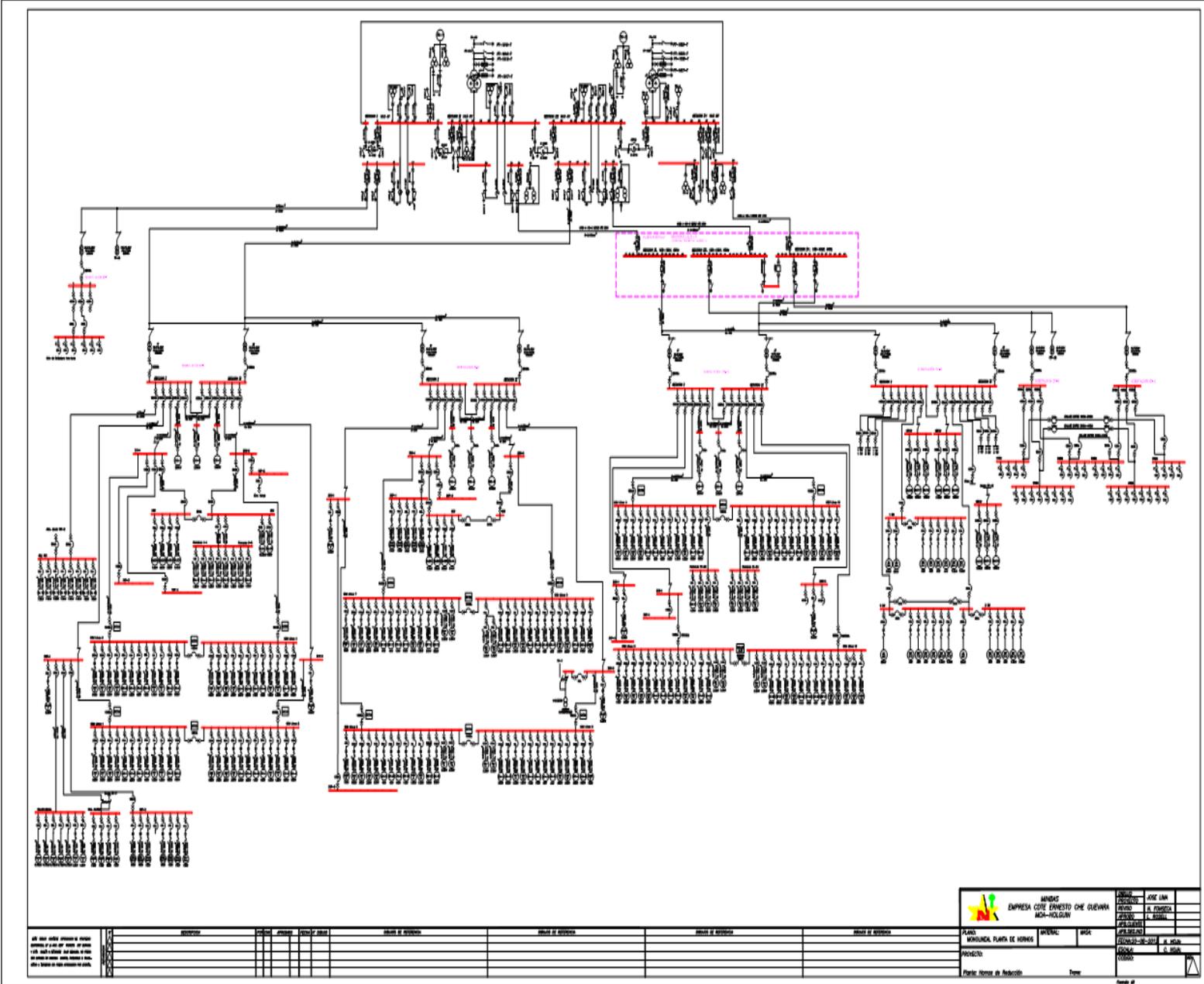
Anexo 1: Representación de la planta Hornos de Reducción.

