



Diseño e implementación de un sistema automático para la corrección de factor de potencia en la empresa EMFALU

Chicaiza Tallana, Juan José y Duy Hurtado, Jonathan Paul

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica, Automatización y Control

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de ingeniero en Electrónica, Automatización y Control

Ing. Ludeña Granja, Fausto Marcelo, M.Sc.








9 de noviembre del 2020

Document Information

Analyzed document TRABAJO_DE_TITULACION_CHICAIZA_DUY.docx (D84395886)
 Submitted 11/9/2020 3:18:00 AM
 Submitted by Ludeña Granja Fausto Marcelo
 Submitter email fmludena@espe.edu.ec
 Similarity 1%
 Analysis address fmludena.espe@analysis.orkund.com



Sources included in the report

SA	TESIS_BELTRÁN_CAMPOS.docx Document TESIS_BELTRÁN_CAMPOS.docx (D62167965)		5
SA	TESIS DISTORCIÓN ARMONICA.docx Document TESIS DISTORCIÓN ARMONICA.docx (D60192982)		2
SA	diseño condensador.pdf Document diseño condensador.pdf (D61602788)		2
W	URL: https://1library.co/document/zwvgv6gq-diseno-construccion-tablero-automatico-corre ... Fetched: 7/23/2020 4:18:36 AM		2
SA	Darwin Lastra.docx Document Darwin Lastra.docx (D62895160)		1
SA	Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / TITULACION_DANIEL_AGUIRRE_VICTOR_NUNEZ.docx Document TITULACION_DANIEL_AGUIRRE_VICTOR_NUNEZ.docx (D80361273) Submitted by: hrtiz@espe.edu.ec Receiver: hrtiz.espe@analysis.orkund.com		1
W	URL: https://quintoarmonico.es/2008/07/17/diferencias-entre-cos Fetched: 11/9/2020 3:19:00 AM		1



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación: **"Diseño e implementación de un sistema automático para la corrección de factor de potencia en la empresa EMFALU"** fue realizado por los señores: **Chicaiza Tallana Juan José y Duy Hurtado Jonathan Paul** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 9 de Noviembre 2020

Firma:

Ing. Ludeña Granja, Fausto Marcelo, M.Sc.

C. C. 1707136384.....



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y
CONTROL

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Nosotros, **Chicaiza Tallana Juan José y Duy Hurtado Jonathan Paul**, con cédulas de ciudadanía n° 1720993748 y 1724181209, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Diseño e implementación de un sistema automático para la corrección de factor de potencia en la empresa EMFALU**, es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 9 de Noviembre 2020

Firmas:

Chicaiza Tallana Juan José

C. C: 1720993748

Duy Hurtado Jonathan Paul

C. C: 1724181209



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA,
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Nosotros **Chicaiza Tallana Juan José** y **Duy Hurtado Jonathan Paul**, con cédulas de ciudadanía n° 1720993748 y 1724181209, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Diseño e implementación de un sistema automático para la corrección de factor de potencia en la empresa EMFALU** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangoquí, 9 de Noviembre 2020

Firmas:

.....
Chicaiza Tallana Juan José

C. C: 1720993748

.....
Duy Hurtado Jonathan Paul

C. C: 1724181209

Dedicatoria

Este trabajo va dedicado en especial a mis padres que gracias a su apoyo y motivación hicieron que esto sea posible, a mi hermano Kevin que vivió de cerca esta experiencia y me ayudo en muchas ocasiones, a mi familia en general, por ser una fuente de escape cuando la carga universitaria resultaba muy abrumadora. A mis amigos y futuros colegas con los cuales se vivió las diferentes experiencias que esta hermosa carrea nos trajo.

Jonathan Paul Duy Hurtado

Dedicado a mis padres, los cuales siempre serán mi mayor orgullo e inspiración, todo el esfuerzo realizado en este trabajo fue pensado en ustedes. A mis hermanos y hermanas, espero algún día devolver todo lo que me brindaron, los amo.

A mi sobrina Dominic, cada paso que doy está pensado en ti, quiero ser tu guía y un ejemplo para que en tu futuro logres todos tus sueños.

Juan José Chicaiza Tallana

Agradecimiento

Primero agradezco a Dios por brindarme salud y por guiarme en cada paso que he dado hasta alcanzar esta meta.

A mi madre Nelly por ser aquella guía la que me formo y determino las bases de la persona que soy ahora, siempre me brindo su consejo en el momento oportuno y como toda madre los debidos regaños cuando eran necesarios.

A mi padre Johni quien estuvo ahí más que como padre un amigo incondicional, aquel que siempre apoyo mis decisiones inclusive cuando a veces no eran acertadas y me dio las lecciones necesarias para comprender como es la vida.

A mi hermano Kevin, aunque él no lo crea yo lo admiro mucho, ha sido el motor fundamental de este logro porque he querido ser para él un ejemplo, alguien por el cual pueda sentirse orgulloso, con el siempre habrá algo divertido que realizar, hermano por estar ahí, gracias. A mis abuelitos, tíos primos, porque con ellos cada día difícil se puede olvidar, al final lo más importa es la familia, ya siempre te brindará una mano cuando más los necesites.

Quiero hacer un agradecimiento especial a aquella hermosa mujer llamada Dayanna la que desde primer semestre me vino tolerando, ha compartido mis múltiples éxitos y fracasos, me ha brindado su apoyo incondicional, no lo imaginaba, pero se ha convertido en la mujer a la que amo, por estar pendiente de mí por no dejarme caer, muchas gracias mi vida.

Finalmente quiero agradecer a un gran amigo y compañero de tesis Juan, eres de las pocas personas de las cuales termine admirando, una persona con mucha experiencia y de la cual he aprendido mucho, sin dudarlo puedo decir que parte de mi conocimiento se debe a ti viejo muchas gracias.

Jonathan Paul Duy Hurtado

Agradezco a mis padres José y Tránsito, por el esfuerzo que dedicaron para brindarme el regalo más valioso para una persona que es la educación, sin importar las condiciones cada mañana se despertaron a trabajar y mostrarme lo difícil que puede llegar a ser el ganarse una remuneración económica, de ellos aprendí la responsabilidad y la humildad.

Un agradecimiento a mis hermanos mayores: Ramiro, Mario, Angélica. Blanca y Guadalupe, somos el mejor equipo, cuando estamos juntos me siento feliz y completo, gracias por brindarme su apoyo y por siempre alegrar mi vida.

Gracias a mis amigos y compañeros de la universidad que fueron parte de este largo camino, cada ayuda y consejo lo atesoro en mi mente, espero algún día devolver todo lo que aprendí de ustedes.

Un agradecimiento a los docentes de la Universidad de Las Fuerzas Armadas ESPE, quienes brindaron su conocimiento para formar mi carrera.

Un especial agradecimiento al Ing. Fausto Ludeña, tutor de la tesis y Gerente de la empresa EMFALU Cía. Ltda. quien impulsó y auspició este proyecto.

Gracias a mi amigo y compañero de tesis Jonathan, esto es el inicio de algo más grande colega, sigamos adelante tenemos el mundo en nuestras manos.

Finalmente, gracias a Dios por poner a las personas correctas en este camino y por mantener a mi familia unida y con salud.

