



**Universidad
Técnica de
Cotopaxi**

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

**CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE
POTENCIA**

PROPUESTA TECNOLÓGICA

TEMA:

**“ALGORITMO AUTOMÁTICO PARA LA CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA
EN REDES INDUSTRIALES”**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO ELÉCTRICO**

AUTORES:

FREIRE RODRÍGUEZ ABEL ELOY

PICO JIMÉNEZ JEYSON ALEXANDER

TUTOR:

PhD. SECUNDINO MARRERO RAMÍREZ

LATACUNGA – ECUADOR

2019



DECLARACIÓN DE AUTORÍA

“Nosotros Abel Eloy Freire Rodríguez y Jeyson Alexander Pico Jiménez declaro ser autor del presente proyecto tecnológico: **ALGORITMO AUTOMÁTICO PARA LA CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA EN REDES INDUSTRIALES**, siendo el PhD. Secundino Marrero Ramírez tutor del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Abel Eloy Freire Rodríguez
C.I.: 1803837440

Jeyson Alexander Pico Jiménez
C.I.: 1501104085



AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN

En calidad de Tutor del Trabajo de Propuesta Tecnológica sobre el título:

“ALGORITMO AUTOMÁTICO PARA LA CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA EN REDES INDUSTRIALES”, de Abel Eloy Freire Rodríguez y Jeyson Alexander Pico Jiménez, considero que dicho Informe Investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyecto que el Consejo Directivo de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, febrero de 2019

Tutor

PhD. Secundino Marrero Ramírez
C.I.: 175710740-7
TUTOR DE PROPUESTA TECNOLÓGICA



APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas; por cuanto, los postulantes: Abel Eloy Freire Rodríguez y Jeyson Alexander Pico Jiménez con el título de Propuesta Tecnológica: **ALGORITMO AUTOMÁTICO PARA LA CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA EN REDES INDUSTRIALES**. Han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Sustentación de Proyecto.

Por lo antes expuesto, se autoriza realizar los empastados correspondientes, según la normativa institucional.

Latacunga, 07 de febrero de 2019

Para constancia firman:

Lector 1
Msc. Carlos Pacheco
C.I.: 0503072902

Lector 2
PhD. Iliana González
C.I.: 1757070659

Lector 3
Msc. Marco León
CC: 0502305402



AVAL DE IMPLEMENTACIÓN

En calidad de director de la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Técnica de Cotopaxi certifico que mediante la propuesta tecnológica: **“ALGORITMO AUTOMÁTICO PARA LA CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA EN REDES INDUSTRIALES”** de los señores; FREIRE RODRÍGUEZ ABEL ELOY y PICO JIMÉNEZ JEYSON ALEXANDER, realizan la entrega de una herramienta informática con un módulo de control, en el laboratorio de la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Técnica de Cotopaxi.

Latacunga, febrero de 2019



Ph.D. Secundino Marrero

C.I.: 175710740-7

Director de la Carrera de Ingeniería Eléctrica

AGRADECIMIENTO

En primera instancia quiero agradecer al Dr. Secundino Marrero por impartirme su conocimiento, por la confianza depositada y el apoyo incondicional que me supo dar para la realización de este proyecto, un sincero reconocimiento a la Universidad Técnica de Cotopaxi ya que ahí pude formarme como profesional y tener conocimientos que me serán de suma importancia en mi vida laboral.

Eloy...

AGRADECIMIENTO

Primeramente, agradezco a Dios por darme salud, sabiduría y cuidado para poder hacer realidad este sueño y anhelo de mi vida.

A mi padre Carlos, por darme su apoyo y guiarme de la mejor manera, aconsejándome para poder ser una persona de bien.

A mi madre, la cual siempre ha estado alentándome en mis buenos y malos momentos, compartiendo su amor y sus valores para ser un hombre de bien.

A la Universidad Técnica de Cotopaxi, la cual me abrió las puertas para poder cumplir una meta trazada en mi vida.

A los ingenieros que formaron parte de mi formación transmitiendo sus conocimientos, experiencias de la mejor manera, para formarnos como personas y grandes profesionales.

Jeyson...

DEDICATORIA

Este proyecto de titulación va dedicado en primer lugar a Dios por llenarme de salud y sabiduría para culminar tan anhelado sueño, también gracias al apoyo, esfuerzo y perseverancia de mis padres Abel y Jenny que juntos con sus concejos supieron llenarme de valor, coraje y fuerza para guiarme y no rendirme a lo largo de este camino, a mis hermanas Verito y Andreita que a pesar de la distancia supieron brindarme incondicionalmente su cariño y apoyo moral en todo momento, a mis amigos con los que día a día compartía un salón de clase y fueron parte fundamental de mi vida en esta carrera universitaria, finalmente gracias a todas estas personas he logrado mi objetivo y estoy culminando otra etapa más en mi vida.

Eloy...

DEDICATORIA

A mis padres por el apoyo incondicional que me han brindado encaminándome correctamente pues ellos son el pilar fundamental para la culminación de esta etapa de mi vida, siendo testigos de mis triunfos y fracasos.

A las personas que me guiaron y asesoraron para llevar acabo el presente trabajo de titulación.

Jeyson...

ÍNDICE DE CONTENIDO

PORTADA	i
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	ii
AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN	iii
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN.....	iv
AVAL DE IMPLEMENTACIÓN.....	v
AGRADECIMIENTO	vi
DEDICATORIA.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
ÍNDICE DE ANEXOS	xiv
AVAL DE TRADUCCIÓN.....	xvii
1. INFORMACIÓN BÁSICA	1
2. DISEÑO INVESTIGATIVO DE LA PROPUESTA TECNOLÓGICA.....	1
2.1. Título de la propuesta tecnológica	1
2.2. Tipo de alcance	1
2.3. Área del conocimiento:	2
2.4. Sinopsis de la propuesta tecnológica	2
2.5. Objeto de estudio y campo de acción	2
2.5.1. Objeto de estudio.....	2
2.5.2. Campo de acción	2
2.6. Situación problémica y problema	2
2.6.1. Situación problémica.....	2
2.6.2. Problema.....	3
2.7. Hipótesis	3
2.8. Objetivo(s)	3
2.8.1. Objetivo general	3
2.8.2. Objetivos específicos.....	3
2.9. Descripción de las actividades y tareas propuestas con los objetivos establecidos	3
3. MARCO TEÓRICO	4
3.1. Aspectos teóricos de corrección del factor de potencia	4
3.1.1. Impedancia, resistencia, reactancia	4
3.1.2. Desfase entre las ondas de corriente y tensión	5

3.1.3. Potencia activa, reactiva y aparente	5
3.2. Triángulo de potencias	6
3.3. Consecuencias y Causas de un Bajo Factor de Potencia	7
3.3.1. Pérdidas en la Instalación	7
3.3.2. Caídas de Tensión	7
3.3.3. Baja utilización de la capacidad instalada	7
3.3.4. Principales consecuencias del bajo factor de potencia	8
3.3.5. Causas del bajo factor de potencia	8
3.4. Ventajas técnicas de la corrección del factor de potencia	8
3.4.1. Uso optimizado de las máquinas eléctricas	9
3.4.2. Reducción de las pérdidas	10
3.4.3. Reducción de la caída de tensión	11
3.5. Ventajas económicas de la corrección del factor de potencia	11
3.6. Tipos de corrección	12
3.6.1. Corrección distribuida	12
3.6.2. Corrección por grupos	13
3.6.3. Corrección centralizada	14
3.6.4. Corrección mixta	15
3.6.5. Corrección automática	15
3.7. Ubicación de los bancos de capacitores	15
3.7.1. Programación lineal	16
3.7.2. Programación dinámica	17
3.7.3. Métodos heurísticos	20
3.7.4. Métodos basados en inteligencia artificial	20
3.7.5. Regla de los 2/3	20
3.7.6. Método gráfico	20
3.8. Algoritmo Genético	21
3.8.1. Los algoritmos genéticos en la solución de problemas de optimización	21
3.9. Calidad del servicio eléctrico de distribución (REGULACIÓN 004-01)	22
3.9.1. Índice de calidad	22
3.9.2. Medición	22
3.9.3. Límite	23
3.10. MARCO REFERENCIAL	23

3.10.1. Creación de apps con interfaces gráficas de usuario en MATLAB	23
3.10.2. Creación de una GUI de MATLAB de forma interactiva	23
3.10.3. Programa	24
3.11. Simulaciones	25
3.11.1. Caso base 1	25
3.11.2. Caso base 2	27
4. METODOLOGÍA	28
4.1. Métodos de investigación	28
4.1.1. Método analítico	28
4.1.2. Método experimental	28
4.2. Tipos de investigación	28
4.2.1. Investigación Bibliográfica	28
4.2.2. Investigación cuantitativa	28
4.2.3. Investigación Tecnológica	28
4.3. Técnicas e instrumentos	28
4.4. Método experimental (Instrumentos de medición)	29
4.4.1. Modelamiento y simulación (Software y Hardware)	29
5. IMPLEMENTACIÓN	29
5.1. Preparación e ingreso de datos	31
5.2. Arduino	33
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS	33
7. PRESUPUESTO Y ANÁLISIS DE IMPACTOS	35
7.1. Análisis de impactos	35
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	37
7.1. Conclusiones	37
7.2. Recomendaciones	37
8. REFERENCIAS	38

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Actividades de los objetivos.	3
Tabla 3.1. Valores del factor de potencia.	6
Tabla 3.2. Variación de potencia de los transformadores en función del $\cos\phi$	10
Tabla 4.1. Técnicas e instrumentos de investigación.	28
Tabla 6.1. Percentage de error	34
Tabla 7.1. Flujo de caja de la propuesta	35

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. Factor de potencia $\cos\phi = PS$	6
Figura 3.2. Desfasamiento.....	7
Figura 3.3. Sistema de Corrección del Factor de Potencia.....	9
Figura 3.4. Esquemas usuales de conexión para la corrección del factor de potencia de motores.	13
Figura 3.5. Corrección por grupos.....	14
Figura 3.6. Corrección centraliza.	14
Figura 3.7. Interfaz de usuario GUIDE.	24
Figura 3.8. Circuito de prueba.....	25
Figura 3.9. Programa.	25
Figura 3.10. Circuito del caso base 1.	26
Figura 5.1. Interfaz gráfica (ventana inicial).....	30
Figura 5.2. Botones (ventana inicial).	30
Figura 5.3. Ventana de flujos de potencia.	31
Figura 5.4. Ingreso de los datos de las barras.....	31
Figura 5.5. Ingreso de datos de las líneas.....	32
Figura 5.6. Datos ingresados de las barras y líneas.....	32
Figura 5.7. Cálculo del factor de potencia.....	33
Figura 6.1. comparación del error con los resultados.....	34
Figura 6.2. % de error del programa propuesto.....	34

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo I. Resultado del caso base 1.....	41
Anexo III. Módulos capacitivos trifasicos WEG.....	43
Anexo IV. Reactancias y resistencias de referencia según el conductor utilizado para el programa propuesto.	44
Anexo V. Ingreso de datos en el programa propuesto	45
Anexo VI. Resultados de la opción 1 correccion del factor de potencia.	45
Anexo VII. Resultados de la opción 2 correccion del factor de potencia.....	46
Anexo VIII. Resultados de la opción 3 correccion del factor de potencia.	46
Anexo IX. Circuito del arduino.....	47
Anexo X. Esquema del arduino.....	47
Anexo XI. Guía de usuario del programa.	48

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

TÍTULO: “ALGORITMO AUTOMÁTICO PARA LA CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA EN REDES INDUSTRIALES”

Autores: Abel Eloy Freire Rodríguez
Jeyson Alexander Pico Jiménez

RESUMEN

En las industrias existen bancos de capacitores en la entrada del suministro de energía eléctrica para la corrección del factor de potencia según los requerimientos de la compañía suministradora de energía.

Entonces el problema consiste en los bancos de capacitores ubicados en el suministro de energía, no corrigen las pérdidas técnicas aguas abajo dentro de la industria producidas por la corriente de pérdidas.

El conocer el punto más adecuado para mejorar de forma óptima el factor de potencia se puede obtener con la aplicación de una herramienta informática que sea rápida y efectiva. Es por ello que se diseñó un software en Matlab que permita mejorar el factor de potencia en redes industriales.

Mediante el software en Matlab se planteó un algoritmo que se fundamenta en la búsqueda de reducción de los costos en el cual incurre la Industria, debido a la alícuota de la factura por servicio eléctrico conocido como cargo por demanda, presentada por la empresa suministradora. Este cargo por demanda que está compuesta por una fracción reactiva forma parte de la demanda total facturada, aunque no es una potencia útil de igual manera representa un costo importante en la planilla del servicio eléctrico. Por eso desarrollamos esta herramienta informática con la que conseguimos la reducción y la ubicación más eficiente de bancos de capacitores en redes industriales.

Palabras clave: Software, Optimo, Algoritmo, Capacitores.

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI

FACULTY OF ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES

THEME: "AUTOMATIC ALGORITHM FOR POWER FACTOR CORRECTION INTO INDUSTRIAL NETWORKS"

Authors: Abel Eloy Freire Rodríguez
Jeyson Alexander Pico Jiménez

ABSTRACT

In the industries, there are capacitor banks at the entrance of the electric power supply for POWER FACTOR CORRECTION according to the requirements of the energy supplier company.

Then, the problem is found at the capacitor banks located in the power supply since they do not correct the technical losses downstream, within the industry, produced by the core-loss current.

Knowing the most appropriate point to improve the power factor optimally can be obtained with the application of a computer tool that is fast and effective. That is why the software was designed in Matlab that allows improving the power factor in industrial networks.

Through the software in Matlab, an algorithm was proposed which is based on the search for a cost reduction incurred by the industry, due to the aliquot of the electric service bill known as the demand charge, presented by the supplier company. This demand charge that is composed of a reactive fraction is part of the total demand billed; although it is not a useful power, it also represents a significant cost in the electricity service form. That is the reason why the researchers developed that computer tool with which they achieved the reduction and the most efficient location of capacitor banks into industrial networks.

Keywords: Software, Optimum, Algorithm, Capacitors.



Universidad
Técnica de
Cotopaxi

CENTRO DE IDIOMAS

AVAL DE TRADUCCIÓN

En calidad de Docente del Idioma Inglés del Centro de Idiomas de la Universidad Técnica de Cotopaxi; en forma legal **CERTIFICO** que: La traducción del resumen de la Propuesta Tecnológica al Idioma Inglés presentado por los señores Egresados de la Carrera de **INGENIERÍA ELÉCTRICA** de la Unidad Académica de **CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS: FREIRE RODRÍGUEZ ABEL ELOY Y PICO JIMÉNEZ JEYSON ALEXANDER**, cuyo título versa “**ALGORITMO AUTOMÁTICO PARA LA CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA EN REDES INDUSTRIALES**”, lo realizaron bajo mi supervisión y cumple con una correcta estructura gramatical del Idioma.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad y autorizo a los peticionarios hacer uso del presente certificado de la manera ética que estimaren conveniente.