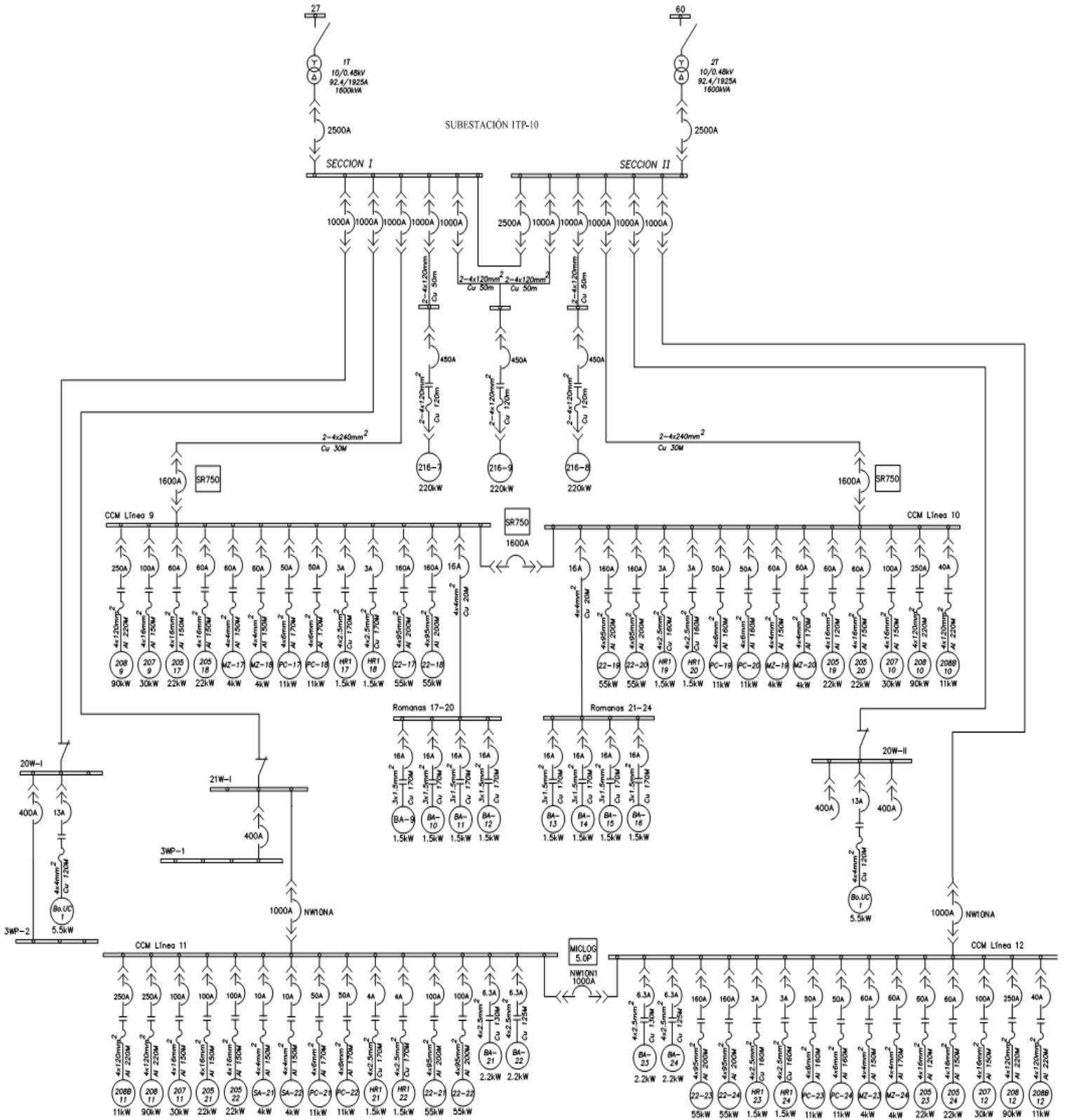


Anexo 2: Transformador de la subestación 1TP-10.



Anexo 3: Esquema monolineal del sistema eléctrico de la planta Hornos de Reducción.