Juan José Chicaiza Tallana

Índice de contenidos

Certificación	3
Responsabilidad de autoría.....	4
Autorización de publicación.....	5
Dedicatoria	6
Agradecimiento	7
Índice de contenidos.....	9
Índice de tablas.....	15
Índice de figuras	19
Resumen.....	25
Abstract	26
Capítulo I.....	27
Introducción	27
Antecedentes.....	27
Justificación e importancia.....	29
Alcance del proyecto.....	30
Objetivos	32
Objetivo General.....	32
Objetivos Específicos	32
Descripción del proyecto	32
Capítulo II.....	35

	10
Marco teórico	35
Categorías Tarifarias	35
Categoría General	35
Tarifa General de Baja Tensión con Demanda.....	37
Factor de potencia	38
Penalización por bajo factor de potencia.....	38
Calidad de Energía Eléctrica	38
Sistema de distribución	41
Conexiones de los transformadores.....	42
Potencia Eléctrica	43
Potencia Activa.....	47
Potencia Reactiva.....	47
Potencia Aparente	48
Triángulo de Potencias.....	48
Factor de Potencia (FP) y $\text{Cos } \phi$	49
Causas del bajo Factor de Potencia	52
Efectos del bajo Factor de Potencia	52
Corrección del bajo Factor de Potencia	53
Ventajas técnicas de la corrección del Factor de Potencia	54
Métodos para la corrección del Factor de Potencia	55
Tipos de instalación de capacitores.....	56

	11
Tipos de conexión de capacitores	57
Estrella	57
Delta	59
Armónicos	59
Definición de armónicos	60
Efecto de los armónicos	60
Límites permitidos en los niveles de armónicos.....	61
Tratamiento de los armónicos	62
Sistemas para el control automático de Factor de Potencia	63
Algoritmos de control	64
Monitoreo de sistemas de análisis de recursos energéticos	65
Elementos de un sistema de monitoreo y supervisión de la energía reactiva	65
Comunicación con protocolo Modbus	66
Estructura de los mensajes.....	68
HMI (Interfaz Humano Maquina)	69
Norma ANSI-ISA 101	69
Capítulo III	74
Estudio de carga y demanda eléctrica de la empresa EMFALU.....	74
Características generales de la empresa	74
Características eléctricas del sistema.....	74
Carga del sistema	76
Obtención de parámetros eléctricos.....	77

	12
Diseño del medidor del factor de potencia	77
Requerimientos de diseño.....	78
Circuito medidor de corriente	78
Circuito acondicionador.....	79
Circuito medidor de tensión.....	81
Almacenamiento de datos.....	82
Registro de datos.....	83
Cálculo de parámetros requeridos.....	84
Diagrama de bloques	85
Diagrama de flujo.....	85
Diseño electrónico.....	87
Montaje en la red	87
Diseño de la estructura.....	88
Análisis de la red eléctrica	89
Local “Sangolquí”	90
Baja carga.....	90
Plena Carga.....	104
Local “San Rafael - Sangolquí”.....	112
Baja Carga	112
Plena Carga.....	122
Análisis Trifásico	131
Local “Sangolquí”	134
Referencia a sistema equilibrado.....	134
Referencia a sistema no equilibrado	140

Local “San Rafael”	144
Referencia a sistema equilibrado	144
Referencia a un sistema no equilibrado	145
Análisis de Facturación	147
Capítulo IV	156
Diseño e implementación del sistema de control automático y supervisión	156
Análisis de datos obtenidos en el estudio de carga	156
Análisis monofásico	156
Análisis trifásico a un sistema equilibrado	158
Análisis trifásico a un sistema no equilibrado	159
Parametrización e identificación de variables que intervienen en el diseño automático	161
Selección de componentes del sistema automático	161
Selección de los sensores	163
Selección del controlador	164
Selección del Actuador	168
Selección de los contactores para banco de capacitores	170
Selección de las Protecciones	171
Programación de controlador	173
Diseño HMI	180
Fase 1: Estándar del sistema	180
Fase 2 Diseño del entorno gráfico	181
Implementación del sistema automático	190
Normativa para la implementación de nuevos equipos en la planta industrial ..	196
Pruebas de funcionamiento	199

Capacitación y entrega del Sistema Automático para mejorar el Factor de Potencia en la empresa EMFALU	204
Manual de usuario	205
Presupuesto Referencial	205
Análisis de Resultados	207
Capítulo V	220
Conclusiones y recomendaciones.....	220
Conclusiones.....	220
Recomendaciones	224
Referencias bibliográficas	226
Anexos	232

Índice de tablas

Tabla 1 Tipos de cargas	44
Tabla 2 Factor de potencia de cargas convencionales	53
Tabla 3 Comportamiento de los armónicos	60
Tabla 4 Límites máximos de armónicos de tensión.	61
Tabla 5 Límites máximos de armónicos de corriente.....	62
Tabla 6 Funciones correspondientes al convertidor de frecuencia WEG.....	69
Tabla 7 Funciones correspondientes del Controller MASTER Lifasa.	69
Tabla 8 Características de los tableros de distribución	75
Tabla 9 Características de los tableros de distribución	75
Tabla 10 Carga instalada en el establecimiento del San Rafael	76
Tabla 11 Carga instalada en el establecimiento de Sangolquí	76
Tabla 12 Variación de Tensión 10-12-2019 "Sangolquí"	92
Tabla 13 Parámetros de Consumo de Corriente Baja Carga.....	95
Tabla 14 Variación FP Baja Carga 10-12-2019 "Sangolquí"	97
Tabla 15 Potencia activa y aparente Baja Carga 10-12-2019 "Sangolquí"	101
Tabla 16 Potencias objetivo y valor de Capacitor monofásico Fase 1 Baja Carga "Sangolquí" 102	
Tabla 17 Potencias objetivo y valor de Capacitor monofásico Fase 2 Baja Carga "Sangolquí" 102	
Tabla 18 Potencias objetivo y valor de Capacitor monofásico Fase 3 Baja Carga "Sangolquí" 102	
Tabla 19 Parámetros de Capacitor monofásico Baja Carga 10-12-2019 "Sangolquí"	104
Tabla 20 Consumo de corriente Plena Carga 10-12-2019 "Sangolquí"	106
Tabla 21 Variación de FP Plena Carga 10-12-2019 "Sangolquí".....	108
Tabla 22 Potencia activa y aparente Plena Carga 10-12-2019 "Sangolquí"	110
Tabla 23 Potencias objetivo y valor de Capacitor monofásico Fase 1 Plena Carga "Sangolquí"	110

Tabla 24 Potencias objetivo y valor de Capacitor monofásico Fase 2 Plena Carga	
"Sangolquí"	110
Tabla 25 Potencias objetivo y valor de Capacitor monofásico Fase 3 Plena Carga	
"Sangolquí"	111
Tabla 26 Parámetros de Capacitor monofásico Plena Carga 10-12-2019 "Sangolquí"	112
Tabla 27 Variación de tensión 20-12-2019 "San Rafael"	114
Tabla 28 Parámetros de consumo de corriente Baja Carga 20-12-2019 "San Rafael"	115
Tabla 29 Variación de factor de potencia Baja Carga 20-12-2019 "San Rafael"	118
Tabla 30 Potencia activa y aparente Baja Carga 20-12-2019 "San Rafael"	120
Tabla 31 Potencias objetivo y valor de Capacitor monofásico Fase 1 Baja Carga "San Rafael"	120
Tabla 32 Potencias objetivo y valor de Capacitor monofásico Fase 2 Baja Carga "San Rafael"	121
Tabla 33 Potencias objetivo y valor de Capacitor monofásico Fase 3 Baja Carga "San Rafael"	122
Tabla 34 Parámetros de Capacitor monofásico Baja Carga 20-12-2019 "San Rafael"	122
Tabla 35 Consumo de corriente Plena Carga 20-12-2019 "San Rafael"	123
Tabla 36 Variación de FP Plena Carga 20-12-2019 "San Rafael"	126
Tabla 37 Potencia activa y aparente Plena Carga 20-12-2019 "San Rafael"	128
Tabla 38 Potencias objetivo y valor de Capacitor monofásico Fase 1 Plena Carga "San Rafael"	129
Tabla 39 Potencias objetivo y valor de Capacitor monofásico Fase 2 Plena Carga "San Rafael"	129
Tabla 40 Potencias objetivo y valor de Capacitor monofásico Fase 3 Plena Carga "San Rafael"	129
Tabla 41 Parámetros de Capacitor monofásico Plena Carga 20-12-2019 "San Rafael"	130