Latacunga, Febrero del 2019

Atentamente,

Lcdo. Mg. COLLAGUAZO VEGA WILMER PATRICIO
DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS
C.C. 1722417571



CENTRO
DE IDIOMAS

1. INFORMACIÓN BÁSICA

Propuesto por:

Abel Eloy Freire Rodríguez

Jeyson Alexander Pico Jiménez

Tema aprobado:

ALGORITMO AUTOMÁTICO PARA LA CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA EN REDES INDUSTRIALES

Carrera:

Ingeniería Eléctrica en SEP

Director de la propuesta tecnológica:

PhD. Secundino Marrero Ramírez

Equipo de trabajo:

Asesores técnicos: PhD. Secundino Marrero Ramírez

Lugar de ejecución:

Barrio El Ejido, Parroquia Eloy Alfaro, Provincia de Cotopaxi, Zona 3, Universidad Técnica de Cotopaxi.

Tiempo de duración de la propuesta: 1 año.

Fecha de entrega: 21 de febrero de 2019.

Línea de investigación:

Energías alternativas y renovables, eficiencia energética y protección ambiental.

Sub líneas de investigación de la carrera:

Explotación y diseño de Sistemas eléctricos de potencia.

Tipo de propuesta tecnológica:

Producto

2. DISEÑO INVESTIGATIVO DE LA PROPUESTA TECNOLÓGICA

2.1. Título de la propuesta tecnológica

ALGORITMO AUTOMÁTICO PARA LA CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA EN REDES INDUSTRIALES.

2.2. Tipo de alcance

Desarrollo: Desarrollo de una aplicación informática para el control automático del factor de potencia en redes industriales.

2.3. Área del conocimiento:

Ingeniería, industria y construcción.

2.4. Sinopsis de la propuesta tecnológica

Diseñar el algoritmo que permita una selección óptima del banco de compensación en una red industrial a partir de las demandas de reactivos que pueden existir en los diferentes nodos dando una respuesta a los valores a colocar en función de la demanda de reactivos que se tiene en toda la red garantizando que en el nodo principal de entrada exista un factor de potencia de acuerdo a la regulación de calidad de servicio eléctrico de distribución (Regulación 004-01).

2.5. Objeto de estudio y campo de acción

2.5.1. Objeto de estudio

Estudio de la corrección del factor de potencia en una Red Industrial.

2.5.2. Campo de acción

Automatización y Eficiencia energética.

2.6. Situación problémica y problema

2.6.1. Situación problémica

El presente trabajo de investigación busca mejorar el sistema eléctrico de una red industrial mediante la utilización óptima del banco de capacitores y con eso conseguimos controlar automáticamente su utilización mediante un algoritmo automático.

Las cargas eléctricas industriales en su naturaleza son de carácter inductivo a causa de la presencia de equipos de alto componente reactivo como motores, entre otros. Este carácter reactivo obliga que junto al consumo de potencia activa (kW) se sume el de la potencia reactiva (kVAR), las cuales en conjunto determinan el comportamiento operacional de dichos equipos y motores.

Se han establecido tarifas de energía que de alguna manera penalice el consumo de energía reactiva, estimulando que los consumidores contribuyan en la eficiencia del factor de potencia.

Los bancos de capacitores ubicados en el transformador principal de la Industria no corrigen las pérdidas técnicas dentro de la industria producida por la corriente que consumen los equipos que presentan un factor de potencia atrasado.

Para conocer el punto más adecuado de los bancos de capacitores se va realizar a través de una herramienta informática que en dependencia de los niveles de voltaje en el nodo y los valores de potencia reactiva, seleccionará el valor adecuado de compensación.

Los bancos de capacitores se pueden ubicar en diferentes nodos teniendo en cuenta que influyen en el perfil de voltaje por lo cual es necesario correr un flujo de potencia en cada nodo para respetar las restricciones de sobre voltaje y análisis de resonancia.

2.6.2. Problema

Insuficiencia que presenta los sistemas de compensación de reactivos en redes industriales que no consideran la interacción de bancos de capacitores en los diferentes nodos de la red cuando de forma automática se procede a compensar en el punto de conexión común considerando otros nodos de la red.

2.7. Hipótesis

Si se diseña un algoritmo para realizar un control automático de la conexión y desconexión de los bancos de compensación en diferentes nodos de la red. Entonces será posible tener un sistema de compensación mucho más eficiente que los sistemas convencionales

2.8. Objetivo(s)

2.8.1. Objetivo general

Realizar un algoritmo para analizar las variables eléctricas que permita mejorar de forma óptima el factor de potencia automáticamente en una red industrial mediante la aplicación de una herramienta informática.

2.8.2. Objetivos específicos

- Realizar un estudio bibliográfico acerca de los sistemas de compensación automatizados.
- Evaluar las demandas de reactivos en diferentes nodos de la red para elaborar un algoritmo de programación que permita el funcionamiento conciliado de diferentes bancos de capacitores.
- Realizar distintas simulaciones para garantizar el correcto funcionamiento del algoritmo programación mediante la comparación de un método convencional.

2.9. Descripción de las actividades y tareas propuestas con los objetivos establecidos

Tabla 2.1. Actividades de los objetivos.

Objetivo	Actividad	Resultado de la actividad	Descripción de la actividad (técnicas e instrumentos)
Realizar un estudio bibliográfico acerca de los sistemas de	Investigación bibliográfica.	Recopilación de información necesaria para la	Realización de una investigación bibliográfica mediante artículos relacionados al tema,

compensación automatizados.		realización del proyecto.	páginas web, manuales, documentos, normas y estándares sobre los bancos de capacitores.
Evaluar las demandas de reactivos en diferentes nodos de la red para elaborar un algoritmo de programación que permita el funcionamiento conciliado de diferentes bancos de capacitores.	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis del problema. • Identificar las variables de entradas, procesos y salidas del problema, declaración de variables. • Diseño del Algoritmo • Codificación del Algoritmo. 	Ejecución y validación del programa por el computador.	<ul style="list-style-type: none"> • Software computacional. • Describir la secuencia ordenada de los pasos, sin ambigüedad, es decir, siendo preciso y veraz en la búsqueda de la solución al problema.
Realizar distintas simulaciones para garantizar el correcto funcionamiento del algoritmo programación mediante la comparación de un método convencional.	<ul style="list-style-type: none"> • Simulaciones de prueba. • Análisis de resultados. 	Verificación de la fiabilidad de la programación.	Demostrar que el algoritmo de programación no contiene errores aumentando la fiabilidad de la programación.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Aspectos teóricos de corrección del factor de potencia

3.1.1. Impedancia, resistencia, reactancia

La impedancia Z (también llamada resistencia aparente) de un circuito eléctrico resulta de la relación entre la tensión aplicada V en voltios y de la corriente I . En corriente alterna la

impedancia Z consta de una parte real llamada Resistencia R (resistencia efectiva) y de una parte imaginaria llamada Reactancia X (resistencia reactiva) [1].

La reactancia puede ser de dos tipos, inductiva X_L y capacitiva X_C . La reactancia inductiva está determinada por la inductancia del circuito y se expresa como:

$$X_L = \omega * L = 2\pi fL \quad (3.1)$$

Donde:

ω = Frecuencia angular

f = frecuencia en Hz

L = Inductancia en H

La reactancia inductiva tiene la característica de retrasar la onda de corriente con respecto a la tensión, debido a que la inductancia es la propiedad eléctrica de almacenar corriente en un campo eléctrico, que se opone a cualquier cambio de corriente [1].

La reactancia capacitiva está determinada por la capacitancia del circuito, y se expresa como:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC} \quad (3.2)$$

Dónde:

C = Capacitancia en F

ω = Frecuencia angular.

f = frecuencia en Hz

2π = se expresa en radianes

La reactancia capacitiva tiene la característica de adelantar la corriente con respecto a la tensión, debido a que la capacitancia es la propiedad eléctrica que permite almacenar energía por medio de un campo electrostático y de liberar esta energía posteriormente [1].

3.1.2. Desfase entre las ondas de corriente y tensión

El tipo de carga eléctrica determina en un circuito la impedancia y la posición de la onda de la corriente respecto a la onda de la tensión. La corriente en el circuito se puede descomponer en dos tipos de corriente, la corriente resistiva, en fase con la tensión, y la corriente reactiva, desfasada 90 grados respecto a la tensión [1].

$$I_R = \frac{V}{R} = I * \cos \varphi \quad \text{é} \quad I_X = \frac{V}{X} = I * \sin \varphi \quad (3.3)$$

Donde I , I_R e I_X están en Amperios (A).

3.1.3. Potencia activa, reactiva y aparente

La energía activa corresponde a la potencia activa P medida en kW se transforma integralmente en energía mecánica (trabajo) y calor (pérdidas) [2].

$$P = VI * \cos \varphi \quad (3.4)$$

La energía reactiva corresponde a la potencia reactiva Q medida en $kVAr$; sirve para alimentar circuitos magnéticos en máquinas eléctricas y es necesaria para su funcionamiento. Es suministrada por la red o, preferentemente, por condensadores previstos para ello [2].

$$Q = VI * \sin \varphi \quad (3.5)$$

La red de distribución suministra la energía aparente que corresponde a la potencia aparente S , medida en kVA [2].

$$S = VI \quad (3.6)$$

El ángulo formado en el triángulo de potencias por P y S equivale al desfase entre la corriente y la tensión y es el mismo ángulo de la impedancia; por lo tanto el $\cos \varphi$ depende directamente del desfase [1].

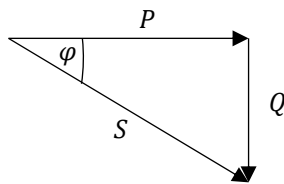


Figura 3.1. Factor de potencia $\cos \varphi = \frac{P}{S}$.

Fuente: [1].

3.2. Triángulo de potencias

Para el factor de potencia los valores están comprendidos desde 0 hasta 1

Tabla 3.1. Valores del factor de potencia.

Carga	Capacitancia			Efectiva	Inductiva		
φ	90°	60°	30°	0°	-30°	-60°	-90°
$\cos \varphi$	0	0.5	0.87	1	-0.87	-0.5	0
Potencia	Reactiva			Real	Reactiva		
	100%			100%	100%		

Fuente: [1].

Solamente resistencias efectivas R , como por ejemplo bombillas incandescentes. En este caso $X = 0$ y $Z = R$, es decir, la corriente y el voltaje tienen el mismo recorrido, o están en fase [1].

Predomina la reactancia inductiva XL . La corriente corre retrasada con voltaje a un ángulo φ , debido por ejemplo a transformadores, motor, bobinas reactivas en el circuito [1].

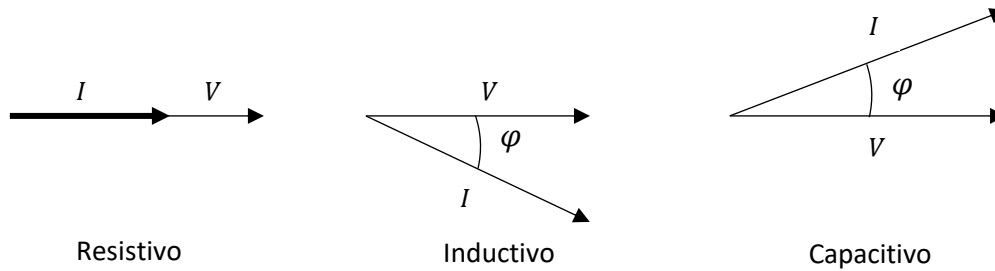


Figura 3.2. Desfasamiento.

Fuente: [1].

Predomina la reactancia capacitiva XC . La corriente corre adelantada con voltaje a un ángulo φ , debido, por ejemplo, a condensadores [1].

3.3. Consecuencias y Causas de un Bajo Factor de Potencia

Cuanto más bajo sea el factor de potencia, mayor potencia aparente y mayor intensidad de corriente se debe proporcionar a la carga, para entregar una misma potencia activa, por lo que se tiene una serie de consecuencias negativas tanto para la empresa distribuidora como para el cliente [3].

3.3.1. Pérdidas en la Instalación

Las pérdidas de energía eléctrica ocurren en forma de calor y son proporcionales al cuadrado de la corriente total ($I^2 * R$). Como esa corriente crece con el exceso de energía reactiva, se establece una relación entre el incremento de las pérdidas y el bajo factor de potencia, provocando aumento del calentamiento en conductores y equipamientos [4].

3.3.2. Caídas de Tensión

El acrecido de corriente debido el exceso de potencia reactiva resulta en caídas de tensión, y pueden eventualmente causar la interrupción de suministro de la fuente de energía y sobrecargas en algunos aparatos. Sobre todo, este riesgo es acrecido durante periodos donde la línea de potencia es altamente requerida. Las caídas de tensión pueden también causar una reducción de la intensidad luminosa de lámparas y aumentar la corriente en motores eléctricos [4].

3.3.3. Baja utilización de la capacidad instalada

La energía reactiva, al sobrecargar una instalación eléctrica, inviabiliza su plena utilización, condicionando la instalación de nuevas cargas a inversiones que serían evitadas si el factor de potencia presentase valores más altos. El “espacio” ocupado por la energía reactiva podrá ser entonces utilizado para el atendimento de nuevas cargas. Las inversiones en ampliación de las

instalaciones están relacionadas principalmente a los transformadores y conductores necesarios. El transformador a ser instalado debe atender la potencia total de los equipamientos utilizados, pero debido a presencia de potencia reactiva, su capacidad debe ser calculada con base en la potencia aparente de las instalaciones [4].

3.3.4. Principales consecuencias del bajo factor de potencia

- Incremento en la cuenta de energía por estar operando con bajo factor de potencia.
- Limitación de la capacidad de los transformadores de alimentación.
- Caídas y fluctuaciones de tensión en los circuitos de distribución.
- Sobrecarga en los equipamientos de maniobra, limitando su vida útil.
- Aumento de las pérdidas eléctricas en la línea de distribución por el efecto Joule.
- Necesidad de aumento del diámetro de los conductores
- Necesidad de aumento de la capacidad de los equipamientos de maniobra y de protección.

3.3.5. Causas del bajo factor de potencia

- Motores de inducción trabajando a vacío.
- Motores súper dimensionados para su necesidad de trabajo.
- Transformadores trabajando a vacío o con poca carga.
- Reactores de bajo factor de potencia en el sistema de iluminación.
- Hornos de inducción o a arco.
- Máquinas de tratamiento térmico.
- Máquinas de soldar.
- Nivel de tensión arriba del valor nominal provocando un aumento del consumo de energía reactiva.

3.4. Ventajas técnicas de la corrección del factor de potencia

Tal y como se explicaba anteriormente, al aplicar la corrección en una instalación, proporcionando localmente la potencia reactiva necesaria, se reduce el valor de la corriente y potencia útil requerida, por tanto, la potencia global consumida aguas arriba; esto conlleva numerosas ventajas, entre ellas, un uso optimizado de las máquinas y de las líneas eléctricas. En el caso de formas de onda sinusoidales, la potencia reactiva necesaria para pasar de un factor de potencia $\cos \varphi_1$ un factor de potencia $\cos \varphi_2$ es expresada por la relación (válida tanto para sistemas trifásicos como monofásicos) [5].