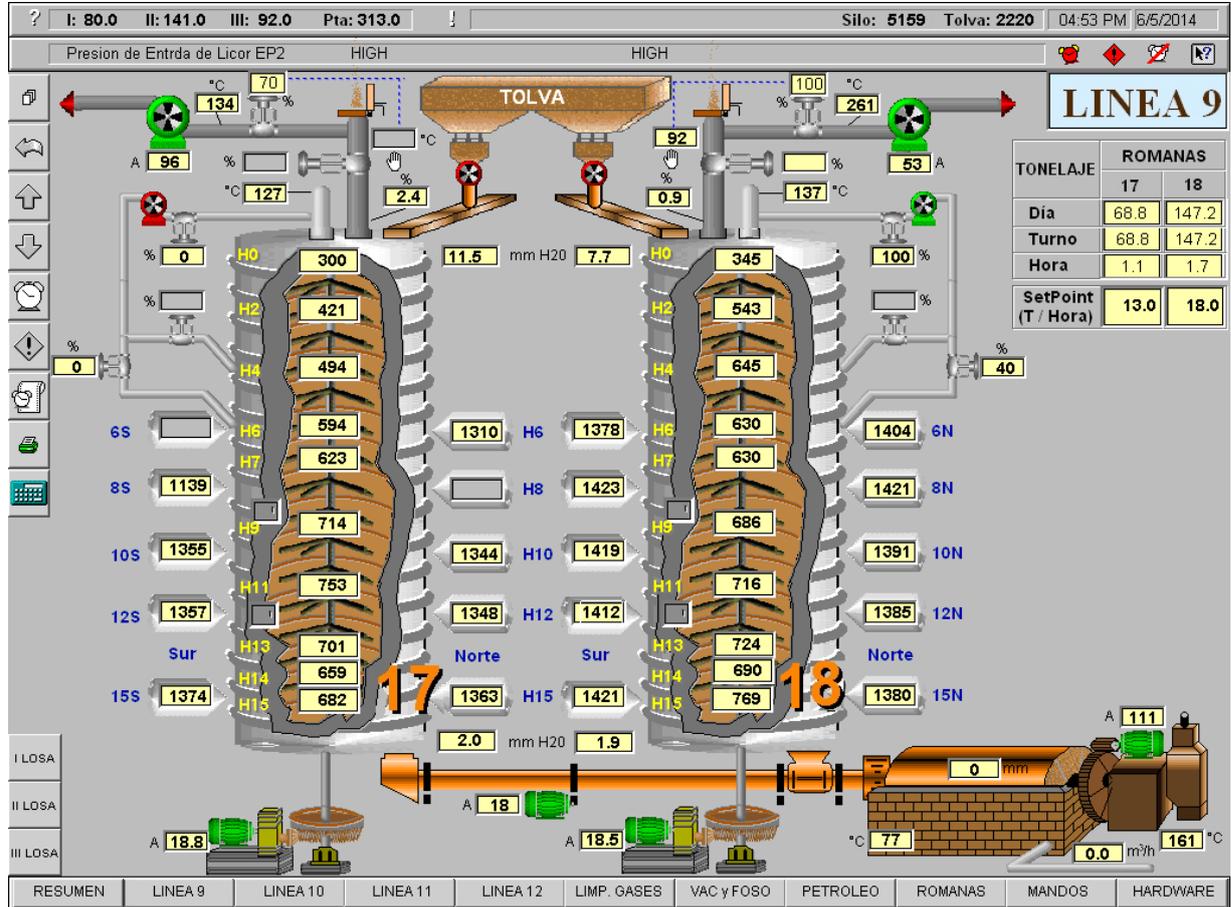


Anexo 4: Subestación 1TP-10.