Tabla 42 Parámetros de Potencia Reactiva Monofásica $fp=0,92$ 10-12-2019 “Sangolquí”.....	135
Tabla 43 Parámetros de Potencia Reactiva Monofásica $fp=0,94$ 10-12-2019 “Sangolquí”.....	135
Tabla 44 Parámetros de Potencia Reactiva Monofásica $fp=0,96$ 10-12-2019 “Sangolquí”.....	135
Tabla 45 Parámetros de Potencia Reactiva Monofásica $fp=0,98$ 10-12-2019 “Sangolquí”.....	135
Tabla 46 Parámetros de Potencia Reactiva Monofásica $fp=1$ 10-12-2019 “Sangolquí”	136
Tabla 47 Parámetros de Potencia Reactiva Trifásica $fp=0,92$ 10-12-2019 “Sangolquí”	137
Tabla 48 Parámetros de Potencia Reactiva Trifásica $fp=0,94$ 10-12-2019 “Sangolquí”	138
Tabla 49 Parámetros de Potencia Reactiva Trifásica $fp=0,96$ 10-12-2019 “Sangolquí”	138
Tabla 50 Parámetros de Potencia Reactiva Trifásica $fp=0,98$ 10-12-2019 “Sangolquí”	139
Tabla 51 Parámetros de Potencia Reactiva Trifásica $fp=1$ 10-12-2019 “Sangolquí”	139
Tabla 52 Valores máximos y mínimos para la compensación de potencia reactiva en un sistema equilibrado	140
Tabla 53 Parámetros de Compensación de Potencia Reactiva en un sistema no equilibrado 10-12-2019 “Sangolquí”	143
Tabla 54 Valores máximos y mínimos para la compensación de potencia reactiva en un sistema equilibrado 20-12-2019 “San Rafael”	145
Tabla 55 Parámetros de Compensación de Potencia Reactiva en un sistema no equilibrado 20-12-2019 “San Rafael”	147
Tabla 56 Resumen de consumo de Potencia Activa desde 26-06-2018 a 24-12-2019 “Sangolquí”.....	148
Tabla 57 Datos de facturación medidos y calculados desde 06-2018 a 12-2019 “Sangolquí” ..	149
Tabla 58 Resumen de consumo mensual desde 06-2018 a 12-2019 “Sangolquí”.....	151
Tabla 59 Potencia reactiva necesaria para valor de factor de potencia de 0,9 a 1 desde 06-2018 a 12-2019 “Sangolquí”.....	153
Tabla 60 Potencia reactiva que debe generar mensualmente el sistema de compensación desde 06-2018 a 12-2019 “Sangolquí”	154

Tabla 61 Potencia reactiva que debe generar diariamente el sistema de compensación desde 06-2018 a 12-2019 “Sangolquí”	155
Tabla 62 Figuras de Variación de corriente y factor de potencia	157
Tabla 63 Valores medios de variación de corriente y FP para análisis monofásico	157
Tabla 64 Potencia reactiva generada por fase, análisis monofásico.....	157
Tabla 65 Potencia reactiva trifásica generada en un sistema equilibrado	159
Tabla 66 Potencia reactiva generada en un sistema no equilibrado.....	160
Tabla 67 Valores de potencia reactiva a generar, valores calculados y comerciales	161
Tabla 68 Características de los controladores de potencia reactiva.....	165
Tabla 69 Resultado de la comparación de funciones	167
Tabla 70 Características técnicas del actuador seleccionado.....	169
Tabla 71 Identificación de bornes del controlador MASTER 6	176
Tabla 72 Lista de materiales para implementación del sistema de compensación	191
Tabla 73 Normativa para la instalación del Sistema Automático de Corrección de Potencia ..	196
Tabla 74 Análisis THD de tensión.....	201
Tabla 75 Análisis de THD de corriente	201
Tabla 76 Resultados de la temperatura del controlador.....	203
Tabla 77 Presupuesto de las alternativas de solución.....	205
Tabla 78 Variación de tensión con el Sistema Conectado 19-09-2020 EMFALU "Sangolquí" ..	208
Tabla 79 Factor de Potencia objetivo	214
Tabla 80 Factor de Potencia con el Sistema instalado 19-09-2020 "Sangolquí"	214
Tabla 81 Porcentaje de error entre valores objetivos y reales con el sistema conectado.....	215
Tabla 82 Potencia reactiva generada valores calculados.....	216
Tabla 83 Potencia reactiva generada Datos reales	218

Índice de figuras

Figura 1 Sistema automático para controlar y supervisar el factor de potencia	33
Figura 2 Topologías de distribución eléctrica.....	42
Figura 3 Intensidad adelantada 90° con respecto a la tensión	45
Figura 4 Intensidad retrasada 90° con respecto a la tensión.....	46
Figura 5 Tensión e intensidad en fase.....	46
Figura 6 Triángulo inductivo	49
Figura 7 Triángulo capacitivo	49
Figura 8 Prisma de potencia	50
Figura 9 Generador que suministra corriente en retraso	55
Figura 10 Tipos de instalación de capacitores	57
Figura 11 Conexión en estrella	58
Figura 12 Conexión en estrella con neutro flotante	58
Figura 13 Conexión en delta.....	59
Figura 14 Tipos de filtro	63
Figura 15 Diagrama de bloque de un sistema en tiempo real.....	66
Figura 16 Trama de Datos Modbus	67
Figura 17 Ciclo de vida de la norma ANSI 101.....	70
Figura 18 Sensor SCT013	78
Figura 19 Esquema circuito acondicionador de corriente.....	79
Figura 20 Circuito acondicionador para el sensor de corriente	81
Figura 21 Esquema propuesto de tensión	81
Figura 22 Circuito acondicionador para medición de tensión	82
Figura 23 MicroSD CATALEX.....	83
Figura 24 Ds3231 RTC.....	84

	20
Figura 25 Diagrama de bloques del analizador.....	85
Figura 26 Diagrama de Flujo.....	86
Figura 27 Diseño de la placa a implementar.	87
Figura 28 Diagrama de conexión en la red.....	88
Figura 29 Aspecto final del analizador.....	88
Figura 30 Distribución interna de los elementos.....	89
Figura 31 Analizador vista posterior.....	89
Figura 32 Consumo de Corriente 10-12-2019 "Sangolquí"	91
Figura 33 Variación de tensión 10-12-2019 "Sangolquí"	92
Figura 34 Consumo Corriente Baja Carga 10-12-2019 "Sangolquí"	94
Figura 35 Relación Corriente -Voltaje -FP 10-12-2019 "Bomberos", a) Fase 1, b) Fase 2, c) Fase 3.....	95
Figura 36 Variación de FP Baja Carga 10-12-2019 "Sangolquí"	97
Figura 37 Datos de factor de potencia objetivo	98
Figura 38 Valores medidos y repetibilidad de factor de potencia 20-12-2019 "Sangolquí".....	99
Figura 39 Potencia activa y aparente Baja Carga 10-12-2019 "Sangolquí"	100
Figura 40 Compensación de capacitor Análisis monofásico Baja Carga 10-12-2019 "Sangolquí"	103
Figura 41 Consumo de corriente Plena Carga 10-12-2019 "Sangolquí"	105
Figura 42 Relación Corriente - Voltaje-FP 10-12-2019 "Sangolquí", a) Fase 1, b) Fase 2, c) Fase 3	106
Figura 43 Variación de FP Plena Carga 10-12-2019 "Sangolquí"	108
Figura 44 Valores medidos y repetibilidad de factor de potencia Plena Carga 10-12-2019 "Sangolquí"	109
Figura 45 Potencia activa y aparente Plena Carga 10-12-2019 "Sangolquí"	109

Figura 46 Compensación de capacitor Análisis monofásico Plena Carga 10-12-2019	
"Sangolquí"	112
Figura 47 Consumo de corriente 20-12-2019 "San Rafael"	113
Figura 48 Variación de tensión 20-12-2019 "San Rafael"	114
Figura 49 Consumo de corriente Baja Carga 20-12-2019 "San Rafael"	115
Figura 50 Relación Corriente-Voltaje- FP 20-12-2019 "San Rafael", a) Fase 1, b) Fase 2,	
c) Fase 3	116
Figura 51 Variación de factor de potencia Baja Carga 20-12-2019 "San Rafael"	118
Figura 52 Valores medidos y repetibilidad de factor de potencia 20-12-2019 "San Rafael"	119
Figura 53 Potencia activa y aparente Baja Carga 20-12-2019 "San Rafael"	119
Figura 54 Compensación de capacitor Análisis monofásico Baja Carga	121
Figura 55 Consumo de corriente Plena Carga 20-12-2019 "San Rafael"	123
Figura 56 Relación Corriente-Voltaje-FP 20-12-2019 "San Rafael", a) Fase 1, b) Fase 2,	
c) Fase 3	124
Figura 57 Variación de FP Plena Carga 20-12-2019 "San Rafael"	126
Figura 58 Valores medidos y repetibilidad de factor de potencia Plena Carga 20-12-2019	
"San Rafael"	127
Figura 59 Potencia activa y aparente Plena Carga 20-12-2019 "San Rafael"	128
Figura 60 Compensación de capacitor Análisis monofásico Plena Carga 20-12-2019	
"San Rafael"	130
Figura 61 Potencia Reactiva monofásica de Capacitor $fp=0,96$ 10-12-2019 "Sangolquí"	137
Figura 62 Potencia Reactiva trifásica de Capacitor $fp=0,96$ 10-12-2019 "Sangolquí"	140
Figura 63 Valores de compensación de Potencia Reactiva en un sistema no equilibrado	
10-12-2019 "Sangolquí"	142
Figura 64 Identificación de pasos para el controlador de Potencia Reactiva en un sistema no	
equilibrado 10-12-2019 "Sangolquí"	144