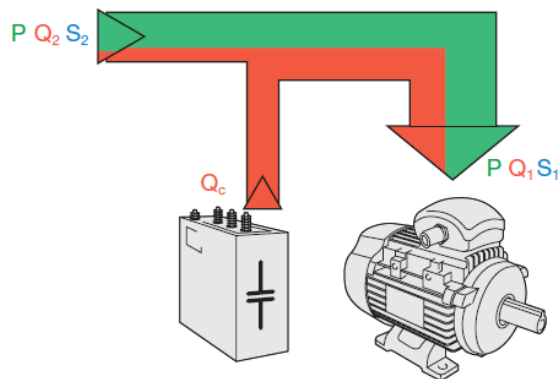


Figura 3.3. Sistema de Corrección del Factor de Potencia.

Fuente: [5].

$$Q_c = Q_1 - Q_2 = P * (tg_{\varphi_1} - tg_{\varphi_2}) \quad (3.7)$$

Donde:

P es la Potencia Activa;

Q_1, φ_1 es la potencia reactiva y el ángulo de desfase antes de la corrección;

Q_2, φ_2 es la potencia reactiva tras la corrección y el ángulo de desfase tras la corrección;

Q_c es la potencia reactiva de corrección.

Con todo ello, las ventajas principales de la corrección pueden resumirse de la siguiente manera:

- uso optimizado de las máquinas eléctricas;
- uso optimizado de las líneas eléctricas;
- reducción de las pérdidas;
- reducción de la caída de tensión.

3.4.1. Uso optimizado de las máquinas eléctricas

Los generadores y los transformadores son dimensionados a partir de la potencia aparente S . Ésta, a igual potencia activa P , es más pequeña cuanto menor es la potencia reactiva Q suministrada. Por lo tanto, compensando la instalación, las máquinas pueden ser dimensionadas en relación con una potencia aparente inferior, aun proporcionando la misma potencia activa [5].

En la tabla 1 se muestra la variación de la potencia transmitida para transformadores trifásicos MT/ BT en función del $\cos\varphi$ del consumidor.

Tabla 3.2. Variación de potencia de los transformadores en función del $\cos\varphi$.

Potencia del transformador [kVA]	Potencia activa transmitida [kW]					
	$\cos\varphi$					
	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
63	32	38	44	50	57	63
100	50	60	70	80	90	100
125	63	75	88	100	113	125
160	80	96	112	128	144	160
200	100	120	140	160	180	200
250	125	150	175	200	225	250
315	158	189	221	252	284	315
400	200	240	280	320	360	400
630	315	378	441	504	567	630
800	400	480	560	640	720	800
1000	500	600	700	800	900	1000
1250	625	750	875	1000	1125	1250

Fuente: [5].

En esta tabla 1, si se requiere alimentar una serie de cargas con una potencia total de 170 kW con $\cos\varphi = 0.7$, hace falta un transformador de 250 kVA. Si las cargas absorbieran la misma potencia con $\cos\varphi = 0.9$, en vez de 0.7, bastaría con utilizar un transformador de 200 kVA [5].

3.4.2. Reducción de las pérdidas

Las pérdidas de potencia en un conductor eléctrico dependen de la resistencia del conductor y del cuadrado de la corriente que lo atraviesa; dado que a igual potencia activa transmitida más alto es el $\cos\varphi$ y más baja es la corriente, al crecer el factor de potencia disminuyen las pérdidas en el conductor ubicado aguas arriba respecto al punto en el que se lleva a cabo la corrección [5].

En un sistema trifásico, las pérdidas se expresan de la siguiente manera:

$$P = 3 * R * I^2 = R * \frac{P^2 + Q^2}{U_n^2} \quad (3.8)$$

Dado que:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} * U_n} = \frac{\sqrt{(P^2 + Q^2)}}{\sqrt{3} * U_n} \rightarrow 3 * I^2 = \frac{(P^2 + Q^2)}{U_n^2} \quad (3.9)$$

Donde:

- I es la corriente que atraviesa el conductor;
- R es la resistencia del conductor;
- S es la potencia aparente requerida por la carga;
- P es la potencia activa requerida por la carga;
- Q es la potencia reactiva requerida por la carga;

- U_n es la tensión nominal de alimentación.

La reducción de las pérdidas Δp , una vez efectuada la compensación, viene dada por:

$$\Delta p = p_1 * \left[1 - \left(\frac{\cos\varphi_1}{\cos\varphi_2} \right)^2 \right] \quad (3.10)$$

Donde:

- p_1 son las pérdidas antes de la corrección;
- $\cos\varphi_1$ es el factor de potencia antes de la corrección;
- $\cos\varphi_2$ es el factor de potencia tras la corrección.

Corrigiendo el factor de potencia se obtiene una reducción de las pérdidas de potencia en todas las partes de la instalación ubicadas aguas arriba respecto al punto en el que se efectúa la corrección [5].

3.4.3. Reducción de la caída de tensión

La caída de tensión concatenada en una línea trifásica puede expresarse del siguiente modo [5]:

$$\Delta U = \sqrt{3} * I * (R \cos\varphi + X \sin\varphi) = \frac{P}{U_n} * (R + X \operatorname{tg}\varphi) \quad (3.11)$$

Donde:

- R y X son respectivamente la resistencia y la reactancia de la línea;
- P es la potencia activa transmitida;
- I es la corriente;
- U_n es la tensión nominal.

A igual potencia activa transmitida, la caída de tensión será menor cuanto mayor sea el factor de potencia.

3.5. Ventajas económicas de la corrección del factor de potencia

Los distribuidores de energía eléctrica aplican un sistema de tarifas que sanciona el consumo de energía con un factor de potencia medio mensual inferior a 0.9, en líneas generales, las cláusulas contractuales de suministro de energía señalan el pago de la energía reactiva recogida si el factor de potencia está comprendido entre 0.7 y 0.9, mientras que no se debe pagar nada si es superior a 0.9 [5].

Para $\cos\varphi < 0.7$, los distribuidores de energía pueden obligar al usuario a realizar la corrección. Tener un factor de potencia medio mensual superior o igual a 0.9 significa requerir a la red una energía reactiva inferior o igual al 50% de la energía activa[5].

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{Q}{P} \leq 0.5 \rightarrow \cos\varphi \geq 0.89 \quad (3.12)$$

El coste anual que el usuario soporta, consumiendo una energía reactiva que exceda de la correspondiente a un factor de potencia igual a 0.9, puede expresarse de la siguiente forma [5].

$$C_{EQ} = (E_Q - 0.5 * E_p) * c \quad (3.13)$$

Donde

- C_{EQ} es el coste de la energía reactiva en un año en \$;
- E_Q es la energía reactiva consumida en un año en $kvarh$;
- E_p es la energía activa consumida en un año en kWh ;
- $E_Q - 0.5 * E_p$ es la cuota de energía reactiva sujeta al coste;
- c es el coste unitario de la energía reactiva en $$/kvarh$.

Si se compensa a 0.9, para no pagar el consumo de energía reactiva, el coste de la batería de condensadores y de su instalación es [5]:

$$C_{Qc} = Q_c * C_c \quad (3.14)$$

Donde:

- C_{Qc} es el coste anual en \$ para tener un factor de potencia igual a 0.9;
- Q_c es la potencia de la batería de condensadores necesaria para que el $\cos\phi$ sea de 0.9, en $kvar$;
- C_c es el coste de instalación anual de la batería de condensadores en $$/kvar$;

3.6. Tipos de corrección

Si bien no existen reglas específicas para los diferentes tipos de instalaciones y, en teoría, los condensadores pueden instalarse en cualquier punto, es preciso evaluar su ejecución práctica y económica.

A partir de las modalidades de ubicación de los condensadores, los principales métodos de corrección son:

- Corrección del factor de potencia distribuida;
- Corrección del factor de potencia por grupos;
- Corrección del factor de potencia centralizada;
- Corrección del factor de potencia mixta;
- Corrección del factor de potencia automática.

3.6.1. Corrección distribuida

La corrección distribuida se realiza conectando una batería de condensadores debidamente dimensionada directamente a los terminales del dispositivo que necesita la potencia reactiva [5].

La instalación es sencilla y poco costosa: el condensador y la carga pueden beneficiarse de las mismas protecciones contra sobrecorrientes y se insertan o desconectan a la vez [5].

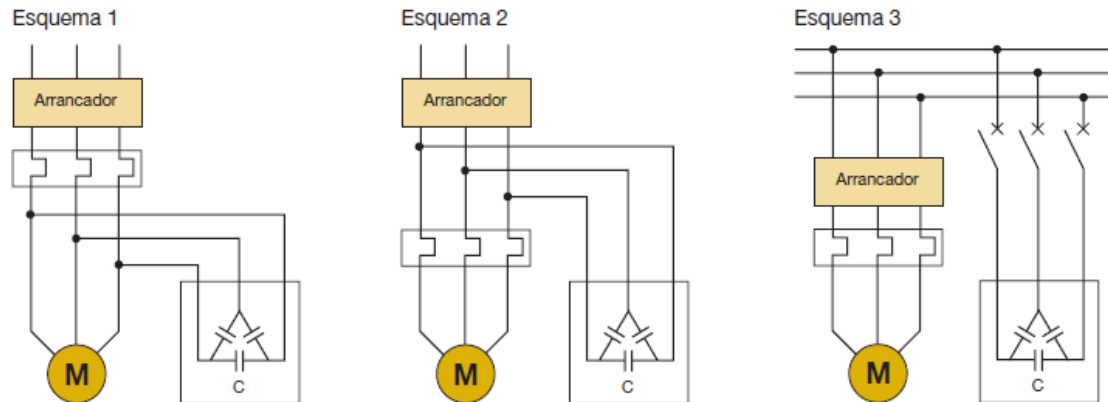


Figura 3.4. Esquemas usuales de conexión para la corrección del factor de potencia de motores.

Fuente: [5].

En caso de conexión directa (esquemas 1 y 2) se corre el riesgo de que, tras el corte de la alimentación, el motor, al continuar rotando (energía cinética residual) y autoexcitándose con la energía reactiva suministrada por la batería de condensadores, se transforme en un generador asíncrono. Si esto ocurre, la tensión se mantiene en el lado de carga del dispositivo de maniobra y control, con riesgo de peligrosas sobretensiones (hasta el doble de la tensión nominal) [5].

Por medio del esquema 3, la batería de compensación se conecta al motor sólo cuando éste está en marcha y se desconecta del mismo antes de que se produzca el corte de la alimentación del motor [5].

Con este tipo de corrección, toda la red aguas arriba de la carga trabaja con un factor de potencia elevado; por el contrario, esta solución resulta costosa económicamente [5].

3.6.2. Corrección por grupos

Consiste en corregir localmente grupos de cargas con características de funcionamiento similares mediante la instalación de una batería de condensadores.

Este método se encuentra a medio camino entre la solución económica y el correcto servicio de la instalación, ya que los beneficios de la corrección afectan sólo a las líneas aguas arriba respecto al punto en el que se encuentra instalada la batería de condensadores [5].

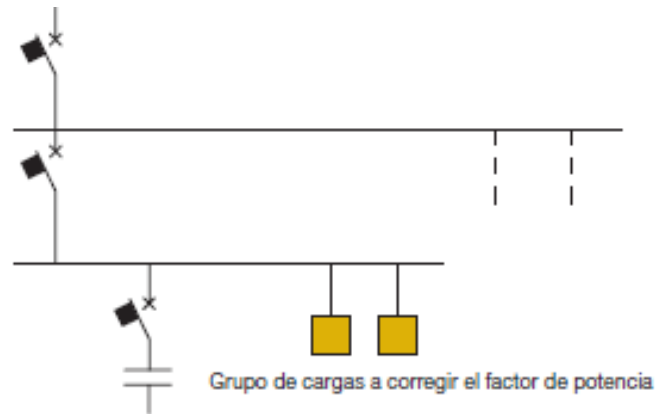


Figura 3.5. Corrección por grupos.

Fuente: [5].

3.6.3. Corrección centralizada

El comportamiento diario de las cargas tiene una importancia fundamental para la elección del tipo de corrección más conveniente.

En instalaciones con muchas cargas, en las que todos sus elementos funcionan de forma simultánea y/o algunos están conectados sólo unas pocas horas al día, es evidente que la solución de la corrección distribuida resulta demasiado costosa, quedando durante largos periodos inutilizados muchos de los condensadores instalados [5].

Por tanto, el uso de un único sistema de corrección en el punto inicial de la instalación permite reducir notablemente la suma de potencias de los condensadores instalados.

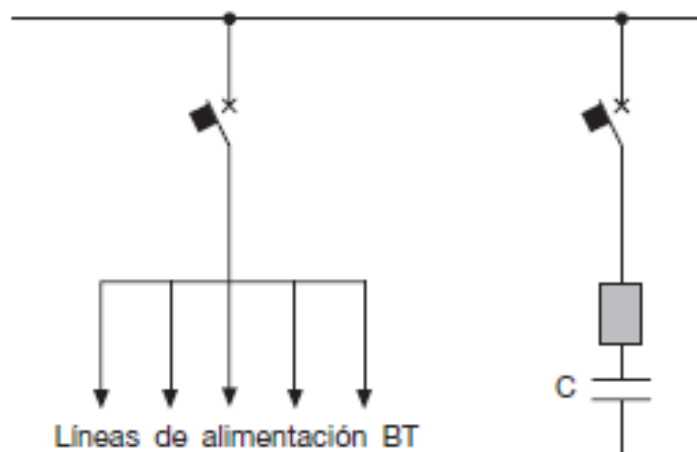


Figura 3.6. Corrección centralizada.

Fuente: [5].

3.6.4. Corrección mixta

Esta solución deriva de un compromiso entre las soluciones de corrección distribuida y centralizada, combinando las ventajas de ambos. De esta forma, se utiliza la corrección distribuida para los aparatos eléctricos de mayor potencia, y la centralizada para la parte restante [5].

La corrección mixta se emplea generalmente cuando en una instalación sólo se utilizan con frecuencia los equipos más pesados, de manera que éstos son compensados individualmente mientras que los demás aparatos son compensados de forma centralizada [5].

3.6.5. Corrección automática

En la mayor parte de las instalaciones no tiene lugar una absorción constante de potencia reactiva, por ejemplo, a causa de ciclos de trabajo en los que se utilizan máquinas con diferentes propiedades eléctricas [5].

En dichas instalaciones se emplean sistemas de corrección automáticos que, por medio de un sistema de detección de tipo varimétrico y de un regulador del factor de potencia, permiten la inserción o la desconexión automática de las diferentes baterías de condensadores, siguiendo de esta forma las variaciones de la potencia reactiva absorbida y manteniendo constante el factor de potencia de la instalación [5].

Un sistema de corrección automática está compuesto por:

- Sensores que detectan las señales de corriente y tensión;
- Una unidad inteligente que compara el factor de potencia medido con el deseado y ejecuta la inserción o la desconexión de las baterías de condensadores en función de la potencia reactiva necesaria (regulador del factor de potencia);
- Un cuadro eléctrico de potencia, que incluye los dispositivos de protección y maniobra;
- Baterías de condensadores.

3.7. Ubicación de los bancos de capacitores

Razonando sobre las pérdidas, surge la tentación de distribuir capacitores asociados a cada carga, solución que implica mal aprovechamiento de la potencia capacitiva que se instala. El otro extremo del razonamiento es concentrar la potencia necesaria (que detecta la medición de energía) en un único punto de la red, razones técnicas lo individualizan próximo a la mayor carga que se encuentre conectada a la red. Entre ambas situaciones se pueden encontrar soluciones intermedias con ventajas, como puede ser en un punto intermedio o final de cada alimentador (con cargas distribuidas o concentradas al final de la línea), o bancos puntuales intermedios en la red [6].