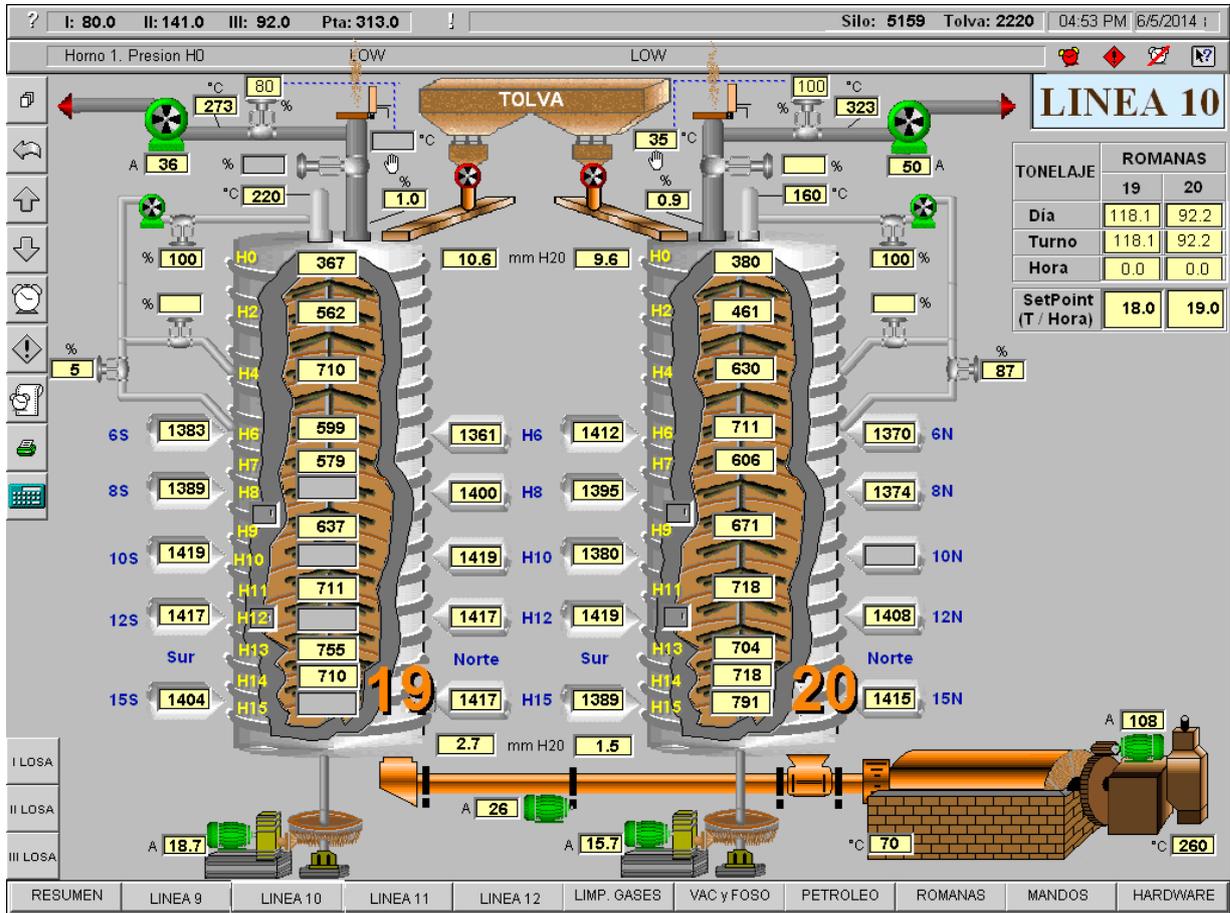


Anexo 5: Líneas de producción.