Figura 65 Potencia Reactiva trifásica de Capacitor $f_p=0,96$ 20-12-2019 “San Rafael”	145
Figura 66 Valores de compensación de Potencia Reactiva en un sistema no equilibrado 20-12-2019 “San Rafael”	146
Figura 67 Identificación de pasos para el controlador de Potencia Reactiva en un sistema no equilibrado 20-12-2019 “San Rafael”	147
Figura 68 Triángulo de potencia con ángulo θ_1 y θ_2	152
Figura 69 Identificación de pasos según la generación de potencia reactiva	162
Figura 70 Diagrama general del sistema automático a implementar en la empresa EMFALU Cía. Ltda.	163
Figura 71 Transformador de corriente 100:5 [A]	164
Figura 72 Definición de la estructura PAJ	166
Figura 73 Resultados del método PAJ.....	167
Figura 74 Master control var 6 lifasa	168
Figura 75 Capacitor Trifásico 2.5kVAR 240 VAC 60 Hz.....	169
Figura 76 Esquemático Contactor con Precarga para Banco de Capacitores LIFASA	170
Figura 77 Breaker CHINT 16 [A] 3 polos.....	172
Figura 78 Breaker CHINT 80 [A] 3 polos.....	173
Figura 79 Conexión 3 tensiones + neutro y 3 corrientes.....	174
Figura 80 Bornes de controlador CONTROL MASTER 6	175
Figura 81 Área de display del controlador MASTER 6	178
Figura 82 Plantilla general de una HMI.....	181
Figura 83 Esquema de navegación	182
Figura 84 Pantalla de parámetros eléctricos	183
Figura 85 Parámetros de potencia.....	184
Figura 86 Medidor de FP trifásico	184
Figura 87 Información General	185

Figura 88 Graficas de consumo.....	186
Figura 89 Alarmas del sistema.....	187
Figura 90 Informes generados.....	187
Figura 91 Creación del informe	188
Figura 92 Configuración del driver Modbus	189
Figura 93 Configuración adicional.....	189
Figura 94 Mapeo de variables.....	190
Figura 95 Ubicación de canaleta y riel DIN.....	193
Figura 96 Elementos colocados en el Armario del Operador	194
Figura 97 Cableado del Armario Principal.....	195
Figura 98 Cableado del Armario del Operador	195
Figura 99 Instalación del tablero de banco de capacitores.....	196
Figura 100 Verificación del comportamiento del controlador.....	199
Figura 101 Operación de la Pantalla Principa	200
Figura 102 Operación de la Pantalla de Potencia.....	202
Figura 103 Pantallas adicionales	202
Figura 104 Variación del setpoint del FP.....	203
Figura 105 Capacitación realizada en EMFALU.	204
Figura 106 Tensiones de fase con el Sistema conectado 19-09-2020 EMFALU "Sangolquí" .	208
Figura 107 Consumo de corriente con el sistema instalado 19-0-2020 EMFALU "Sangolquí"	209
Figura 108 Relación entre Tensión, Corriente y Factor de potencia con el sistema instalado 19-09-2020 EMFALU "Sangolquí"	210
Figura 109 Variación del factor de potencia con el Sistema instalado 19-09-2020 EMFALU "Sangolquí"	211

Figura 110 Variación del factor de potencia. Datos del controlador 19-09-2020 EMFALU "Sangolquí"	212
Figura 111 Distribución de FP objetivo	213
Figura 112 Distribución FP datos reales con el Sistema conectado 19-09-2020 EMFALU "Sangolquí"	213
Figura 113 Triángulo de potencia a) QC menor a Q1, b) QC mayor a Q1	216
Figura 114 Simulación con Banco de Capacitor paso de 1131.66[VAR].....	217
Figura 115 Pantalla principal del Controlador LIFASA con el sistema conectado 19-09-2020 EMFALU "Sangolquí"	219

Resumen

El uso adecuado de la energía eléctrica implica procesos en los cuales se analiza, mide y se controla variables que influyen en las instalaciones eléctricas de un sistema. La industria aplica métodos para mitigar el uso ineficiente de la energía eléctrica que es generada en el Ecuador, es por esta razón que la empresa EMFALU Cía. Ltda. al verse afectada con la sanción económica por un bajo factor de potencia en el consumo energético, toma acciones y da el paso al diseño de un sistema automático que controle la generación y uso de la potencia reactiva en sus instalaciones. Los parámetros eléctricos como el voltaje, corriente y factor de potencia, son medidos y analizados para identificar una solución viable con la realidad de la empresa. El sistema automático consta de un controlador dedicado de energía reactiva que, por medio de un lazo de control automático, acciona bancos de capacitores calculados de acuerdo a la carga del sistema, los parámetros eléctricos son sensados por transformadores de corriente y voltaje que realimentan la señal de error entre el set point y el valor real de factor de potencia. Los datos del sistema son enviados por comunicación RS485 por medio del protocolo MODBUS RTU, hacia la administración, la cual puede observar los datos medidos en un interfaz humano – máquina HMI. Los datos del sistema se registran para procesarlos e identificar con datos reales las acciones para mejorar la eficiencia en el consumo de la energía eléctrica en el sistema.

- Palabras clave:

- **FACTOR DE POTENCIA**
- **SISTEMA AUTOMÁTICO**
- **POTENCIA REACTIVA**
- **MODBUS RTU**
- **INTERFAZ HUMANO – MÁQUINA HMI**

Abstract

The proper use of electrical energy involves processes in which variables that influence the electrical installations of a system are analyzed, measured and controlled. The industry applies methods to mitigate the inefficient use of electrical energy that is generated in Ecuador, it is for this reason that the company EMFALU Inc. Ltda., Upon being affected with the financial penalty for a low power factor in energy consumption, takes actions and gives way to the design of an automatic system that controls the generation and use of reactive power in its facilities. The electrical parameters such as voltage, current and power factor are measured and analyzed to identify a viable solution with the reality of the company. The automatic system consists of a dedicated reactive energy controller that, through an automatic control loop, activates capacitor banks calculated according to the system load, the electrical parameters are sensed by current and voltage transformers that feedback the signal of error between the set point and the real value of the power factor. The system data is sent by RS485 communication through the MODBUS RTU protocol, to the administration, which can observe the measured data on a human-machine HMI interface. The system data is recorded to process it and identify with real data the actions to improve the efficiency in the consumption of electrical energy in the system.

- Key words:

- **POWER FACTOR**
- **AUTOMATIC SYSTEM**
- **REACTIVE POWER**
- **MODBUS RTU**
- **HUMAN INTERFACE - HMI MACHINE**

Capítulo I

Introducción

Antecedentes

El uso eficiente de la energía es un tema que se ha venido analizado desde el empleo de la electricidad para generación de trabajo en la industria, el aprovechamiento de la energía eléctrica para el funcionamiento de cargas inductivas provoca un desfase entre voltaje y corriente lo que genera un rendimiento menor al esperado. (Pérez, 2006)

“El factor de potencia se define como la relación entre KW (potencia de carga real) y KVA (potencia de carga aparente) absorbida por una carga eléctrica” (Kabir, Mohsin, & Khan, 2017). La potencia aparente entregada por la empresa pública de distribución, para el caso de Sangolquí la Empresa Eléctrica Quito, es aprovechada de diferente manera por las cargas que son conectadas al sistema, para una carga puramente resistiva, la potencia eficaz que se transforma en energía o trabajo es la totalidad de la potencia aparente, para una carga inductiva (motores, transformadores) se necesita de potencia reactiva para producir campo magnético, esto hace que la señal de corriente se atrase con respecto al voltaje, ocasionando que la potencia eficaz tiene una relación menor a la unidad, las cargas capacitivas tienen el efecto opuesto a las cargas inductivas, estas almacenan energía en campo eléctrico y producen un adelanto de la señal de corriente con respecto a la de voltaje, es por esta razón que se usa capacitores para compensar esta relación y elevar el factor de potencia hasta un valor cercano a la unidad. (Guashco Rubio, 2015)