Debido a todos los beneficios que presenta la instalación de un banco de capacitores, la ubicación de los mismos, juega un papel importante en la planificación y operación de los sistemas de distribución, debido a que implican una inversión y se debe proceder de una manera óptima para obtener el mayor beneficio, así la ubicación óptima de capacitores ha sido formulada como un problema de optimización donde la mayoría de técnicas convencionales son incapaces de resolver el problema ya que es un problema combinatorio muy complejo por la cantidad de posibilidad y variables que se pueden presentar. La localización de capacitores ha sido resuelta haciendo uso de diferentes técnicas y métodos, que van desde los más elementales y de fácil implementación, hasta los más complejos, los métodos de solución al problema de localización de capacitores se pueden clasificar de la siguiente manera [3]:

3.7.1. Programación lineal

La programación matemática es una potente técnica de modelado usada en la solución de problemas de optimización. Cuando se trata de resolver un problema de este tipo la primera etapa consiste en identificar las posibles decisiones que pueden tomarse lo que lleva a identificar las variables del problema. [7]

Normalmente, las variables son de carácter cuantitativo y se buscan los valores que optimizan la función objetivo. En la segunda etapa se determina que decisiones resultarían admisibles. Esto conduce a un conjunto de restricciones que definen el espacio de solución del problema en cuestión. En tercera etapa se calcula el costo/beneficio asociado a cada decisión admisible. [16]

La programación, lineal es utilizada ampliamente en las aplicaciones de ingeniería con funciones objetivo y restricciones lineales. [7]

Para cualquier problema de programación lineal se requiere identificar cuatro componentes básicos

- El conjunto de datos
- El conjunto de variables involucradas en el problema junto con sus respectivos dominios de definición
- El conjunto de restricciones lineales del problema que definen el espacio o región de soluciones admisibles.
- La función objetivo lineal que debe ser optimizada

La forma más general de un problema de programación lineal consiste en minimizar o maximizar una función objetivo sujeta a un conjunto de restricciones. [7]

$$Z = f(x) = \sum_{j=1}^n C_j x_j \quad (3.15)$$

Sujeto a:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j &= b_i, \quad i = 1, 2 \dots p - 1 \\ \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j &\geq b_i, \quad i = p \dots q - 1 \\ \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j &\leq b_i, \quad i = q \dots m \end{aligned} \quad (3.16)$$

Lo que distingue un problema de programación lineal de cualquier otro problema de optimización es que todas las funciones que en el interviene son lineales. [7]

La función lineal en (3.15) se denomina función objetivo de costo y es la función a optimizar. Obsérvese que el conjunto de restricciones (3.16) se presentan todas las posibles alternativas en lo que se refiere a los operadores que relacionan los dos términos de restricción lineales. [7]

3.7.2. Programación dinámica

Se realiza la optimización de la potencia reactiva con el uso de la programación dinámica, partiendo de una función gasto a minimizar, aplicando el principio de optimalidad de Bellman, ya que permite utilizar modelos como sistemas en etapas, considerando los diferentes niveles de tensión y distintas fuentes, lo que posibilitó hallar una solución en un intervalo de óptimo para las diferentes etapas analizadas. [8]

Para determinar la efectividad económica se partió de la utilización de la ecuación (3.17), para la minimización de los gastos anuales teniendo en cuenta la función mostrada. [8]

$$G = G + K_p K = \min \quad (3.17)$$

Con las siguientes restricciones

Balance de potencia reactiva

$$Q_{total} - Q_{Ctotal} - \Delta Q_{total} + Q_s = 0 \quad (3.18)$$

Donde:

Q_{total} : Potencia reactiva total

Q_{Ctotal} : Potencia reactiva total de la carga

ΔQ_{total} : Pérdidas totales de potencia reactiva

Q_s : Potencia generada en el sistema electro energético.

La corriente de la carga no debe superar la admisible

$$I \leq I_{max} \quad (3.19)$$

La tensión de los consumidores no puede sobrepasar la admisible

$$U_{min} \leq U \leq U_{max} \quad (3.20)$$

La potencia reactiva del compensador no puede sobrepasar la admisible

$$Q_{min} \leq Q \leq Q_{max} \quad (3.21)$$

La función (3.17) se determina con ayuda del método de programación dinámica, donde el estado del sistema se define por la sumatoria de los valores de la potencia reactiva generada en cada una de las K etapas de las fuentes de potencia reactiva Q_k , analizándose diferentes variantes para la obtención de los gastos anuales $G(Q_{Ktotal})$. [8]

$$G = \sum_1^n G_k(Q_{k-1, totales}; Q_k) \quad (3.22)$$

La función de optimización se puede plantear de la forma siguiente

$$G_{10pt}(Q_{1total}) = G_1(Q_1) \quad (3.23)$$

$$G_{Kopt}(Q_{ktotal}) = \min[G_k(Q_k) + G_{k-10pt}(Q_{ktotal} - Q_k)]$$

Donde:

G_{Kopt} : Función optimal de los gastos en k etapas.

Q_k : Gastos en las k fuentes de potencia reactiva.

Para el resultado interactivo de las n etapas se determinan.

$$Q_{k10pt}(Q_{ktotal})$$

Función óptima de los gastos para $k=(2,3,\dots,n)$ etapas

$Q_{k10pt}(Q_{ktotal})$: Función optimal de control.

La dependencia de G_k con respecto a las fuentes de potencia reactiva se pueden representar a través de una ecuación de segundo grado

$$G_k = K_0 + K_1 Q_k + K_2 Q_k^2 \quad (3.24)$$

Para la primera etapa considerando las pérdidas en la línea y la ecuación (3.23) se obtiene que:

$$G_{10pt} = K_{0.1} + K_{1.1} Q_1 + K_{2.1} Q_1^2 \quad (3.25)$$

Donde:

$$K_{0.1} = K_0 + K_p Q_n^2$$

$$\begin{aligned} K_{1.1} &= K_1 + 2K_p Q_n \\ K_{2.1} &= K_2 + K_p \end{aligned} \quad (3.26)$$

$$K_p = \frac{C_0 R_e 10^3}{U_n^2}; \text{ Coeficiente de pérdidas}$$

Para la segunda etapa la función objetivo tiene la siguiente forma. [8]

$$\begin{aligned} G_{2opt} &= \{K_0 + K_1 Q_2 + K_2 Q_2^2 + K_{0.1} + K_{1.1} Q_1 + K_{2.1} Q_1^2\} \\ Q_{min} &\leq Q_1 \leq Q_{1max} \\ Q_{2min} &\leq Q_2 \leq Q_{2max} \end{aligned} \quad (3.27)$$

Resolviendo (3.27) y encontrando la dependencia. [8]

$$Q_{2op}(Q_{2total}) \text{ y } Q_{1opt}(Q_{2total})$$

Se tiene que:

$$Q_{2opt} = \frac{K_{2.1}}{K_{2.1} + K_2} Q_{2tot} + \frac{K_{1.1} - k_1}{2(K_{2.1} + K_2)} \quad (3.28)$$

Donde:

$$Q_{2total} = Q_{1opt} + Q_{2opt}$$

Sustituyendo la ecuación (3.28) en (3.30) se obtiene la función optimal de los gastos G_{2opt} en el intervalo de restricción del min. [8]

$$\begin{aligned} G_{2opt} &= K_{0eq} + k_{1eq} Q_{2total} + K_{2eq} Q_{2total}^2 \\ Q_{2total1}[\text{min}, \text{máx}] &= \left(\frac{K_{2.1}}{K_2} + 1 \right) Q_1 [\text{mín}, \text{máx}] + \frac{K_{1.1} - K_1}{2K_2} \\ Q_{2total2}[\text{min}, \text{máx}] &= \left(\frac{K_2}{K_{2.1}} + 1 \right) Q_2 [\text{mín}, \text{máx}] + \frac{K_{1.1} - K_1}{2K_{2.1}} \end{aligned} \quad (3.29)$$

Donde:

$Q_1 [\text{mín}, \text{máx}]$; $Q_2 [\text{mín}, \text{máx}]$: Fronteras admisibles de la magnitud de la potencia de la primera y segunda fuente sucesivamente. [8]

$$Q_{2total1} \cap Q_{2total2} \quad (3.30)$$

En el intervalo

$$Q_{2total2max} \leq Q_{2total} \leq Q_{2totalmax}$$

la función gastos es igual a:

$$\begin{aligned} G_{2opt1} &= K_{0eq1} + k_{1eq1} Q_{2total} + K_{2eq1} Q_{2total}^2 \\ Q_{2opt} &= Q_{2max} \end{aligned} \quad (3.31)$$

Para el intervalo

$$Q_{2totalmin} \leq Q_{2total} \leq Q_{2total1min}$$

$$G_{2opt2} = K_{0eq2} + k_{1eq2}Q_{2total} + K_{2eq2}Q_{2total}^2 \quad (3.32)$$

$$Q_{1opt} = Q_{1min}$$

De manera tal que la función óptima de los gastos en la segunda etapa es una función discontinua por tramos, compuesta de tres polinomios (3.29) (3.31) (3.32), [8]

3.7.3. Métodos heurísticos

Son métodos basados en técnicas de búsqueda heurística. La aplicación de estos métodos ha sido de gran importancia en la localización de bancos de capacitores para minimización de pérdidas. Se caracterizan por su fácil entendimiento e implementación, sin embargo, los resultados obtenidos en algunos casos no terminan siendo lo más óptimos [3].

3.7.4. Métodos basados en inteligencia artificial

Estos métodos se caracterizan por su poder de resolver el problema de localización de bancos de capacitores de manera óptima, están basados en las diferentes aéreas de la inteligencia artificial; algunos ejemplos de estos métodos son [3]:

- Algoritmos genéticos: Estos métodos desarrollan una búsqueda selectiva basada en algoritmos con evolución biológica, los cuales centralizan su búsqueda hacia una solución óptima, por medio de codificación, combinación y operaciones de mutación sobre ellos para generar un mejor conjunto de parámetros ya codiciados.
- Redes neuronales: Son usados para establecer relaciones no lineales entre entradas y salidas. Su estructura consiste básicamente de tres tipos de capas: una de entrada, una o más capas ocultas y una salida. Una vez que la red ha sido entrada, puede proporcionar resultados muy rápidos ante un conjunto de entradas determinado.

3.7.5. Regla de los 2/3

Esta regla es aplicada solamente en situaciones en las cuales la carga reactiva en el alimentador es continua y uniformemente distribuida. La mayoría de los alimentadores no tienen una distribución uniforme de cargas reactivas, así que la regla de los 2/3 no es aplicable completamente [3].

3.7.6. Método gráfico

Aplica el concepto de minimización de reactivos por unidad de longitud, puede ser usado para desarrollar pautas en situación típicas de cargas no uniformes. Es un mecanismo muy utilizado para ilustrar las bases de los efectos de la compensación, y definir recomendaciones de "primer orden", al igual que la regla de los 2/3, sin embargo, en ambos casos un número de factores importantes no son considerados, como los son los siguientes [3]:

- Flujo de potencia compleja

- Impedancia de la línea
- Carga discontinua
- Economía

3.8. Algoritmo Genético

3.8.1. Los algoritmos genéticos en la solución de problemas de optimización

Los AG son parte de la computación evolutiva. Es un área creciente de la inteligencia artificial que está basada en la evolución natural biológica y pueden adaptarse a la resolución de múltiples problemas. Están basados en la teoría de la evolución de Darwin y son apropiados para resolver problemas donde el dominio de la solución pueda resultar demasiado extenso y/o discreto [9].

Surgen como método para la solución de complejos problemas de búsqueda y optimización, producto del análisis de los sistemas adaptativos en la naturaleza, y como resultado de abstraer la esencia de su funcionamiento. El término algoritmo genético se usa por el hecho de que estos simulan los procesos de la evolución darwiniana por medio del uso de operadores genéticos (selección, mutación, cruzamiento, etc.) que operan sobre una población de individuos que “evoluciona” de una generación a otra. Estos algoritmos son un ejemplo de método que explota la búsqueda aleatoria “guiada” que ha ganado popularidad en los últimos años debido a la posibilidad de aplicarlos en una gran gama de campos [9].

En el caso de la ingeniería eléctrica, se han utilizado con éxito en la solución de problemas como: el balance de fases en circuitos de distribución primaria, [10] el planeamiento de redes de distribución, [11] la reconfiguración de sistemas de distribución, [12] la ubicación de dispositivos FACTS [13], así como la compensación de potencia reactiva en los sistemas de distribución primaria [14] y de forma simultánea al problema de la reconfiguración [15].

La aplicación más común de los algoritmos genéticos ha sido la solución de problemas de optimización, en donde han mostrado ser muy eficientes y confiables. No todos los problemas pudieran ser apropiados para la técnica, y se recomienda en general tomar en cuenta las siguientes características [9]:

- Su espacio de búsqueda (sus posibles soluciones) debe estar delimitado dentro de un cierto rango.
- Debe poderse definir una función de aptitud que nos indique qué tan buena o mala es una cierta respuesta.
- Las soluciones deben codificarse de una forma que resulte relativamente fácil de implementar en la computadora.

La solución de un problema de optimización, mediante un algoritmo genético requiere de tres planteamientos básicos iniciales [9]:

1. La codificación genética de las variables de decisión en el espacio de búsqueda, que se determina por un cromosoma de la cantidad de genes necesarios para representar la solución. Estos genes son expresados por códigos de diferente naturaleza, siendo la codificación binaria una de las más utilizadas por su simplicidad. Esta codificación define el tipo de población y en la mayoría de los casos está asociado al tipo de problema de optimización que se pretende resolver.
2. El establecimiento de la función a optimizar o función de adaptación (fitness), que posibilitará la evaluación de las soluciones generadas en el espacio de búsqueda.
3. La limitación del espacio de búsqueda, lo que se puede lograr a partir de la propia codificación de la solución, la incorporación de restricciones operacionales (si el algoritmo lo permite) y la elaboración de funciones de penalización, quienes se incorporan a la propia función de adaptación.

El correcto dimensionamiento de estos tres aspectos constituye la clave del éxito para el futuro desempeño del algoritmo.

Otro aspecto importante es la definición de una serie de parámetros que determinan el funcionamiento del algoritmo, siendo los principales [9]:

- El tamaño y algoritmo de creación de las poblaciones.
- Los operadores genéticos de selección, cruzamiento y mutación.
- Los operadores de reemplazo de la población.
- Los criterios de parada o terminación.

3.9. Calidad del servicio eléctrico de distribución (REGULACIÓN 004-01)

3.9.1. Índice de calidad

Para efectos de la evaluación de la calidad, en cuanto al factor de potencia si en el 5% o más del periodo evaluado el valor del factor de potencia es inferior a los límites, el Consumidor está incumpliendo con el índice de calidad [16].

3.9.2. Medición

Adicionalmente a las disposiciones que constan en el artículo 12 del Reglamento del Servicio de Electricidad el Distribuidor efectuará registro del factor de potencia en cada mes, en el 2% del número de Consumidores servidos en AV y MV. Las mediciones se harán mediante registros en periodos de 10 minutos, con régimen de funcionamiento y cargas normales, por un tiempo no menor a siete (9) días continuos [16].