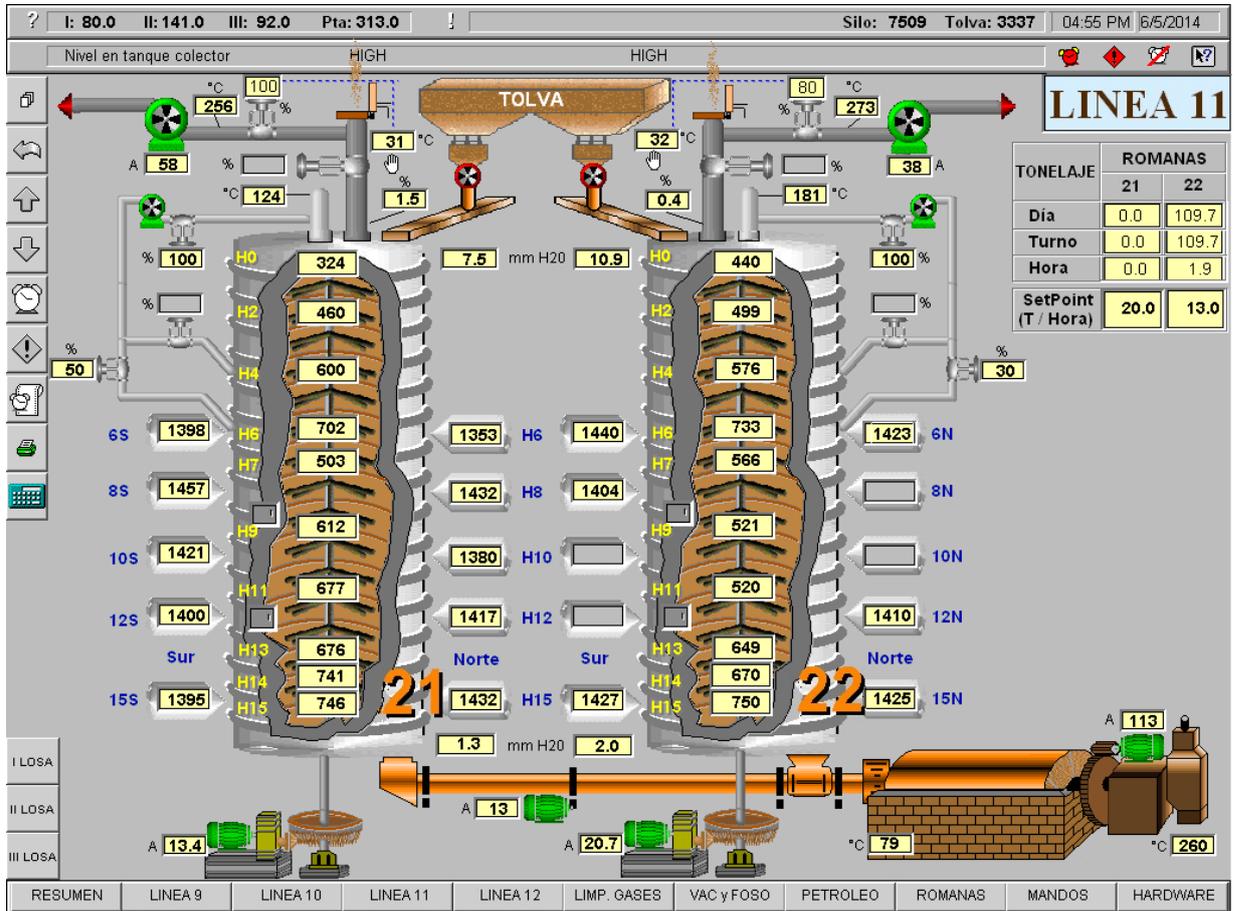
Línea 9



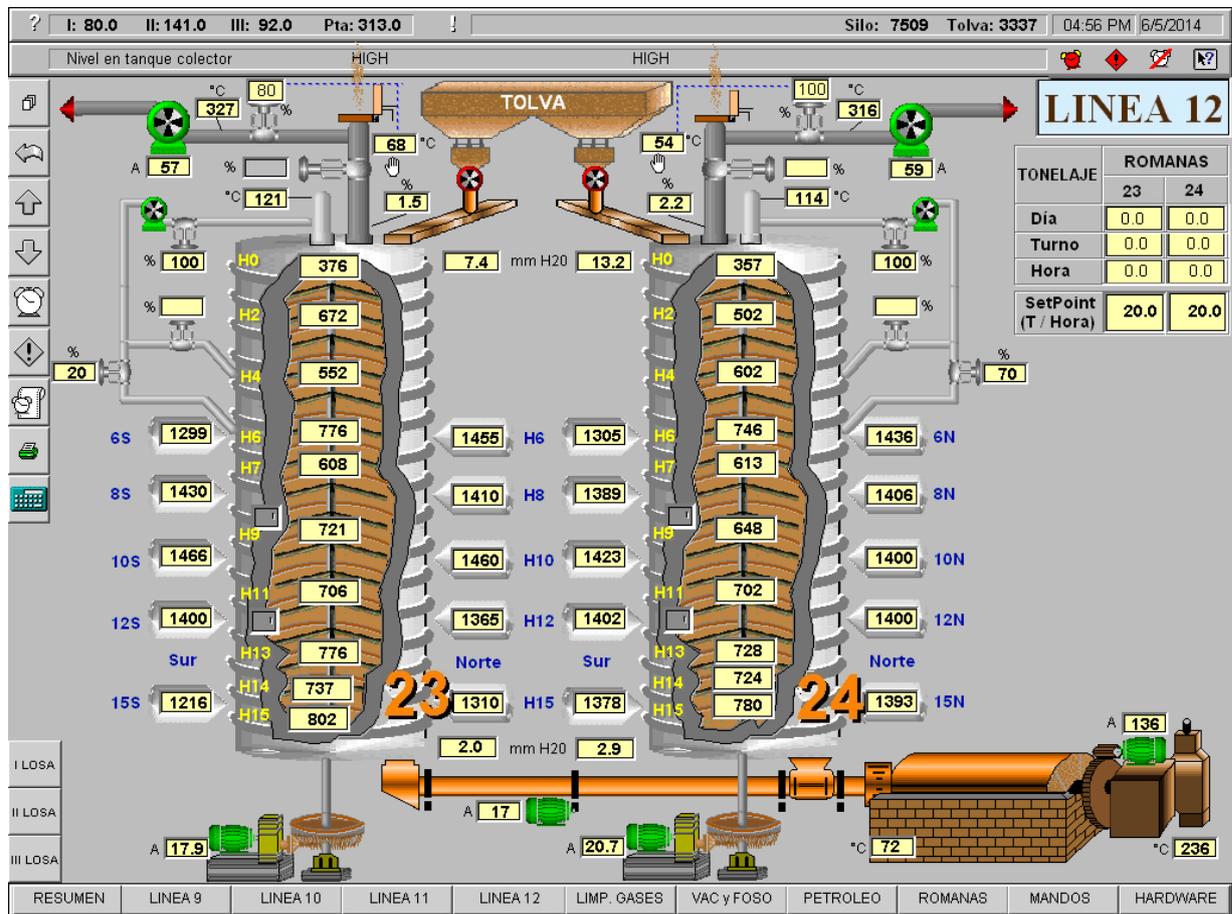
Línea 10



Línea 11



Línea 12



Anexo 6: Mediciones

Mediciones que se realizaron en la planta en la subestación 1TP-10.