El avance de la tecnología ha hecho que el uso de dispositivos electrónicos a nivel industrial vaya en aumento, el principio de funcionamiento de estos dispositivos provoca distorsiones en la señal de corriente alterna de los alimentadores, causando

que las cargas lineales sean alimentadas por una tensión distorsionada y por lo tanto un uso ineficiente de los recursos energéticos causando un factor de potencia bajo, para contrarrestar estos efectos existen métodos de compensación de potencia reactiva o sistemas que suprimen los efectos de armónicos en los alimentadores principales. (Eltayeb, Hamza, & Babiker, 2018)

Este proceso de compensación se lo debe realizar de manera coordinada, en las plantas industriales existe una gran cantidad de cargas inductivas que entran al sistema en diferentes periodos de tiempo, esto depende del funcionamiento y uso de cada proceso, por lo cual un valor estático de potencia reactiva instalada en un banco de capacitores conectado a la red de forma directa puede causar el mismo efecto que una carga inductiva con bajo factor de potencia. (Schneider Electric, 2008)

Los procesos automáticos permiten a la industria tener niveles estables de variables físicas controlables, para el caso del factor de potencia, los dispositivos primarios de sensado son ubicados en las líneas principales de alimentación (Channappanavar & Mishra, 2016), los cuales por medio de variaciones en el campo magnético identifican distorsión y desfase en la señal de corriente y voltaje que alimenta al sistema (Roman Loera, Flores, Rizo Diaz, & Arambula Miranda, 2008). Los valores adquiridos ingresan a un sistema de control que ejecuta un algoritmo encargado de calcular la diferencia entre el valor medido y el valor de referencia del sistema, con el cual condiciona al bloque de actuadores del sistema para corregir este error, para el caso de desfase se usa como actuador un banco de capacitores y si es el caso de armónicos, un supresor.

Gran parte de la industria determinan sistemas fijos o estáticos de compensadores basados en experiencia de las personas que trabajan en la empresa o diseños básicos que no logran mantener a la variable controlada (factor de potencia) en

niveles estables y recomendados (0.92 a nivel industrial en la ciudad de Quito)
(ARCONEL, 2018)

Los criterios analizados, indican que una manera adecuada en aspectos técnicos y económicos es controlar el factor de potencia instalando bancos automáticos centrales, que puedan dar valores variables de capacitancia según se requiera en el sistema de alimentadores eléctricos. (Laketic, Radakovic, & Majtal, 2017)

Se estiman diferentes opciones para el control del factor de potencia con el uso de una relación costo-beneficio para la evaluación de las propuestas, asumiendo que el costo se relaciona con el precio de suministro, instalación y mantenimiento del sistema eléctrico, mientras que los beneficios se relacionan con la eliminación de la penalización y la bonificación por la elevación del factor de potencia, de esta manera se analiza la implementación de un sistema que brinde beneficio en el aspecto técnico y económico. (Garza Correa, Martínez Hernández, & Ramón Molina, 2008)

Justificación e importancia

El diseño de un sistema automatizado para corregir el factor de potencia brinda una solución en el consumo energético a nivel industrial y comercial, para la industria gran parte de las cargas son motores (cargas inductivas) los cuales son ocupados para diferentes fines como corte, movimiento (bandas), presión (bombas), etc. (Fu & Wang, 2017) El rendimiento de estas cargas depende de factores como, la calidad del servicio eléctrico, características estáticas y dinámicas de sus componentes, la construcción y tipo de conexión interna, además de parámetros externos como la temperatura, la carga que está siendo aplicada al motor, entre otros.

Las cargas económicas que da un sistema eléctrico de baja calidad (factor de potencia menor a 0.92) se aplica los cargos establecidos en el Artículo 27 de la Codificación de Reglamento de Tarifas correspondiente a “cargos por bajo factor de

potencia” (ARCONEL, 2018). La penalización por bajo factor de potencia será igual a la facturación mensual que depende de variables como: consumo de energía, demanda, pérdidas en transformadores y comercialización, multiplicada por un factor de potencia registrado.

El objetivo de obtener un sistema automático para la corrección del factor de potencia es proteger a los equipos y maquinaria, que, en conjunto con una red de alimentación de energía de calidad, eficiente y optimizada, disminuya el costo por consumo y minimice fallos, brindando seguridad y estabilidad.

Un método de corrección eficiente debe mantener el factor de potencia estable, además de una señal de corriente y voltaje sin distorsión y regulada, para lograr este objetivo se plantea un sistema de corrección automática, los dispositivos primarios analizan las señales de la red de alimentación, las distorsiones y campos magnéticos generados por el accionar de los diferentes tipos de cargas, ya que producen fluctuaciones en las señales de corriente y voltaje, estos errores en las señales deben ser acondicionados y controlados para accionar los recursos disponibles de potencia reactiva que permitan mantener la estabilidad de la tensión y la calidad de energía del sistema de alimentación.

El objetivo del sistema a implementar es minimizar las pérdidas en el consumo de energía eléctrica por un bajo factor de potencia, lo cual al ser estable y controlado permite al usuario mejorar la capacidad de trabajo útil en su maquinaria y evitaría el pago de multas por el consumo inadecuado de los recursos energéticos.

Alcance del proyecto

El proyecto es una aplicación de criterios de control automático para mejorar el factor de potencia en la empresa EMFALU, que se basa en el análisis de carga y el estado de las maquinarias y dispositivos que se usan en la planta industrial.

Se busca diseñar un sistema de control realimentado que identifique los valores de tensión y corriente, su respectivo desfase y fluctuaciones en la señal, para poder corregirlo según como las cargas inductivas y los dispositivos electrónicos entren al sistema.

El monitoreo y supervisión del sistema se lo debe realizar desde la estación situada en el tablero de corrección de factor de potencia, además toda esta información debe ser visualizada y monitoreada desde la administración de la planta industrial, los valores históricos y de tendencia deben ser registrados para que con estudios estadísticos se prevea los periodos en los cuales el sistema se encuentre trabajando en toda su capacidad y poder predecir fallos.

El monitoreo del sistema se realizará de forma remota desde un interfaz humano – máquina y desde las computadoras de la parte administrativa de la empresa, para que exista un nivel de supervisión del sistema y una comunicación industrial en caso de que exista anomalías en el sistema.

El tablero del sistema de corrección del factor de potencia consta de equipos de medición que muestran la información de los parámetros del sistema al alcance del nivel operativo, además de un sistema de alarmas que se muestran en la interfaz principal del tablero y se notifican al nivel administrativo por medio de la red industrial de comunicación.

Con el objetivo de mantener al sistema en niveles óptimos de funcionamiento se redacta un manual de usuario que consta de la puesta a punto y configuración del sistema mediante la interfaz, además de diagramas de conexión y características de los dispositivos, en caso de que tenga que ser reemplazado algún componente. Se redacta un plan de mantenimiento del sistema que consta de hojas de vida de las máquinas, registro de fallos, interpretación de tendencias obtenidas de la supervisión en la interfaz

y normativa de seguridad industrial a seguir en caso del reemplazo o mantenimiento correctivo de los dispositivos que componen el sistema

Objetivos

Objetivo General

- Implementar un sistema automático para mejorar el factor de potencia en la empresa EMFALU.

Objetivos Específicos

- Realizar un estudio de carga en la empresa EMFALU para conocer los factores que afectan al rendimiento en el consumo de potencia.
- Medir y analizar los parámetros que influyen en el rendimiento energético de la empresa con un estudio costo-beneficio.
- Diseñar un sistema de control automático para la corrección del factor de potencia, usando estrategias y criterios de control, instrumentación industrial y sistemas eléctricos.
- Implementar un sistema de monitoreo, supervisión y detección de fallos en el sistema de corrección de factor de potencia.
- Redactar un manual de usuario y plan de mantenimiento para optimización y mejoras del sistema.

Descripción del proyecto

Se inicia el proyecto con el análisis de las condiciones actuales de las variables eléctricas que influyen en el sistema conectando un analizador de red, el cual mide, registra y guarda los datos en un archivo de texto, la información recolectada es analizada y puesta a disposición gráfica en el software MATLAB, por medio de cálculos

se procede a diseñar el valor de potencia reactiva necesaria para mantener un factor de potencia en niveles de 0,92 a 1.

Se realiza el diseño de un sistema automático con el uso de un controlador dedicado de energía reactiva, el cual como señales de entrada tiene:

- 3 tensiones + neutro: del sistema trifásico de alimentación de la empresa
- 3 señales de corriente de los transformadores de corriente, que son los sensores del sistema.