3.9.3. Límite

El valor mínimo es de 0,92 [15].

3.10. MARCO REFERENCIAL

3.10.1. Creación de apps con interfaces gráficas de usuario en MATLAB

Las GUI (también conocidas como interfaces gráficas de usuario o interfaces de usuario) permiten un control sencillo de las aplicaciones de software, lo cual elimina la necesidad de aprender un lenguaje y escribir comandos a fin de ejecutar una aplicación [17].

3.10.2. Creación de una GUI de MATLAB de forma interactiva

GUIDE (entorno de desarrollo de GUI) proporciona herramientas para diseñar interfaces de usuario para Apps personalizadas. Mediante el editor de diseño de GUIDE, es posible diseñar gráficamente la interfaz de usuario. GUIDE genera entonces de manera automática el código de MATLAB para construir la interfaz, el cual se puede modificar para programar el comportamiento de la app [17].

Mediante la función `guide` creamos la interfaz gráfica, la cual nos genera de manera automática el código de Matlab para construir la interfaz.

`Varargout`, es un tipo de función de Matlab que se genera cuando se desconoce si la función tiene variables de entrada o salida.

El `guide` genera un mensaje de advertencia “Comienza el código de inicialización - NO EDITAR” para que no editemos el código generado, pero le podemos agregar ciertas líneas de código de acuerdo a la app que deseamos crear, en la inicialización `FP_OpeningFcn` le agregamos una línea de código para que se inserte una imagen de nombre “fondo.png” sobre la interfaz gráfica.

Matlab crea automáticamente ciertas funciones para cada botón, texto o gráfico y nosotros decidimos cuales necesitamos o descartamos de acuerdo a la app que vamos a crear.

`Callback`, es una propiedad importante de control ya que dice al control que hacer cuando este se active.

`Create`, se ejecuta cuando se crea cada objeto.

Esta funciones crea automáticamente Matlab para cada botón, texto o gráfico las cuales podemos decidir si las necesitamos o no.

`BackgroundColor`, cambia el color del fondo del control.

Evalúa una expresión y ejecuta un grupo de declaraciones cuando la expresión es verdadera. Una expresión es verdadera cuando su resultado es no vacío y contiene solo elementos diferentes de cero (lógico o real numérico) [15]. De lo contrario, la expresión es falsa.

Hacemos el ingreso de datos del factor de potencia deseado FPD y señalamos de que parte de la interfaz gráfica lo estamos obteniendo y con la función if, si ingresamos un valor mayor a cero se almacena la variable o caso contrario nos va a pedir que ingresemos los datos. Así lo realizamos por el ingreso de datos de cada variable.

Con los datos ya ingresados procedemos a realizar los cálculos necesarios para la compensación del factor de potencia y lo transformamos a su respectiva unidad.

Mediante la función if realizamos la compensación con la condición de la carga que este activa para realizar la distribución de la capacidad de los condensadores.

Visualizamos la conmutación de cada condensador con la función if la cual establece la posición del interruptor si esta en operación, en la cual también especificamos la posición del mismo y el color con la función ForegroundColor.

Por ultimo establecemos el lugar dentro de la interfaz gráfica de donde se van a colocar los datos calculado de acuerdo a sus variables que los contienen y la unidad matemática en que están expresados.

3.10.3. Programa

Obtenemos la interfaz gráfica gracias la función de guide la cual va ser la base del programa donde se realizó las distintas líneas de código según lo que necesitamos en nuestra interfaz.

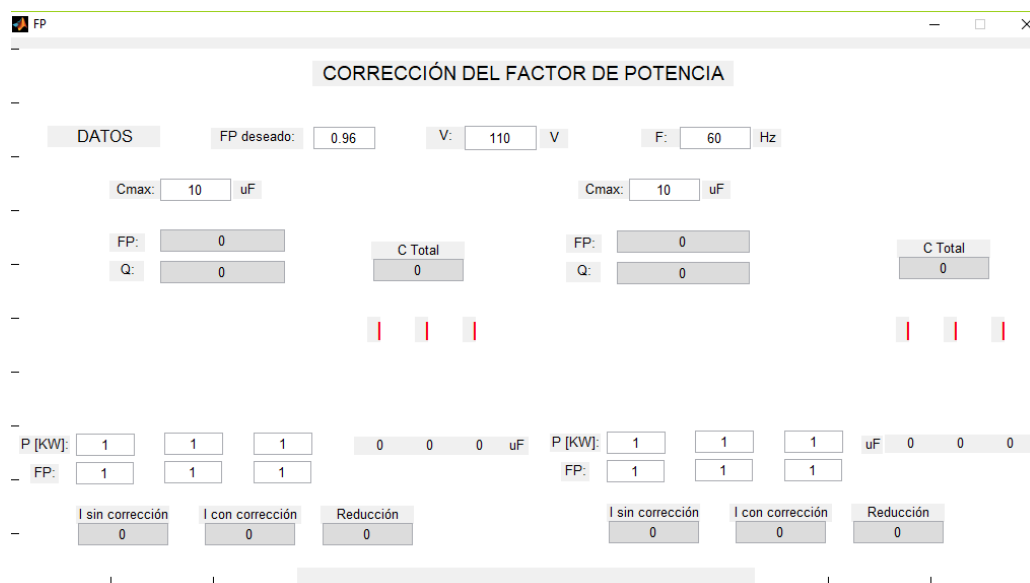


Figura 3.7. Interfaz de usuario GUIDE.

Fuente: Autores.

Se realizó el esquema del circuito eléctrico a realizar con una extensión de imagen .png para que sea compatible con Matlab, la cual vamos a vincular a la interfaz gráfica.

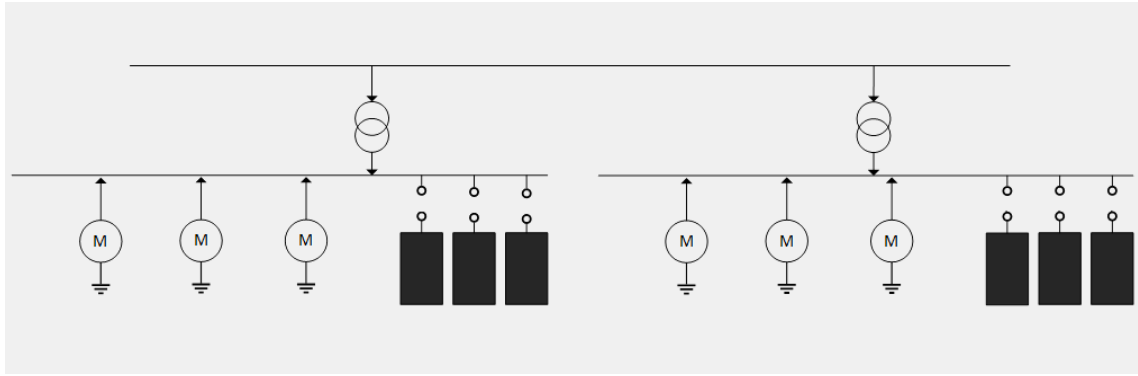


Figura 3.8. Circuito de prueba.

Fuente: Autores.

Mediante la programación realizada obtenemos la interfaz gráfica en la cual se va ingresar los datos y mostrar el resultado de los mismos, aquí podemos visualizar la interfaz gráfica vinculada con la imagen del sistema eléctrico que vamos a ocupar.

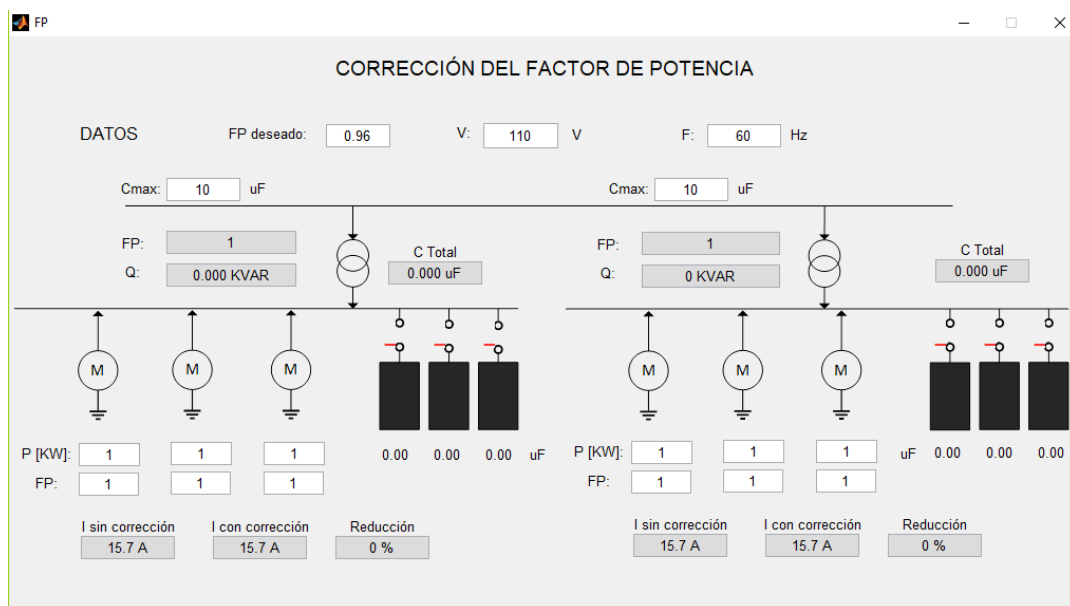


Figura 3.9. Programa.

Fuente: Autores.

3.11. Simulaciones

3.11.1. Caso base 1

Situación del problema

En el primer caso tenemos un sistema con el mismo valor con cargas iguales en el cual vamos a realizar una compensación grupal para las tres cargas, realizamos un programa básico para calcular el factor de potencia de forma general para un circuito sencillo en el cual los datos de entrada son la potencia activa y la potencia reactiva para realizar la compensación y además ingresamos el voltaje y la frecuencia del sistema.

Sistema

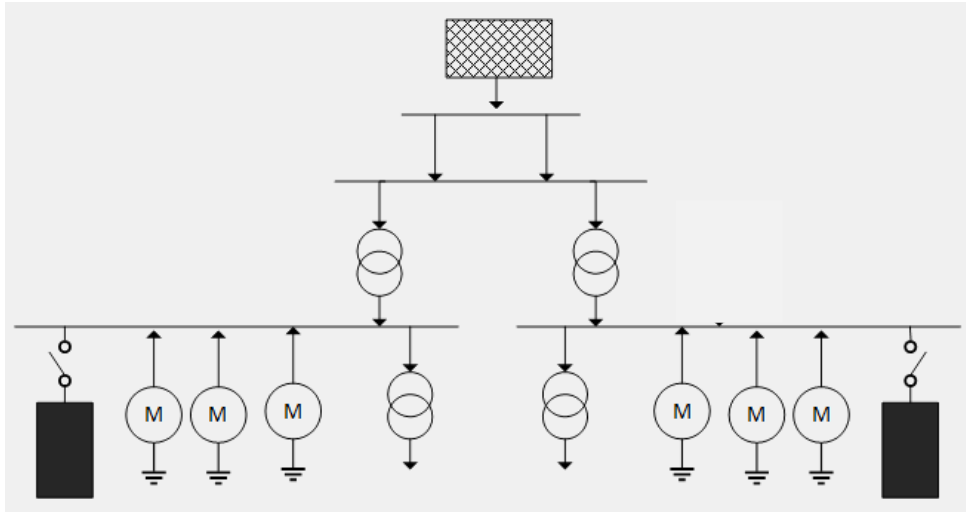


Figura 3.10. Circuito del caso base 1.

Fuente: Autores.

Resolución

$$P = 2.6 \text{ KW}$$

$$Q = 1.04 \text{ KW}$$

$$f = 60 \text{ Hz}$$

$$\cos\varphi_2 = 0.96$$

$$V = 440 \text{ v}$$

$$fp = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$$

$$fp = \frac{2.6 \text{ Kw}}{\sqrt{2.6^2 + 1.04^2}} = 0.928$$

$$Q_1 = P * \tan(\arccos\varphi_1)$$

$$Q_1 = 2.6 \text{ Kw} \tan * (\arccos 0.928) = 1.044 \text{ Kvar}$$

$$I_1 = \frac{P}{\sqrt{3} * V * \cos\varphi_1} = \frac{2.6 \text{ Kw}}{\sqrt{3} * 440 * 0.928} = 3.676 \text{ A}$$

$$\tan(\arccos 0.928) = 0.40$$

$$\tan(\arccos 0.96) = 0.30$$

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

$$Q_C = 2.6 \text{ Kw} * (0.40 - 0.30) = 0.26 \text{ Kvar}$$

$$I_2 = \frac{P}{\sqrt{3} * V * \cos\varphi_2} = \frac{2.6 \text{ Kw}}{\sqrt{3} * 440 * 0.96} = 3.55 \text{ A}$$

Tenemos una reducción del 3,42 % de corriente.

Capacidad del condensador.

$$C = \frac{1000 * Q_C}{2\pi f V^2} = \frac{1000 * 0.26 \text{ Kvar}}{2\pi * 60\text{Hz} * (440)^2} = 3.56 \mu\text{F}$$

Ingresando los datos en el programa obtenemos el factor de potencia sin corrección y el valor del condensador en microfaradios, con lo cual verificamos que el programa cumple su función para la cual fue creado se muestra en el **anexo 1**.

3.11.2. Caso base 2

Para tres motores M1, M2, M3 con diferente fp.

M1

$$P_1 = 1.3 \text{ Kw}$$

$$fp = 0.82$$

$$Q_1 = P * \tan(\arccos 0.82)$$

$$Q_1 = 0.9074 \text{ Kvar}$$

$$P_T = 4,3 \text{ Kw}$$

$$Q_T = 2.7663 \text{ Kvar}$$

M2

$$P_2 = 1.5 \text{ Kw}$$

$$fp = 0.84$$

$$Q_2 = P * \tan(\cos^{-1} 0.84)$$

$$Q_2 = 0.9684 \text{ Kvar}$$

M3

$$P_3 = 1.5 \text{ Kw}$$

$$fp = 0.86$$

$$Q_3 = P * \tan(\cos^{-1} 0.86)$$

$$Q_3 = 0.89 \text{ Kvar}$$

$$fp_T = \frac{P}{\sqrt{P_T^2 + Q_T^2}}$$

$$fp_T = \frac{4.3 \text{ Kw}}{\sqrt{4,3^2 + 2.7663^2}} = 0.8409$$

$$\tan(\arccos 0.8409) = 0.6436$$

$$I_1 = \frac{P}{\sqrt{3} * V * \cos\varphi_1} = \frac{4.3 \text{ Kw}}{\sqrt{3} * 440 * 0.8409} = 6,709 \text{ A}$$

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

$$Q_C = 4,3 \text{ Kw} * (0.6435 - 0.30) = 1.477 \text{ Kvar}$$

$$I_2 = \frac{P}{\sqrt{3} * V * \cos\varphi_2} = \frac{4.3 \text{ Kw}}{\sqrt{3} * 440 * 0.96} = 5.87 \text{ A}$$

Tenemos una reducción del 12,50 % de corriente.