Medic. No	T (s)	Ia (A)	Ib (A)	Ic (A)	P3 (kW)	Q3 (kVAr)	S3 (kVA)	Fp (FP)
1	0	229	229	231	132.13	122.13	179.93	0.73
2	1	230	229	232	132.92	122.48	180.77	0.74
3	2	228	227	230	130.3	123.18	179.31	0.73
4	3	228	227	230	130.14	123.24	179.26	0.73
5	4	232	231	233	133.69	123.58	182.06	0.73
6	5	237	236	238	136.67	126.2	186.05	0.73
7	6	237	236	239	138.02	124.53	185.91	0.74
8	7	237	235	238	137.88	125.55	186.52	0.74
9	8	238	237	240	138.4	126.54	187.54	0.74
10	9	238	237	239	138.38	126.5	187.49	0.74
11	10	232	231	233	133.67	124.33	182.55	0.73
12	11	233	233	235	134.66	124.5	183.41	0.73
13	12	231	229	132	132.8	122.78	180.92	0.73
14	13	236	235	237	136.98	124.64	185.2	0.74
15	14	231	230	232	132.52	123.59	181.22	0.73
16	15	232	231	233	133.29	124.11	182.13	0.73
17	16	233	232	234	133.99	124.81	183.15	0.73
18	17	230	230	232	131.78	125.65	182.1	0.72
19	18	230	230	232	132.53	123.95	181.46	0.73
20	19	231	230	232	131.96	124.39	181.36	0.73
21	20	247	246	249	146.1	128.91	194.92	0.75
22	21	235	234	237	136.31	125.08	185.04	0.74
23	22	234	233	236	135.45	125.52	184.67	0.73
24	23	238	237	240	138.55	125.91	187.24	0.74
25	24	240	239	242	139.92	127.04	189.02	0.74
26	25	242	241	244	143.01	126.2	190.74	0.75
27	26	238	236	239	138.29	126.43	187.39	0.74
28	27	236	235	238	137.36	125.61	186.14	0.74
29	28	232	231	233	132.91	125.35	182.69	0.73
30	29	237	236	239	138.26	125.84	186.97	0.74
31	30	231	229	232	133.07	123.77	181.74	0.73
32	31	239	238	241	138.39	128.21	188.65	0.73
33	32	234	233	235	135.05	125.45	184.35	0.73
34	33	230	228	232	131.07	123.74	180.27	0.73
35	34	247	246	249	146.45	128.84	195.09	0,75
36	35	248	247	249	147.57	128.12	195.42	0.76
37	36	245	243	246	143.08	128.79	193.05	0.74

38	37	239	238	240	138.57	127.87	188.6	0.73
39	38	234	232	235	135.03	125.85	184.62	0.73
40	39	236	234	237	136.97	126.42	186.4	0.73
41	40	231	230	233	133.16	123.07	181.34	0,73
42	41	235	235	238	136.73	124.13	184.67	0.74
43	42	231	232	234	133.2	124.11	182.06	0.73
44	43	222	221	224	126.47	118.8	173.53	0.73
45	44	230	228	231	131.02	122.75	179.55	0.73
46	45	224	223	226	127.43	119.92	174.99	0.73
47	46	231	230	233	133.23	122.07	180.71	0.74
48	47	221	221	223	125.44	119.46	173.24	0.72
49	48	230	229	232	132.53	122.08	180.19	0.74
50	49	226	224	227	128.68	121.25	176.8	0.73
51	50	224	223	226	127.33	121.25	175.83	0.72
52	51	222	220	223	124.99	120.38	173.57	0.72
53	52	223	222	225	126.94	120.37	174.95	0.73
54	53	228	227	230	130.85	121.48	178.56	0.73
55	54	223	222	225	126.16	121.12	174.91	0.72
56	55	229	228	232	132.24	121.4	179.53	0.74
57	56	225	225	228	130.22	119.99	177.09	0.74
58	57	221	221	224	125.86	120.22	174.06	0.72
59	58	221	220	223	124.83	120.62	173.59	0.72
60	59	220	219	222	124.54	120.28	173.15	0.72
61	60	225	224	228	128.14	122.69	177.41	0.72
62	61	224	224	226	128.66	120.3	176.15	0.73
63	62	222	221	224	126.31	120.71	174.72	0.72
64	63	224	224	227	128.7	121.04	176.67	0.73
65	64	227	226	230	130.03	122.4	178.57	0.73
66	65	225	224	227	128.26	120.49	175.99	0.73
67	66	218	217	220	122.64	119.13	171.06	0.72
68	67	222	222	224	125.72	121.74	175.04	0.72
69	68	221	221	224	125.86	120.22	174.06	0.72
70	69	221	220	223	124.83	120.62	173.59	0.72
71	70	220	219	222	124.54	120.28	173.15	0.72
72	71	225	224	228	128.14	122.69	177.41	0.72
73	72	224	224	226	128.66	120.3	176.15	0.73
74	73	222	221	224	126.31	120.71	174.72	0.72
75	74	224	224	227	128.7	121.04	176.67	0.73
76	75	227	226	230	130.03	122.4	178.57	0.73
77	76	225	224	227	128.26	120.49	175.99	0.73
78	77	218	217	220	122.64	119.13	171.06	0.72