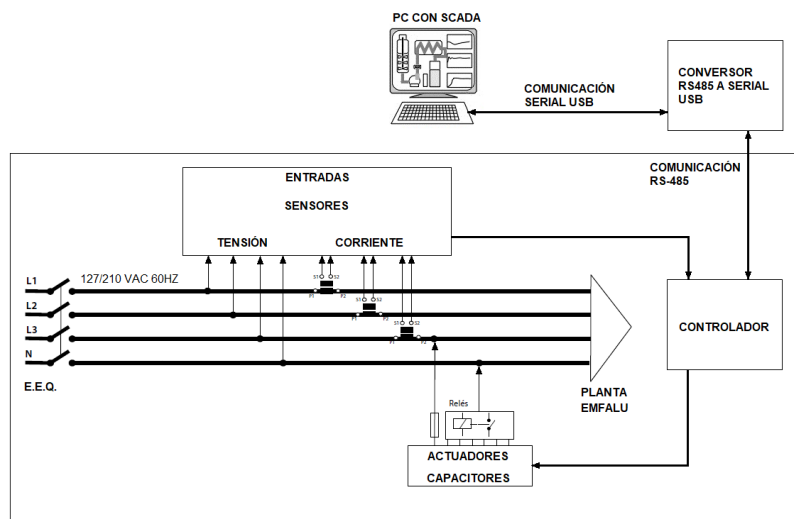
Mide las señales y su desfase para identificar el factor de potencia y la cantidad de potencia reactiva requerida para tener un nivel óptimo.

Como señales de salida tiene:

- Salida a relé las cuales conectan y desconectan banco de capacitores

Figura 1

Sistema automático para controlar y supervisar el factor de potencia



Como actuador se tiene al conjunto de banco de capacitores que se activa por pasos, la cantidad de potencia reactiva se genera cuando el sistema lo requiera. El sistema de compensación está protegido por medio de breakers termomagnéticos y

controlados por contactores con resistencias de precarga que cortan los picos de corriente a la conexión de cada banco.

El sistema es controlado desde el Armario del Operador, que consta de pulsadores de inicio, paro y paro de emergencia, además de una pantalla HMI del controlador en donde se puede visualizar los parámetros del sistema como tensiones, corrientes, potencias y factor de potencia

La administración puede visualizar y registrar los datos mediante una pantalla HMI en el computador de Gerencia de la empresa, de esta manera hay una supervisión del sistema y su funcionamiento, comunicado por medio del protocolo industrial MODBUS RTU y comunicación RS-485.

Capítulo II

Marco teórico

Categorías Tarifarias

La siguiente categorización ha sido extraída de la agencia de Regulación y Control de Electricidad (ARCONEL, 2018). La responsabilidad de la categoría tarifaria viene dada por la distribuidora, la cual se basa en las características de la carga y uso de la energía para determinar el tipo de tarifa que le corresponde al suministro solicitado, con el fin de garantizar un cobro adecuado del consumo eléctrico.

Categoría General

Esta categoría abarca a todos los servicios públicos de energía eléctrica, donde los consumidores comprenden las actividades de: comercio, industria, prestación de servicios públicos y servicios privados, los principales beneficiarios del servicio comprenden actividades como:

- a) Locales y establecimientos comerciales públicos o privados:
 - Tiendas, almacenes, salas de cine o teatro, restaurantes, hoteles y afines;
 - Plantas de radio, televisión y cualquier otro servicio de telecomunicaciones;
 - Clínicas y hospitales privados;
 - Instituciones educativas privadas;
 - Vallas publicitarias.
 - Organismos internacionales, embajadas, legaciones y consulados;
 - Asociaciones civiles y entidades con o sin fines de lucro;
 - Cámaras de comercio e industria tanto nacionales como extranjeras;

- b) Locales y establecimientos industriales públicos o privados, destinados a la elaboración o transformación de productos por medio de cualquier proceso industrial y sus oficinas administrativas.
- c) Instalaciones de Bombeo de Agua (incluye oficinas administrativas y guardianía):
- Para el servicio público de agua potable y/o al tratamiento de aguas servidas.
 - Para agua potable que no corresponda al servicio público de agua potable, uso agrícola y acuícola.
 - Para comunidades campesinas de escasos recursos económicos y sin fines de lucro.
- d) Entidades de Asistencia Social:
- Hospitales, centros de salud, asilos y similares del Estado.
 - Instituciones de asistencia social de carácter privado sin fines de lucro previa la aprobación de sus estatutos por parte del Ministerio correspondiente.
- e) Entidades de Beneficio Público:
- Guarderías, escuelas, colegios, universidades e instituciones similares del Estado.
 - Comprende a los pequeños talleres industriales con los que cuentan algunas de estas instituciones educacionales indicadas anteriormente, y cuyo objetivo es la capacitación técnica y el desarrollo de los estudiantes.
- f) Entidades Oficiales (del sector público):
- Seccional
 - Regional
 - Nacional
- g) Escenarios Deportivos:
- Oficinas, locales y escenarios de entidades deportivas.

h) Culto Religioso:

Locales destinados a la enseñanza de culto religioso (capillas, iglesias, etc.), incluyendo oficinas administrativas.

i) Servicio Comunitario (Servicio General):

Consumo de energía eléctrica para iluminación general de pasillos internos, bombeo y calentamiento de agua, ascensores, sistemas de recreación y cultura física y sistemas de seguridad en edificios, conjuntos habitacionales y centros comerciales.

j) Abonado Especial:

Se aplica para aquellos consumos auxiliares de la generación embebida en las redes de la distribuidora, exclusivo cuando dicho generador actúa como carga.

k) Y los demás que no estén considerados en la Categoría Residencial.

Tarifa General de Baja Tensión con Demanda

Se aplica a aquellos consumidores de la sección anterior, cuya demanda sea superior a los 10kW, esto como resultado de un estudio eléctrico previo a cargo de la entidad correspondiente donde dispongan de un registrador de demanda máxima, el consumidor debe pagar:

- a) Un cargo por comercialización en USD/consumidor-mes, independiente del consumo de energía.
- b) Un cargo por potencia en USD/kW-mes, por cada kW de demanda facturable, mayor información podrá encontrar en la sección 8.1 de (ARCONEL, 2018).
- c) Un cargo por energía en USD/kWh, en función de la energía consumida.

Factor de potencia

Se aplica para aquellos consumidores de la categoría general, con medición de energía reactiva, para lo cual se debe considerar:

$$FP = \begin{cases} P_{B_{FP}} = 0 & Si & FP_r \geq 0.92 \\ P_{B_{FP}} = B_{FP} \times FSPEE_i & Si & FP_r < 0.92 \rightarrow B_{FP} = \frac{0.92}{FP_r} - 1 \end{cases} \quad (2.1)$$

Dónde:

FP_R = Factor de potencia registrado

$P_{B_{FP}}$ = Penalización por factor de potencia

B_{FP} = Factor de penalización

$FSPEE_i$ = Factura por servicio público de energía eléctrica inicial

Penalización por bajo factor de potencia

La penalización es un recargo adicional que se aplica a las tarifas de baja, media y alta tensión, debido a un factor de potencia menor a 0.92. Extraído de (ARCONEL, 2018)

Calidad de Energía Eléctrica

Los sistemas residenciales, comerciales e industriales utilizan energía eléctrica desde finales del siglo XIX para transformarla en otros tipos de energía, la cual es aprovechada de varias maneras como: iluminación, movimiento, variación de temperatura, etc. El uso optimizado de esta energía depende de las características de los dispositivos transformadores, es necesario que una instalación eléctrica que siga estándares de calidad para garantizar el funcionamiento adecuado de dichos dispositivos. Las instalaciones eléctricas deben garantizar:

- Forma de onda sinusoidal
- Tensión constante, en amplitud, fase y forma de onda

- Frecuencia constante

Con el fin de garantizar la calidad de energía el gobierno ecuatoriano en su regulación No CONELEC-004/01, establece los parámetros de calidad que las empresas distribuidoras deben garantizar a sus usuarios, estos serán controlados y supervisados por el Concejo Nacional de Electricidad actualmente ARCONEL, mediante los siguientes índices (CONELEC, 2001):

a) Calidad del producto

- Nivel de voltaje
- Perturbaciones de voltaje
- Factor de Potencia

b) Calidad de servicio técnico

- Frecuencia de Interrupciones
- Duración de Interrupciones

c) Calidad de servicio comercial

- Atención de Solicitudes
- Atención de Reclamos
- Errores en Medición y Facturación

En tensión las tolerancias permitidas en las tomas de energía eléctrica de la instalación tienen un límite de hasta el 5% de la tensión nominal (CONELEC, 2001), en general, la red eléctrica esta propensa a: perturbaciones, distorsiones armónicas, ruido generado por maquinaria de gran potencia, etc., dichas perturbaciones son generadas por los dispositivos externos e internos a la instalación.