Capacidad del condensador.

$$C = \frac{1000 * PQ_C}{2\pi f V^2} = \frac{1000 * 1.477 \text{ Kvar}}{2\pi * 60\text{Hz} * (440)^2} = 20,2364 \mu\text{F}$$

Ingresando los datos en el programa obtenemos el factor de potencia los resultados se muestran en el anexo 2.

4. METODOLOGÍA

4.1. Métodos de investigación

4.1.1. Método analítico

En la presente investigación se utilizó el método experimental para descomponer el sistema eléctrico en sus partes que lo componen donde se realizó una compensación aguas arriba de la red, estudiando sus elementos.

4.1.2. Método experimental

Con este método se pudo identificar los diferentes comportamientos de la red con diferentes estados de la carga los experimentos que se realizaron fueron tanto físicos como simulados.

4.2. Tipos de investigación

4.2.1. Investigación Bibliográfica

Obtuvimos la información relacionada al tema después de realizar una investigación a través de fuentes de información como tesis, revistas, documentos electrónicos, etc. Con el cual se pudo conocer el estado actual de las nuevas tecnologías de control de factor de potencia y como otros autores han procedido al análisis de la compensación en forma automática.

4.3.2. Investigación cuantitativa

Mediante un estudio se analizó la realidad de las industrias para la obtención de datos generalizables.

4.2.3. Investigación Tecnológica

Se puso en práctica un algoritmo de programación mediante una herramienta informática.

4.3. Técnicas e instrumentos

Tabla 4.1. Técnicas e instrumentos de investigación.

No.	TÉCNICAS	INSTRUMENTOS
1	Método experimental	Amperímetro, Voltímetro, analizador de redes.
2	Modelación y Simulación	Software para permitir la corrección de factor de potencia. Matlab:
3	Pruebas de rendimiento	Simulaciones del software en distintas situaciones.
4	Hardware	Arduino Uno

Fuente: Autores.

4.4. Método experimental (Instrumentos de medición)

Amperímetro: El amperímetro es un instrumento de medida de la amplitud de la corriente eléctrica.

Voltímetro: Se llama voltímetro al dispositivo que permite realizar la medición de la diferencia de potencial o tensión que existe entre dos puntos pertenecientes a un circuito eléctrico, por lo tanto, el voltímetro revela el voltaje.

Analizador de redes: Todos los analizadores de calidad eléctrica de Fluke incluyen una medida continua que incluye información detallada sobre cada ciclo analizados durante la medida y el registro; esta función es clave para determinar el estado de su sistema eléctrico.

4.4.1. Modelamiento y simulación (Software y Hardware)

Matlab: Es una herramienta que combina un entorno amigable, sencillo y de escritorio perfeccionado para el análisis iterativo y los procesos de diseño con un lenguaje de programación que expresa las matemáticas de matrices y arrays directamente.

Arduino uno: **Arduino es una plataforma de creación de electrónica de código abierto**, la cual está basada en hardware y software libre, flexible y fácil de utilizar para los creadores y desarrolladores. Esta plataforma permite crear diferentes tipos de microordenadores de una sola placa a los que la comunidad de creadores puede darles diferentes tipos de uso.

5. IMPLEMENTACIÓN

Este programa se lo ha desarrollado utilizando las herramientas de MATLAB para la creación de la interfaz gráfica y genera un programa final ejecutable que no necesita estar previamente instalado MATLAB para su funcionamiento, el programa cuenta con todas las herramientas para el cálculo matemático y el procesamiento de datos.

El Software desarrollado presenta una pantalla de inicio ver figura 5.1., en la que se muestra el título del trabajo, los respectivos logos de la institución y cuatro botones.



Figura 5.1. Interfaz gráfica (ventana inicial).

Fuente: Autores.

Los botones ubicados en la parte inferior de la ventana de inicio permiten ejecutar los siguientes eventos, ver figura 5.2.



Figura 5.2. Botones (ventana inicial).

Fuente: Autores.

En la pantalla del programa se puede apreciar el ingreso de datos de la red, para realizar la parametrización del sistema y realizar el cálculo de flujos de potencia se presenta de una forma detallada, se muestra en la figura 5.3.

Programa

Análisis de flujo de potencia (SEP)

Datos de las barras

Número Total de Barras: Sbase: Vbase:

Barra actual: Tipo:

A A

Estado

Información de las barras

	Tipo	Pg[MW]	Qg[kVAR]	Pc[kW]	Qc[kVAR]	VPU
1						
2						
3						
4						

Datos de las líneas

Número Total de Líneas: Línea #: Calibre

De la barra: A la barra: Calibre: Distancia [m]:

R: X:

Estado

Información de las líneas

	De	A	R[pu]	X[pu]	Dist. [m]
1					
2					
3					
4					

Error:

Figura 5.3. Ventana de flujos de potencia.

Fuente: Autores.

5.1. Preparación e ingreso de datos

Antes de ingresar la información al programa esta debe ser determinada correctamente.

Una vez que se tiene la información, se ingresa el número de barras del sistema, donde se debe indicar el tipo de barra que pertenece, se muestra en la figura 5.4.

Datos de las barras

Número Total de Barras: Sbase: Vbase:

Barra actual: Tipo:

A A

Estado

Figura 5.4. Ingreso de los datos de las barras.

Fuente: Autores.

Se ingresa los datos de las líneas el cual puede ser ingresado mediante la selección del calibre del conductor (anexo 2) o de forma manual, como se muestra en la figura 5.5.

Datos de las líneas

Número Total de Líneas: Línea #: Calibre

De la barra: A la barra: Calibre: Distancia [m]:

R: X:

Estado

Figura 5.5. Ingreso de datos de las líneas.

Fuente: Autores.

En las ventanas que se visualizan a la derecha se muestran los datos ingresados del sistema de tal forma que se puedan identificar y verificar que fueron ingresados correctamente, ver figura 5.6.

Información de las barras

	Tipo	Pg[MW]	Qg[MVAR]	Pc[MW]	Qc[MVAR]	VPU
1						
2						
3						
4						

Información de las líneas

	De	A	R[pu]	X[pu]	Dist. [m]
1					
2					
3					
4					

Figura 5.6. Datos ingresados de las barras y líneas.

Fuente: Autores.

Una nueva ventana se despliega (figura 5.7.), ahí se debe llenar la información correspondiente al factor de potencia que deseamos tener en la red teniendo en cuenta la regulación Calidad del servicio eléctrico de distribución (REGULACIÓN 004-01).

The screenshot shows a software window titled "FactorPotencia" with a main heading "CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA". It features two main sections: "Datos" and "Respuestas".

Datos: This section contains three dropdown menus: "FP deseado" (set to 0.96), "Frecuencia" (set to 60), and "BarraPrincipal" (set to 3). To the right of these are two buttons: "Calcular" and "Exportar".

Respuestas: This section includes a dropdown menu for "Opción" (set to 1), a "Conectar Arduino" button, a "Desconectar Arduino" button, and a "Barra #" field. Below this is a table with the following structure:

	Potencia P [MW]	Potencia Q [kVAR]	Potencia Compensar [kVAR]	Condensador [kVAR]	Norma	FP corregido	Red. Pérdidas [%]
1							
2							
3							
4							

At the bottom left of the window is a "Regresar" button.

Figura 5.7. Cálculo del factor de potencia.

Fuente: Autores.

Al finalizar los cálculos es necesario extraer toda la información generada para su posterior análisis, para ello utilizamos la opción exportar del menú de opciones como se muestra en la figura 5.7.

5.2. Arduino

Mediante un arduino el programa se puede comunicar al exterior el cual es utilizado para variar los datos de las barras sin necesidad de estar ingresando dichos datos por teclado, esta aplicación del programa propuesto sirve para demostrar que se puede comunicar sin ningún problema con módulos externos, se muestra en el anexo xxx.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez que se ha ingresado los datos de la red para el cálculo del flujo de potencia se puede comparar los resultados entre la metodología propuesta y los estimados por el autor Glenn W. Stagg y Ahmed H. El-Abiad se puede apreciar los resultados de ambos métodos en la tabla 6.1., y el porcentaje de erro entre ellos en la figura 6.1.

Tabla 6.1. Percentage de error

	% DE ERROR	PROGRAMA PROPUESTO	MÉTODO REFERENCIA
UBICACIÓN EN LA BARRA 3	2,96	0,97065662	1,0003

Fuente: Autores.

Se observan en la tabla 6.1. que los resultados son aproximados entre los determinados por el programa propuesto y los que genera el autor Glenn W. Stagg y Ahmed H. El-Abiad, al calcular el porcentaje de error entre los resultados (ver figura 6.1.) la diferencia no supera el 3% de error.

**Figura 6.1.** comparación del error con los resultados.

Fuente: Autores.

El programa está diseñado para trabajar hasta un número de 20 barras, teniendo en cuenta que nuestro ejercicio para la demostración de la funcionalidad del programa cuenta con 7 barras tendríamos un incremento del 0.39 % de error por barra en los cálculos, esto se vuelve notorio al constatar la gráfica de la figura 6.2.

**Figura 6.2.** % de error del programa propuesto.

Fuente: Autores.

Sin embargo, persistía el error al ingresar los datos del conductor de las líneas tomadas (ver anexo 2) no eran similares al ejercicio de demostración lo cual influyo en un incremento en el error del programa propuesto para calcular el flujo de potencia.

Ubicar los bancos de condensadores depende del resultado obtenido en los flujos de potencia de cada red eléctrica que realicemos el cálculo de compensación reactiva.

7. PRESUPUESTO Y ANÁLISIS DE IMPACTOS

Tabla 7.1. Flujo de caja de la propuesta

Recursos	GASTOS		
	Cantidad	V. Unitario \$	Valor Total \$
Equipos			
Amperímetro	1	25,00	25,00
voltímetro	1	20,00	20,00
Analizador de redes	1	90,00	90,00
Arduino Uno	1	25,00	25,00
Transporte y salida de campo			
Transporte	10	0,30	3,00
Materiales y suministros			
Resmas de hojas	1	3,50	3,50
Material bibliográfico y fotocopias.			
Internet	1	20,00	20,00
Fotocopias	132	0,03	3,96
Gastos Varios			
Desayuno	5	2,50	12,50
Almuerzo	5	2,50	12,50
	Sub Total		110,46
	12%		13,25
	TOTAL		218,71

7.1. Análisis de impactos

Impacto Practico: Sirve para reducir perdidas en las industrias y evitar ser penalizados por las empresas distribuidoras de electricidad, y facilita una selección optima en la corrección del factor de potencia

Impacto Tecnológico: Con esta herramienta informática podemos eliminar poco a poco los métodos convencionales de la corrección de factor de potencia y a su vez mejorar su análisis de corrección ya que esta herramienta nos ayuda a elegir un lugar adecuado donde ubicar el banco y la potencia necesaria del mismo después de realizar un análisis aguas abajo.

Impacto Ambiental: En esta propuesta no tiene ninguna afectación hacia el medio ambiente.

Impacto Ético: Satisface directamente a la parte económica ya que con esta herramienta podremos evitar las penalizaciones de las industrias seleccionando un banco de capacitores óptimo tanto en la parte eléctrica como en la parte económica.

Impactos Epistemológicos: Cuesta conocimientos previos de programación y de un análisis de flujo de potencias y esto nos sirve para entender de mejor manera la corrección de factor de potencia estudiada anteriormente.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

- Hoy en día existen varios métodos que nos ayudan a corregir el factor de potencia y uno de los procesos más utilizados es la compensación en el nodo principal de la red, mediante técnicas de optimización se puede buscar el lugar óptimo del banco de capacitores teniendo en cuenta el beneficio técnico-económico de la red.
- El desarrollo presentado, nos ayuda a seleccionar de manera óptima módulos de capacitores, basándonos a un proceso de optimización agua abajo permitiendo conciliar el uso de los bancos de capacitores reduciendo las pérdidas del sistema en un 4%.
- El desarrollo del programa y las respuestas se validaron con ejercicios resueltos de Glenn W. Stagg y Ahmed H. El-Abiad teniendo como resultado un error aproximado del 3%.
- Al momento de realizar varias simulaciones se puede evaluar el tiempo que transcurre en compilar la solución, el programa va a depender del número de barras que posea aguas abajo

7.2. Recomendaciones

- Al momento de poner en práctica esta herramienta informática se recomienda ingresar bien los datos de flujo de potencia ya que ese cálculo es fundamental para tener una corrección y la colocación óptima del banco de condensadores, y en un futuro debemos implementar un módulo en donde se pueda establecer una comunicación entre la parte física y el software.
- Se debe tener muy en claro las restricciones de voltaje con las cuales debe funcionar el programa al momento de realizar cualquier corrección en el factor de potencia.
- Los análisis de estos controladores automáticos a futuro deben ser implementados en la carrera, o a manera de capacitación para tener una idea más clara al momento de realizar las pruebas de factor de potencia en el laboratorio.
- Lo ideal al futuro es que el programa pueda trabajar en tiempo real en el cual se pueda hacer la lectura de la variación del factor de potencia en un medio físico y no mediante el uso de una tarjeta para mover los datos de entrada.

8. REFERENCIAS

- [1] Universidad del Atlántico and Universidad Autónoma de Occidente, Corrección del Factor de Potencia y Control de la Demanda, Colombia.
- [2] R. Capella, “Corrección del factor de potencia,” Schneider Electric España S.A., vol. 075, pp. 7, octubre 2000.
- [3] I. Gutiérrez, “Mejoramiento del factor de potencia del ramal trifásico La Palma del circuito de distribución Fortuna de Coopesca R.L,” Tesis, Universidad de Costa Rica, Costa Rica, 2014.
- [4] Catálogo N° 03. Código 50034873, Corrección del Factor de Potencia, Grupo WEG, Brasil.
- [5] ABB, “Corrección del factor de potencia y filtrado de armónicos en las instalaciones eléctricas,” Cuaderno de aplicaciones técnicas N°8 (CT), pp. 3-11.
- [6] N. Fernández, W. Figueredo, “Ubicación Óptima de Bancos de Capacitores en Redes de Distribución para ELEVVAL,” Tesis, Universidad de Carabobo, Valencia, 2007.
- [7] R. Veintimilla, “Ubicación óptima de equipos de compensación reactiva. Aplicación al sistema nacional interconectado Ecuatoriano,” Tesis, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2009.
- [8] I. Gonzales; S. Marrero, “Optimización y control de la compensación de potencia reactiva con el uso de la programación dinámica”. Revista Energética. Vol. XXV, pp. 32 – 33, 02/2004.
- [9] D. Borges Vasconcellos, P. Puch González y G. Frías González, “Control de demanda eléctrica aplicando algoritmos genéticos,” *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, vol. 25, N° 3, pp. 392-393, septiembre 2017. ISSN: 0718-3291
- [10] I. Pérez. “Algoritmo genético para el balance de carga en circuitos de distribución primaria”. *Revista IEEE América Latina*. Vol. 8 N° 5. 2010.
- [11] R.N. Carvajal. “Un algoritmo genético y su aplicación”. *Revista Ingeniería Energética*. Vol. 32 N° 1, pp. 77-85. 2011. ISSN: 1815 - 5901.
- [12] E.M. Carreño. “Efficient codifications solve distribution network reconfiguration for loss reduction problem”. *IEEE Transactions on Power System*. Vol. 32 N° 4, pp. 1542-1551. 2008. ISSN: 0885-8950.
- [13] Y. Zhang and J.V. Milanovic. “Optimal placement of FACTS devices for voltage sag mitigation base dons genetic algorithms”. 12th International Conference on Harmonics and Quality of Power. Cascais, Portugal. 2006.