79	78	222	222	224	125.72	121.74	175.04	0.72
80	79	226	226	229	129.74	122.38	178.37	0.73
81	80	223	222	225	126.65	120.41	174.78	0.72
82	81	223	221	224	126.32	120.89	174.85	0.72
83	82	220	220	222	124.41	120.53	173.22	0.72
84	83	226	225	228	128.98	121.56	177.25	0.73
85	84	220	219	222	125.11	119.2	172.81	0.72
86	85	218	218	221	122.17	120.4	171.58	0.71
87	86	218	217	221	123.18	119.21	171.43	0.72
88	87	221	220	223	126.37	118.65	173.35	0.73
89	88	222	222	225	125.92	120.42	174.29	0.72
90	89	222	221	223	125.51	120.02	173.67	0.72
91	90	222	221	224	125.53	120.06	173.72	0.72
92	91	227	226	229	130.8	120.27	177.72	0.74
93	92	223	221	225	126.33	119.81	174.11	0.73
94	93	222	221	224	126.47	118.8	173.53	0.73
95	94	230	228	231	131.02	122.75	179.55	0.73
96	95	224	223	226	127.43	119.92	174.99	0.73
97	96	231	230	233	133.23	122.07	180.71	0.74
98	97	221	221	223	125.44	119.46	173.24	0.72
99	98	230	229	232	132.53	122.08	180.19	0.74
100	99	226	224	227	128.68	121.25	176.8	0.73
101	100	224	223	226	127.33	121.25	175.83	0.72
102	101	222	220	223	124.99	120.38	173.57	0.72
103	102	223	222	225	126.94	120.37	174.95	0.73
104	103	228	227	230	130.85	121.48	178.56	0.73
105	104	223	222	225	126.16	121.12	174.91	0.72
106	105	229	228	232	132.24	121.4	179.53	0.74
107	106	230	229	232	132.88	121.95	180.37	0.74
108	107	231	230	233	134.15	121.6	181.07	0.74
109	108	230	229	232	131.94	122.36	179.96	0.73
110	109	230	229	232	131.75	122.61	179.99	0.73
111	110	227	226	228	129.08	122.13	177.7	0.73
112	111	228	227	230	130.36	122.28	178.75	0.73
113	112	235	234	237	136.52	123.1	183.83	0.74
114	113	227	226	229	129.75	122.77	178.64	0.73
115	114	228	227	230	130.77	122.58	179.26	0.73
116	115	228	227	230	130.26	122.61	178.88	0.73
117	116	229	228	231	132.13	122.13	179.93	0.73
118	117	230	229	232	132.92	122.48	180.77	0.74
119	118	228	227	230	130.3	123.18	179.31	0.73

120	119	228	227	230	130.14	123.24	179.26	0.73
121	120	236	235	237	136.98	124.64	185.2	0.74
122	121	232	230	233	134.22	122.79	181.93	0.74
123	122	231	229	232	132.8	122.78	180.92	0.73
124	123	233	233	235	134.66	124.5	183.41	0.73
125	124	232	231	233	133.69	123.58	182.06	0.73
126	125	231	230	232	132.52	123.59	181.22	0.73
127	126	232	231	233	133.29	124.11	182.13	0.73
128	127	233	232	234	133.99	124.81	183.15	0.73
129	128	237	236	238	136.67	126.2	186.05	0.73
130	129	230	228	232	131.07	123.74	180.27	0.73
131	130	237	236	239	138.02	124.53	185.91	0.74
132	131	231	230	232	131.96	124.39	181.36	0.73
133	132	230	230	232	132.53	123.95	181.46	0.73
134	133	230	230	232	131.78	125.65	182.1	0.72
135	134	237	235	238	137.88	125.55	186.52	0.74
136	135	238	237	240	138.4	126.54	187.54	0.74
137	136	238	237	239	138.38	126.5	187.49	0.74
138	137	232	231	233	133.67	124.33	182.55	0.73
139	138	234	233	235	135.05	125.45	184.35	0.73
140	139	239	238	241	138.39	128.21	188.65	0.73
141	140	231	229	232	133.07	123.77	181.74	0.73
142	141	237	236	239	138.26	125.84	186.97	0.74
143	142	240	239	242	139.92	127.04	189.02	0.74
144	143	232	231	233	132.91	125.35	182.69	0.73
145	144	238	237	240	138.55	125.91	187.24	0.74
146	145	236	235	238	137.36	125.61	186.14	0.74
147	146	234	233	236	135.45	125.52	184.67	0.73
148	147	238	236	239	138.29	126.43	187.39	0.74
149	148	235	234	237	136.31	125.08	185.04	0.74
150	149	242	241	244	143	126.2	190.74	0.75
151	150	247	246	249	146.1	128.91	194.92	0.75
152	151	247	246	249	146.45	128.84	195.09	0.75
153	152	248	247	249	147.57	128.12	195.42	0.76
154	153	245	243	246	143.8	128.79	193.05	0.74
155	154	239	238	240	138.57	127.87	188.6	0.73
156	155	234	232	235	135.03	125.85	184.62	0.73
157	156	236	234	237	136.97	126.42	186.4	0.73
158	157	236	234	237	137.03	127.23	187	0.73
159	158	237	236	239	137.08	128.96	188.2	0.73
160	159	235	234	236	135.97	127.44	186.37	0.73