Las perturbaciones de tipo externa son generadas por descargas atmosféricas en las líneas de alimentación eléctrica de la red pública, o por instalaciones averiadas, mientras que las perturbaciones internas son producidas por dispositivos de

conmutación electrónica, el proceso de rectificación produce cambios en la forma de onda, ya que los dispositivos electrónicos necesitan energía eléctrica de corriente directa para su funcionamiento, los rectificadores que se han diseñado erróneamente retornan distorsiones a la línea originando cambios en su forma de onda afectando al rendimiento general de la red principal, produciendo distorsiones armónicas, fugas de corriente y variaciones de voltaje. El estándar IEEE 519 da a conocer un conjunto de recomendaciones prácticas y requerimientos para el control de armónicas en sistemas eléctricos de potencia, en general el documento establece la calidad de la energía y recomienda límites en la distorsión armónicas (IEEE SA, 2014).

Existen diferentes estándares para calidad de energía por ejemplo la Norma IEC 61000-4-30 establece los procedimientos de medición de cada parámetro eléctrico, con el fin de determinar la calidad del suministro eléctrico, su objetivo principal es eliminar las conjeturas al momento de seleccionar un instrumento para el análisis de la calidad eléctrica. Los parámetros que se incluyen son los siguientes: (IEC 61000, 2018)

- Frecuencia la tensión de alimentación.
- Magnitud de la tensión de alimentación.
- Flicker (parpadeo de tensión).
- Armónicos.
- Fluctuaciones de la tensión de alimentación.
- Interrupciones en la tensión de alimentación
- Desequilibrios en la tensión de alimentación.
- Transmisión de señales a través de la alimentación.
- Cambios rápidos en la tensión de alimentación.

Si se hace referencia a la mejora en la calidad energética existe la norma ISO 50001, esta norma define los requisitos para establecer, implementar, mantener y

mejorar un sistema de gestión de la energía, con el propósito de permitir a una organización ya sea: plantas industriales, instalaciones comerciales, institucionales y gubernamentales, tener una visión ordenada para lograr una mejora continua en su desempeño energético, incluyendo la eficiencia energética. La norma tiene por objeto cumplir lo siguiente: (ISO 50001, 2018)

- Ayudar a las organizaciones a aprovechar de mejor manera el consumo de energía.
- Facilitar la comunicación sobre la gestión de los recursos energéticos.
- Promover reforzar las prácticas de gestión de la energía.
- Ayudar a las instalaciones generando prioridad a la aplicación de nuevas tecnologías para la eficiencia energética
- Proporcionar un marco para promover la eficiencia energética
- Facilitar el progreso de gestión energética para los proyectos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero
- Facilitar la integración con otros sistemas de gestión, como el ambiental, salud y seguridad.

Sistema de distribución

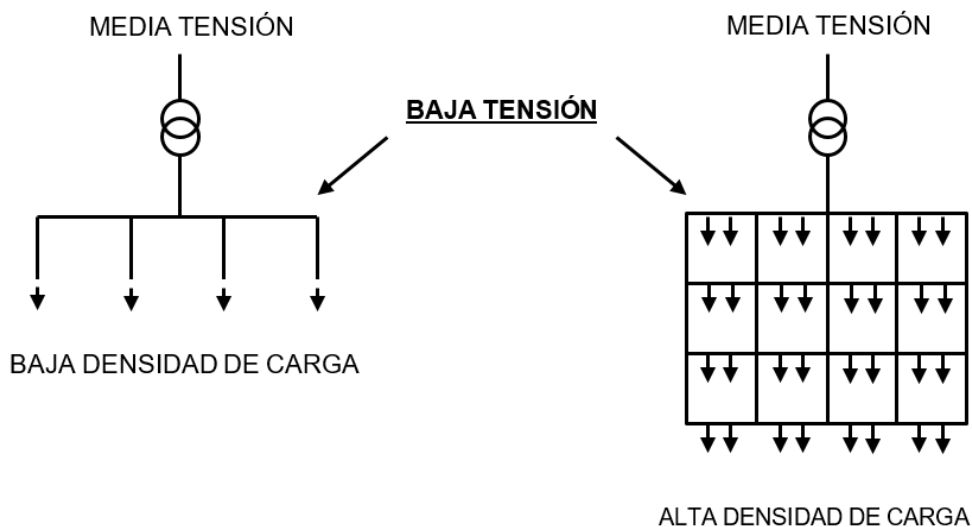
Es el conjunto de elementos que permiten energizar un número definido de cargas, ubicadas en diferentes lugares, la distribución eléctrica es la etapa final donde a partir de la red de transporte de alta tensión se logra llevar la energía hacia los usuarios finales. El sistema de distribución que emplea el Ecuador, está basado en el sistema americano, el cual posee las siguientes características: (Paéz, 2006).

- Líneas de baja tensión con radio de acción corto
- Red constituida por un gran número de transformadores, cada uno potencia definida (5 a 150kVA)

- Voltaje de servicio 110V a 60Hz, lo que establece cortas distancias entre el transformador y abonado
- Para su distribución emplea generalmente transformadores monofásico y trifásicos basados en la topología de la Figura 2.

Figura 2

Topologías de distribución eléctrica



Fuente: (Paéz, 2006)

Conexiones de los transformadores

En el área urbana los transformadores de distribución instalados son la gran mayoría trifásicos, según (Empresa Eléctrica Quito SA, 2014) la conexión de los transformadores puede ser:

- Medio voltaje a 6,3 kV, tres conductores de fase y bajo voltaje trifásico: transformador trifásico tipo convencional o pedestal con frente muerto, relación 6000 – 220/127 V, conexión Delta - Estrella, neutro secundario independiente
- Medio voltaje a 13,2 kV, un conductor de fase y bajo voltaje monofásico: Transformador monofásico tipo convencional o pedestal con frente muerto, relación 13200 GRDY/7620 - 240/120 V, neutro secundario independiente

- Medio voltaje a 22,8 kV, un conductor de fase y bajo voltaje monofásica:

Transformador monofásico convencional o pedestal con frente muerto, relación 22 860 GRDY/7620 - 240/120 V, neutro común con medio voltaje.

Potencia Eléctrica

De manera conceptual la potencia eléctrica es la velocidad con la que se consume la energía. La energía en su concepto físico es la capacidad que tiene un cuerpo, equipo o dispositivo para realizar un trabajo, en el caso de la energía eléctrica, es suministrada por una fuente de fuerza electromotriz, es decir una fuente que brinde cierto nivel de voltaje de corriente alterna o directa, esta energía fluye por los elementos conductores y permiten que los dispositivos finales puedan transformar esta energía en calor, luz o movimiento, su unidad de medida es el "joule" y se representa con la letra "J".

La potencia se mide en joule por segundo y es representada por la letra "P", esta es equivalente a un watt "W", de esta manera al consumirse un Joule de energía durante un segundo se consume un watt de potencia eléctrica. Al realizar el análisis de una carga eléctrica que es atravesada por una corriente se pueden establecer varias conclusiones, si esta corriente es continua el cálculo de la potencia eléctrica se reduce a multiplicar el voltaje en los terminales de la carga por la corriente que la atraviesa, como se observa en la Ecuación (2.2).

$$P = V \times I \quad (2.2)$$

Dónde:

P = Potencia eléctrica

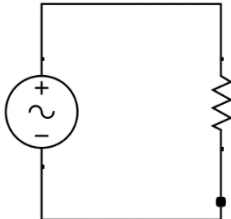
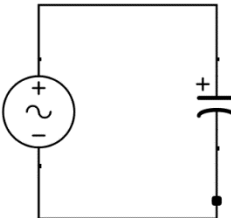
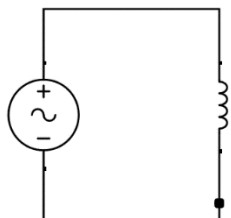
V = Voltaje

I = Corriente

La potencia que se obtiene de la ecuación se la denomina potencia aparente, mientras que la potencia activa y reactiva dependerá de la diferencia de fase o el ángulo de desplazamiento entre el voltaje y corriente, esté ángulo se representa como ϕ . Esta ecuación también se puede aplicar para una carga resistiva pura, que es atravesada por una corriente alterna, ya que las señales de tensión y corriente están en fase, es decir que la señal periódica no se encuentra desplazada una de otra. En el caso de que la carga a la que se quiere atravesar posee reactancia, sea capacitiva o inductiva, la señal de corriente se atrasaría o adelantaría con respecto al voltaje, por lo que los valores máximos, mínimos y el cruce por cero no coincidirían.