- [14] Y. Concepción. “Compensación de potencia reactiva en circuitos de distribución primaria, aplicando algoritmos genéticos”. Tesis de maestría. Director: Davel Borges Vasconcellos. Universidad de Camagüey. Cuba. 2015.
- [15] H. Díaz. “Reconfiguración y ubicación de condensadores en sistemas de distribución: metodología de solución simultánea usando algoritmos genéticos”. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*. Vol. 18 N° 1, pp. 144 -153, 2010. ISSN: 0718-3305.
- [16] CONELEC, “Calidad del Servicio Eléctrico de Distribución,” Quito, 2001, pp. 9.
- [17] MathWorks. (2018, junio 11). GUI de MATLAB. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/discovery/matlab-gui.html>
- [18] A, Abiad, G, Stagg. “Computer Methods in Power System Analysis” Libro de ingeniería Eléctrica. McGraw-Hill Tokio 1974
- [19] Latincasa, “Sección de calibre de un conductor eléctrico en tubería Conduit de acuerdo a la norma de instalaciones eléctricas NOM-001-SEDE-2005” *Revista Chilena de ingeniería* vol. 25. Septiembre 2017.

Firma
Abel Eloy Freire Rodríguez
Proponente 1
Email: eloy20411@hotmail.com
Telf.: 0984281835

Firma
Jeyson Alexander Pico Jiménez
Proponente 2
Email: jeyson.pico5@gmail.com
Telf.: 0983053290

Firma
PhD. Secundino Marrero Ramírez
PROFESOR TUTOR
Email: secundino.marrero@utc.edu.ec
Telf.: 0987647713

Anexos

Anexo I. Resultado del caso base 1.

FP

CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA

FP deseado:

DATOS

V: V

f: Hz

P: W

Q: VAR

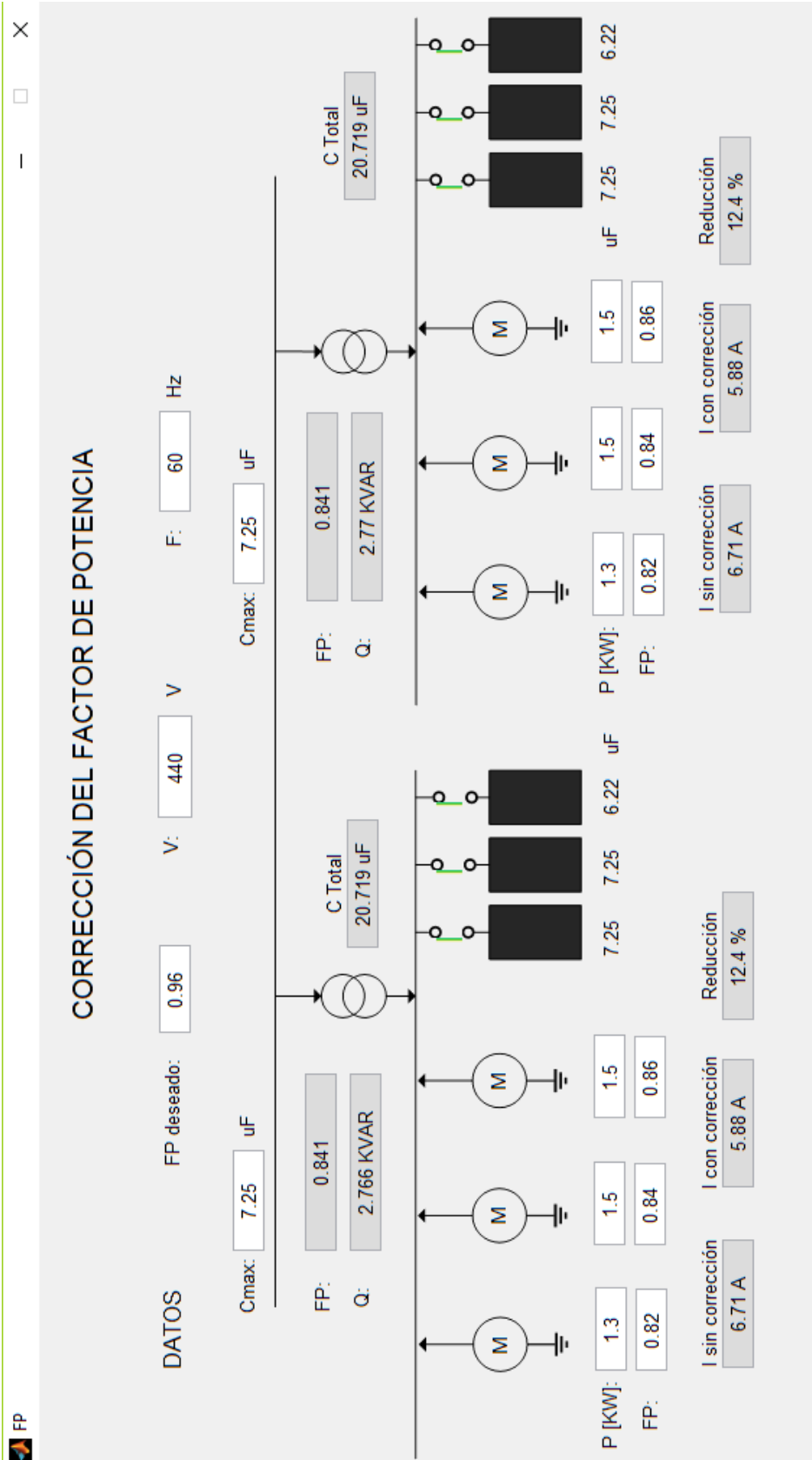
CALCULADO

FP:

C:

SI NECESITA CORRECCIÓN

Anexo II. Resultado del caso base 2.



Anexo III. Módulos capacitivos trifasicos WEG

MODULOS CAPACITIVOS TRIFASICOS WEG							
Potencia Reactiva	Tension Nominal	Frecuencia	Tipo	Fabricante	Norma	Material	Seguridad
10,0 kVAR	220 V	60 Hz		WEG Brasil	NBR IEC 60831-1/2, UL 810	Film de polipropileno metalizado	Interruptor contra sobretension interna
10,0 kVAR	380 V	60 Hz		WEG Brasil	NBR IEC 60831-1/2, UL 810	Film de polipropileno metalizado	Interruptor contra sobretension interna
10,0 kVAR	440 V	60 Hz		WEG Brasil	NBR IEC 60831-1/2, UL 810	Film de polipropileno metalizado	Interruptor contra sobretension interna
10,0 kVAR	480 V	60 Hz		WEG Brasil	NBR IEC 60831-1/2, UL 810	Film de polipropileno metalizado	Interruptor contra sobretension interna
15 kVAR	220 V	60 Hz		WEG Brasil	NBR IEC 60831-1/2, UL 810	Film de polipropileno metalizado	Interruptor contra sobretension interna
15 kVAR	380 V	60 Hz		WEG Brasil	NBR IEC 60831-1/2, UL 810	Film de polipropileno metalizado	Interruptor contra sobretension interna
15 kVAR	440 V	60 Hz		WEG Brasil	NBR IEC 60831-1/2, UL 810	Film de polipropileno metalizado	Interruptor contra sobretension interna
15 kVAR	480 V	60 Hz		WEG Brasil	NBR IEC 60831-1/2, UL 810	Film de polipropileno metalizado	Interruptor contra sobretension interna
17,5 kVAR	220 V	60 Hz		WEG Brasil	NBR IEC 60831-1/2, UL 810	Film de polipropileno metalizado	Interruptor contra sobretension interna
17,5 kVAR	380 V	60 Hz		WEG Brasil	NBR IEC 60831-1/2, UL 810	Film de polipropileno metalizado	Interruptor contra sobretension interna
17,5 kVAR	440 V	60 Hz		WEG Brasil	NBR IEC 60831-1/2, UL 810	Film de polipropileno metalizado	Interruptor contra sobretension interna
20,0 kVAR	220 V	60 Hz		WEG Brasil	NBR IEC 60831-1/2, UL 810	Film de polipropileno metalizado	Interruptor contra sobretension interna
20,0 kVAR	380 V	60 Hz		WEG Brasil	NBR IEC 60831-1/2, UL 810	Film de polipropileno metalizado	Interruptor contra sobretension interna
20,0 kVAR	440 V	60 Hz		WEG Brasil	NBR IEC 60831-1/2, UL 810	Film de polipropileno metalizado	Interruptor contra sobretension interna
20,0 kVAR	480 V	60 Hz		WEG Brasil	NBR IEC 60831-1/2, UL 810	Film de polipropileno metalizado	Interruptor contra sobretension interna

Anexo IV. Reactancias y resistencias de referencia según el conductor utilizado para el programa propuesto.

Ohms al neutro / km								
Calibre AWG o kcmil	Reactancia Inductiva (XL) para todos los conductores Ohm/km		Resistencia a la c.a a 75°C de conductores de cobre Ohm/km			Impedancia (Z) de conductores de cobre fp = 0,9 Ohm/km		
	Conduit de PVC o aluminio	Conduit de acero	Conduit de PVC	Conduit de Aluminmio	Coinduit de Acero	Conduit de PVC	Conduit de Aluminmio	Coinduit de Acero
14	0,190	0,240	10,2	10,2	10,2	9,3	9,3	9,3
12	0,177	0,223	6,6	6,6	6,6	6,0	6,0	6,0
10	0,164	0,207	3,9	3,9	3,9	3,6	3,6	3,6
8	0,171	0,213	2,56	2,56	2,56	2,38	2,38	2,40
6	0,167	0,210	1,61	1,61	1,61	1,52	1,52	1,54
4	0,157	0,197	1,02	1,02	1,02	0,99	0,99	1,00
2	0,148	0,187	0,62	0,66	0,66	0,62	0,66	0,68
1/0	0,144	0,180	0,39	0,43	0,39	0,41	0,45	0,43
2/0	0,141	0,177	0,33	0,33	0,33	0,36	0,36	0,37
3/0	0,138	0,171	0,253	0,269	0,259	0,288	0,302	0,308
4/0	0,135	0,167	0,203	0,22	0,207	0,242	0,257	0,259
250	0,135	0,171	0,171	0,187	0,177	0,213	0,227	0,234
300	0,135	0,167	0,144	0,161	0,148	0,188	0,204	0,206
350	0,131	0,164	0,125	0,141	0,128	0,170	0,184	0,187
400	0,131	0,161	0,108	0,125	0,115	0,154	0,170	0,174
500	0,128	0,157	0,089	0,105	0,095	0,136	0,15	0,154
600	0,128	0,157	0,075	0,092	0,082	0,123	0,139	0,142
750	0,125	0,157	0,062	0,079	0,069	0,11	0,126	0,131
1000	0,121	0,151	0,049	0,062	0,059	0,097	0,109	0,119

Anexo V. Ingreso de datos en el programa propuesto

Programa - □ ×

Análisis de flujo de potencia (SEP)

Datos de las barras

Número Total de Barras: Sbase: Vbase:

Barra actual: Tipo:

Potencia Generador: Voltaje Barra:

Información de las barras

	Tipo	Pg[MW]	Qg[kVAR]	Pc[kW]	Qc[kVAR]	VPU
1	Slack	0	0	0	0	1.0500
2	PV	50	0	0	0	1.1000
3	PQ	0	0	55	13	1
4	PQ	0	0	0	0	1
5	PQ	0	0	30	10	1
6	PQ	0	0	50	5	1

Datos de las líneas

Número Total de Líneas: Línea #: Calibre

De la barra: A la barra: Calibre: Distancia [m]:

R: X:

Información de las líneas

	De	A	R[pu]	X[pu]	Dist. [m]
1	1	4	0.0800	0.3700	1
2	1	6	0.1230	0.5180	2
3	2	3	0.0723	1.0500	3
4	2	5	0.0282	0.6600	4
5	3	4	0	0.1330	5
6	4	6	0.0970	0.4070	6
7	5	6	0	0.3000	7

Error:

Anexo VI. Resultados de la opción 1 correccion del factor de potencia.

FactorPotencia - □ ×

CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA

Datos

FP deseado: Frecuencia: BarraPrincipal:

Respuestas

Opción: Barra #

	Potencia P [MW]	Potencia Q [kVAR]	Potencia Compensar [kVAR]	Condensador [kVAR]	Norma	FP corregido	Red. Pérdidas [%]
1	0	0				0	0
2	0	0				0	0
3	55	13	9.9970	9.1700	NBR IEC 60831-1/2, UL 810	0.9655	13.2511
4	0	0				0	0
5	30	10	8.6768	8.3300	NBR IEC 60831-1/2, UL 810	0.9696	0
6	50	5	1.0895	0.8300	NBR IEC 60831-1/2, UL 810	0.9607	7.0845

Cálculo realizado correctamente

Anexo VII. Resultados de la opción 2 correccion del factor de potencia.

FactorPotencia

CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA

Datos

FP deseado: 0.96 Frecuencia: 60 BarraPrincipal: 3

Respuestas

Opción: 2 Barra #

	Potencia P [MW]	Potencia Q [kVAR]	Potencia Compensar [kVAR]	Condensador [kVAR]	Norma	FP corregido	Red. Pérdidas [%]
1	0	0				0	0
2	0	0				0	0
3	55	13	7.9704	7.5000	NBR IEC 60831-1/2 , UL 810	0.9552	11.4580
4	0	0				0	0
5	30	10	7.5666	7.5000	NBR IEC 60831-1/2 , UL 810	0.9599	0
6	50	5				0.9545	5.5380

Cálculo realizado correctamente

Anexo VIII. Resultados de la opción 3 correccion del factor de potencia.