161	160	219	218	220	124.16	121.29	173.57	0.72
162	161	225	224	226	128.98	123.58	178.64	0.72
163	162	220	218	221	124.1	122.97	174.72	0.71
164	163	225	224	227	128.07	125.18	179.11	0.72
165	164	224	223	226	128.96	123.48	178.55	0.72
166	165	223	221	224	127.47	122.64	176.89	0.72
167	166	228	226	230	130.84	124.87	180.89	0.72
168	167	224	223	226	128.4	122.95	177.78	0.72
169	168	221	219	222	125.13	122.49	175.15	0.71
170	169	222	221	223	126.6	122.93	176.46	0.72
171	170	221	219	222	126.18	122.17	175.64	0.72
172	171	225	223	226	127.92	124.32	178.38	0.72
173	172	220	218	221	124.09	122.91	174.67	0.71
174	173	218	217	219	123.64	121.87	173.6	0.71
175	174	219	218	221	123.23	123.08	174.19	0.71
176	175	225	225	227	129.96	123.06	179.04	0.73
177	176	215	214	217	120.51	121.89	171.42	0.7
178	177	214	213	215	119.44	121.03	170.07	0.7
179	178	216	215	218	121.28	121.66	171.78	0.71
180	179	219	218	221	124.09	122.62	174.45	0.71
181	180	220	218	221	124.51	122.83	174.93	0.71
182	181	211	210	212	117.17	120.71	168.23	0.7
183	182	214	212	215	119.15	121.26	170.01	0.7
184	183	213	212	214	119.13	119.99	169.12	0.7
185	184	217	215	218	121.49	121.73	172	0.71
186	185	213	212	214	118.34	121.32	169.49	0.7
187	186	214	212	215	119.42	120.29	169.55	0.7
188	187	213	211	213	119.02	119.33	168.53	0.71
189	188	217	215	217	122.06	121.04	171.95	0.71
190	189	213	212	214	119.07	120.31	169.29	0.7
191	190	213	212	214	119.79	119.79	169.41	0.71
192	191	218	216	219	123.08	121.64	173.05	0.71
193	192	215	214	216	121.63	119.93	170.81	0.71
194	193	211	210	212	118.17	119.04	167.74	0.7
195	194	214	212	215	119.62	120.86	170.07	0.7
196	195	214	212	215	119.54	120.69	169.9	0.7
197	196	212	211	214	117.73	120.45	168.45	0.7
198	197	215	213	215	121.01	119.88	170.34	0.71
199	198	207	205	207	113.22	118.47	163.89	0.69
200	199	212	211	213	117.28	121	168.52	0.7
201	200	209	207	209	114.53	119.89	165.84	0.69

202	201	211	210	212	117.2	119.89	167.69	0.7
203	202	205	203	205	111.71	118.31	162.73	0.69
204	203	203	202	204	110.41	117.6	161.34	0.68
205	204	211	209	211	117.06	119.57	167.38	0.7
206	205	210	208	210	116.38	119.05	166.5	0.7
207	206	210	208	210	116.53	118.75	166.39	0.7
208	207	206	205	207	114.02	117.07	163.44	0.7
209	208	205	203	205	112.01	117.14	162.25	0.69
210	209	207	205	207	113.26	118.25	163.77	0.69
211	210	203	202	204	110.84	117.34	161.41	0.69
212	211	207	206	208	114.47	117.48	164.04	0.7
213	212	206	204	207	112.59	118.65	163.59	0.69
214	213	206	205	207	113.54	117.49	163.45	0.69
215	214	208	207	209	115.8	117.74	165.28	0.7
216	215	209	208	210	116.43	117.61	165.57	0.7
217	216	212	210	213	119.16	118.63	168.16	0.71
218	217	205	203	205	111.57	118.21	162.61	0.69
219	218	204	203	205	111.97	117.29	162.18	0.69
220	219	204	202	205	110.61	118.15	161.86	0.68
221	220	210	209	211	115.76	119.68	166.68	0.69