FactorPotencia

CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA

Datos

FP deseado: 0.96 Frecuencia: 60 BarraPrincipal: 3

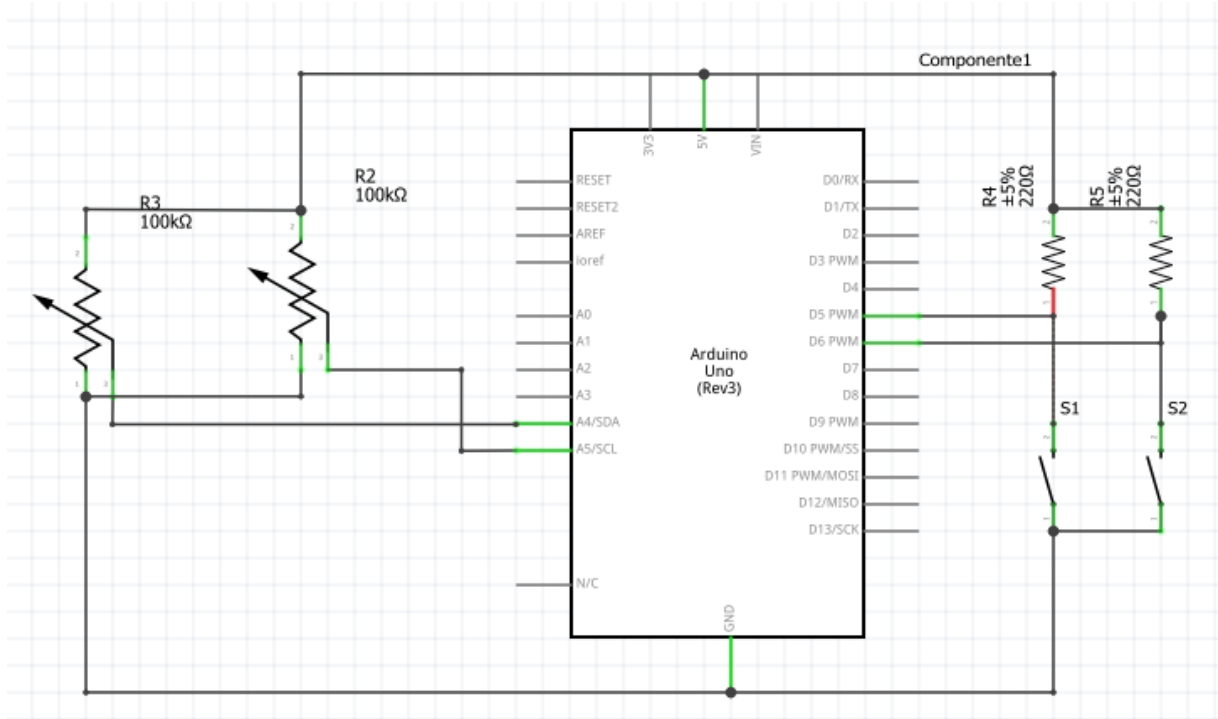
Respuestas

Opción: 3 Barra #

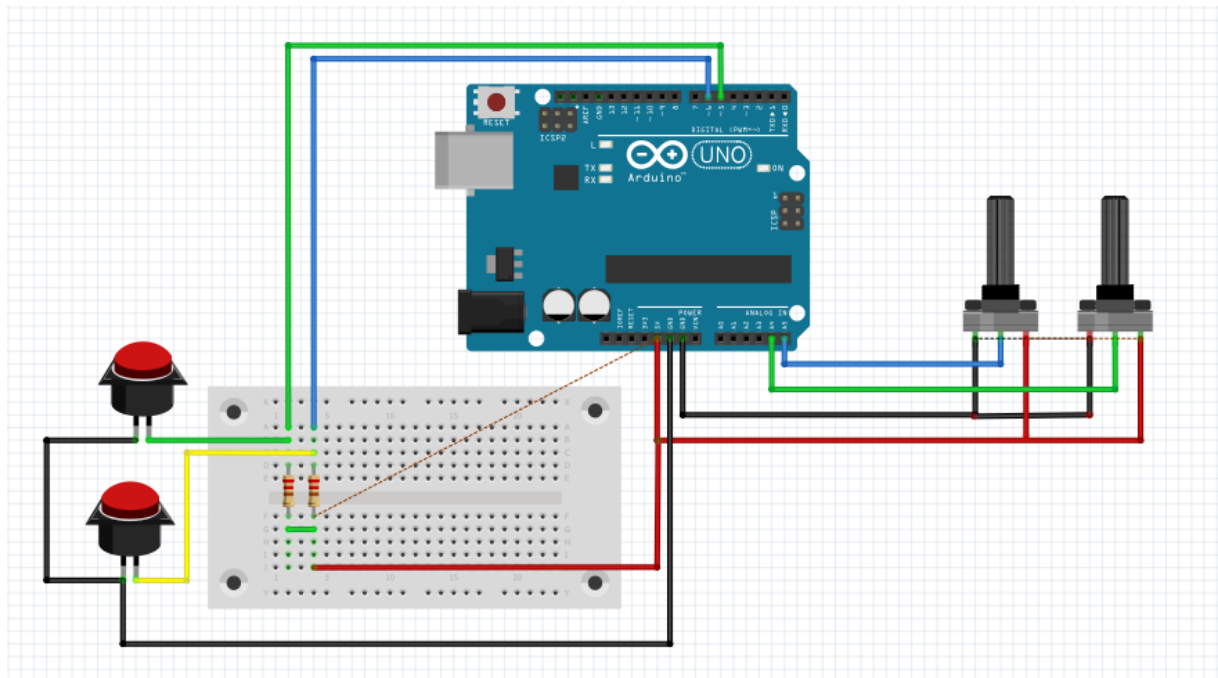
	Potencia P [MW]	Potencia Q [kVAR]	Potencia Compensar [kVAR]	Condensador [kVAR]	Norma	FP corregido	Red. Pérdidas [%]
1	0	0				0	0
2	0	0				0	0
3	55	13	6.0885	5	NBR IEC 60831-1/2 , UL 810	0.9446	9.6875
4	0	0				0	0
5	30	10	6.5386	5	NBR IEC 60831-1/2 , UL 810	0.9498	0
6	50	5				0.9544	4.8751

Cálculo realizado correctamente

Anexo IX. Circuito del arduino.



Anexo X. Esquema del arduino.



Anexo XI. Guía de usuario del programa.

GUÍA DE USUARIO

1. Pantalla de inicio



Programa

Análisis de flujo de potencia (SEP)

Datos de las barras

Número Total de Barras: Sbase: Vbase:

Barra actual: Tipo:

Voltaje Barra:

Información de las barras

	Tipo	Pg[MW]	Qg[kVAR]	Pc[kW]	Qc[kVAR]	VPU
1	-	0	0	0	0	0

Datos de las líneas

Número Total de Líneas: Línea #: Calibre

De la barra: A la barra: Calibre: Distancia [m]:

R: X:

Información de las líneas

	De	A	R[pu]	X[pu]	Dist. [m]
1	0	0	0	0	0

Error:

2. Pantalla de Análisis de Flujo de Potencia

Primero seleccionamos el número total de barras del sistema a calcular luego ingresamos la potencia base y el voltaje base en valores reales

Datos de las barras

Número Total de Barras: Sbase: Vbase:

Después ingresamos los datos de barras, vamos ubicarnos en cada barra para poder ingresar los datos de cada una.

Elegimos el número de barra y el tipo

Y así seguimos por cada una de las barras que tenga el sistema

Una vez ya ingresado todos los datos de barras le damos clic en ingresar dato donde nos dará un mensaje en color verde que significa que los datos ingresados estas correctos.

Análisis de flujo de potencia (SEP)						
Información de las barras						
	Tipo	Pg[MW]	Qg[kVAR]	Pc[kW]	Qc[kVAR]	VPU
1	Slack	0	0	0	0	1.0500
2	PV	50	0	0	0	1.1000
3	PQ	0	0	55	13	1
4	PQ	0	0	0	0	1
5	PQ	0	0	30	10	1
6	PQ	0	0	50	5	1

A su vez tenemos en el derecho una pantalla en la cual podemos verificar que los datos ingresados.

De igual manera vamos a ingresar los datos de las líneas que conectan cada una de las barras de acuerdo al sistema que vayamos a utilizar, elegimos el número total de líneas de donde a donde se conectan y el calibre de cada una, le damos clic en ingresar dato y de igual forma tendremos un mensaje en color verde que nos dirá que el dato está bien ingresado.

Datos de las líneas

Número Total de Líneas: Línea #: Calibre

De la barra: A la barra: Calibre: Distancia [m]:

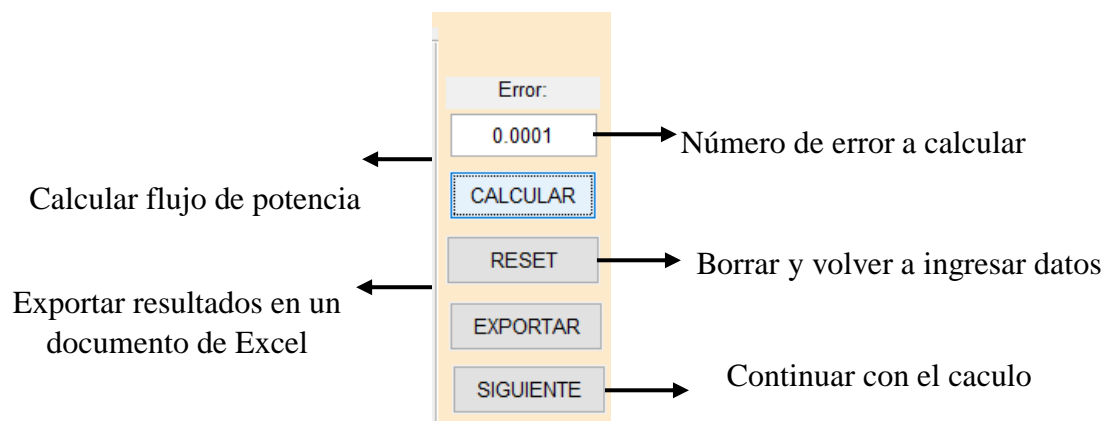
R: X:

Datos ingresados correctamente

Información de las líneas

	De	A	R[pu]	X[pu]	Dist. [m]
1	1	1	0.0102	0.1900	1
2	3	5	0.0102	0.1900	1
3	2	3	0.0723	1.0500	3
4	2	5	0.0282	0.8600	4
5	3	4	0	0.1330	5
6	4	6	0.0970	0.4070	6
7	5	6	0	0.3000	7

Después de ingresar todos los datos del análisis de flujo de potencia damos clic en calcular y después en siguiente.



FactorPotencia

CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA

Datos

FP deseado: 0.96 Frecuencia: 60 BarraPrincipal: 3

Respuestas

Opción: 1

	Potencia P [MW]	Potencia Q [kVAR]	Potencia Compensar [kVAR]	Condensador [kVAR]	Norma	FP corregido	Red. Pérdidas [%]
1							
2							
3							
4							

3. Pantalla para el Cálculo del Factor de Potencia

Debemos seleccionar los datos con los que queremos trabajar, como el factor de potencia que deseamos, la frecuencia a la cual va a trabajar nuestro sistema.

Datos

FP deseado: 0.96

Datos

FP deseado: 0.96 Frecuencia: 60

En la pestaña de barra principal debemos tener bien en claro cuál es el punto de conexión común o punto principal de entrada la red, ya que ahí es donde se va a medir el factor de potencia para que este no sea penalizado por la empresa distribuidora.

BarraPrincipal: 3

Después de ingresar los datos requeridos damos clic en calcular y obtenemos las respuestas del factor de potencia deseado y de igual manera tenemos la opción exportar para poder visualizar los resultados en una hoja de Excel.

Datos

FP deseado: 0.96 Frecuencia: 60 BarraPrincipal: 3

Después de dar clic en calcular tenemos la siguiente ventana de resultados donde vemos la corrección del factor de potencia y el porcentaje de reducción de pérdidas del sistema.

Respuestas

Opción: 1

Conectar Arduino Desconectar Arduino Barra #

	Pote	Potencia Q [kVAR]	Potencia Compensar [kVAR]	Condensador [kVAR]	Norma	FP corregido	Red. Pérdidas [%]
1	0	0				0	0
2	0	0				0	0
3	55	13	9.9970	9.1700	NBR IEC 60831-1/2 , UL 810	0.9655	13.2511
4	0	0				0	0
5	30	10	8.6768	8.3300	NBR IEC 60831-1/2 , UL 810	0.9696	0
6	50	5	1.0895	0.8300	NBR IEC 60831-1/2 , UL 810	0.9607	7.0845

Regresar Cálculo realizado correctamente

Podemos observar que tenemos un botón con el nombre de (opción) a este nos referimos que podemos elegir tres opciones del factor de potencia después de haber elegido el factor de potencia deseado por ejemplo seleccionamos fp deseado de 0.96 procedemos a seleccionar la opción 2 automáticamente se nos cambia a 0.95.

Selección de la opción 2

Respuestas

Opción: 2

Conectar Arduino Desconectar Arduino Barra #

	Potencia P [MW]	Potencia Q [kVAR]	Potencia Compensar [kVAR]	Condensador [kVAR]	Norma	FP corregido	Red. Pérdidas [%]
1	0	0				0	0
2	0	0				0	0
3	55	13	7.9704	7.5000	NBR IEC 60831-1/2 , UL 810	0.9552	11.4580
4	0	0				0	0
5	30	10	7.5666	7.5000	NBR IEC 60831-1/2 , UL 810	0.9599	0
6	50	5				0.9545	5.5380

Regresar Cálculo realizado correctamente

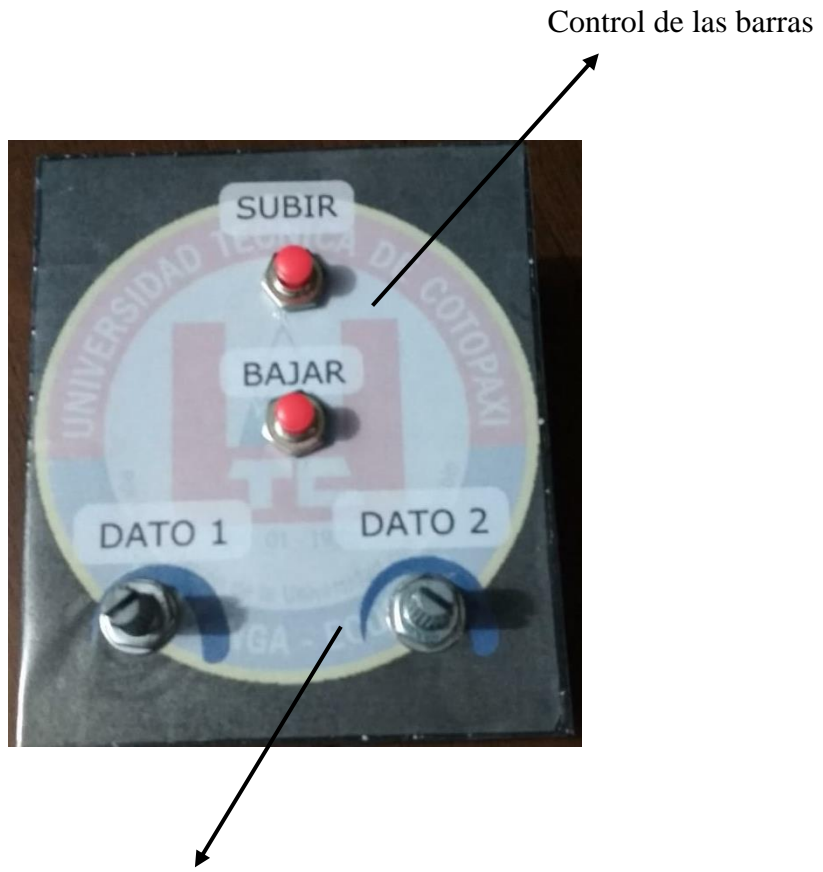
FP corregido de acuerdo a lo seleccionado

Para finalizar tenemos una pestaña denominada conectar Arduino en la cual vamos a poder modificar los valores del factor de potencia desde un módulo de control externo de muestra, con el cual vamos a poder seleccionar en que barra queremos modificar el factor de potencia, y en cuanto lo vamos a modificar.

Respuestas

Opción: 1

Conectar Arduino Desconectar Arduino Barra #



Control de las barras

Control de la variación para el factor de potencia