Tabla 1

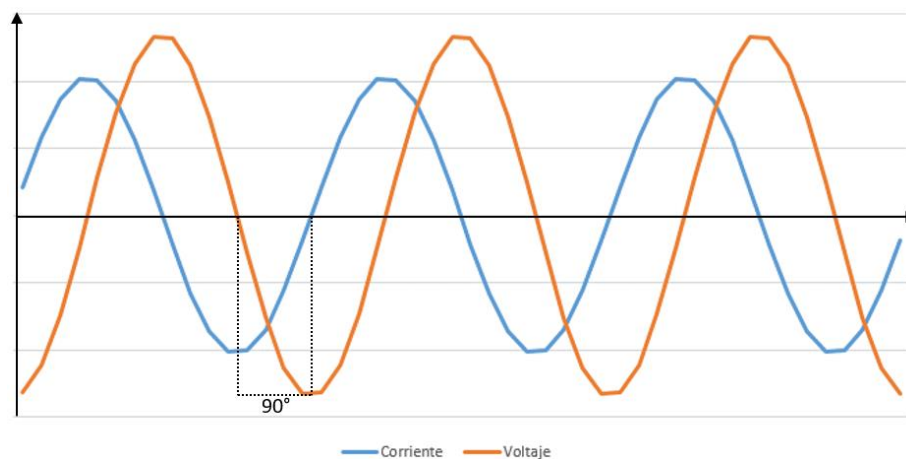
Tipos de cargas

Potencia Reactiva	Tipo de carga	Factor de potencia
$Q = 0$	Cargas resistivas 	FP unitario
$Q < 0$	Cargas capacitivas 	FP adelanto
$Q > 0$	Cargas inductivas 	FP atraso

Existen dos tipos de cargas reactivas (Tabla 1), si la carga reactiva es de tipo capacitiva (capacitores), cuando la tensión de la fuente va desde cero a un valor máximo, la energía ingresa al capacitor y la señal de tensión entre los terminales de la carga aumenta hasta un máximo y se almacena en forma de campo eléctrico, mientras que cuando la tensión de la fuente va desde su valor máximo a cero, es la carga capacitiva la que entrega energía de retorno hacia la fuente.

Figura 3

Intensidad adelantada 90° con respecto a la tensión

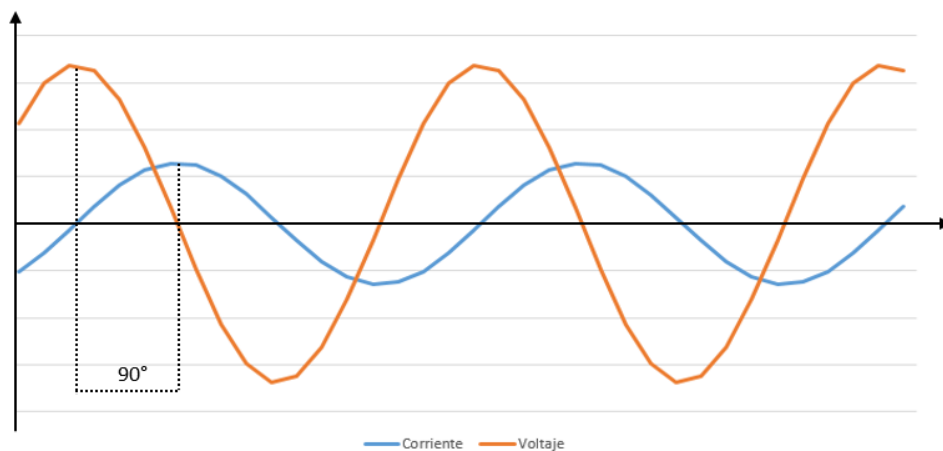


Si la carga reactiva es de tipo inductiva (inductores), cuando la señal de corriente va de cero a su valor máximo, la fuente entrega energía al inductor, la cual se almacena en forma de campo magnético, y cuando la corriente pasa de su valor máximo a cero, el inductor se encarga de entregar energía hacia la fuente.

Se concluye que no existe un consumo en la fuente, ya que en la energía que suministra es devuelta por las cargas capacitiva e inductiva, esta potencia que retorna hacia la fuente se denomina potencia reactiva, es decir si existe una carga resistiva pura, no existe un retorno de energía hacia la fuente. Las cargas reales en la industria tienen componentes resistivos y reactivos, entonces parte de la potencia se consume en la carga resistiva y parte se retornará a la fuente (carga capacitiva e inductiva).

Figura 4

Intensidad retrasada 90° con respecto a la tensión

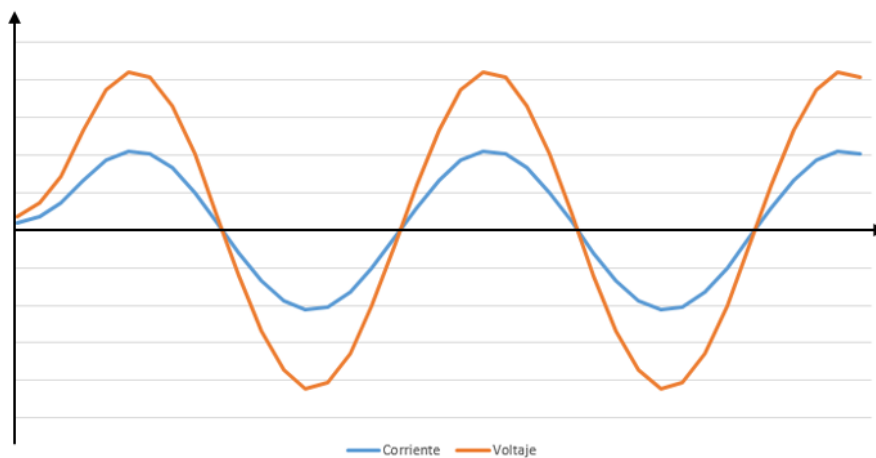


La potencia se obtiene de la multiplicación de la corriente y voltaje en cualquier momento se denomina potencia instantánea, y tiene las siguientes características:

- Si el voltaje y la corriente son positivos, la fuente entrega energía al sistema
- Si el voltaje y la corriente son de valores opuestos, tiene una potencia negativa y la potencia es entregada hacia la fuente, es decir es una potencia reactiva.

Figura 5

Tensión e intensidad en fase



Potencia Activa

Es la potencia útil que consume un equipo eléctrico para realizar el trabajo, es decir la energía que realmente se aprovecha cuando se enciende un equipo, esta potencia tiene como características:

- Es originada por la componente de corriente y voltaje que están en fase.
- Es la potencia que se desarrolla como trabajo útil
- Su unidad de medida es el W y sus múltiplos más comunes son kilowatt (kW) y megawatt (MW).

La potencia monofásica se calcula de la siguiente manera:

$$P = V \times I \times \cos(\phi) \quad (2.3)$$

Dónde:

P = Potencia eléctrica

V = Voltaje

I = Corriente

ϕ = Ángulo de desplazamiento

Potencia activa trifásica (Obregón & Zeas, 2018)

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos(\phi) \quad (2.4)$$

Potencia Reactiva

En la industria se usan cargas inductivas como motores, transformadores, relés, etc., estas necesitan de campo magnético para su funcionamiento y consume un tipo de potencia denominada potencia reactiva, la cual genera campos magnéticos en las cargas inductivas y campos eléctricos en las cargas capacitivas, generando un desfase de 90 grados de la corriente con respecto al voltaje, su unidad de medida es volt-ampere reactivo (VAR) (Matthew & Charles, 2006). Es posible calcularla con la siguiente expresión.

$$Q = V \times I \times \text{sen}(\phi) \quad (2.5)$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$$

Dónde:

Q = Potencia reactiva

V = Voltaje

I = Corriente

Potencia Aparente

Se denomina también potencia total, dado que representa la cantidad de potencia consumida de la red, esta potencia se mide en volts-ampere (VA), y se la puede calcular con la siguiente ecuación:

$$S = V \times I \quad (2.6)$$

Dónde:

S = Potencia aparente

Debido a que el factor de potencia es adimensional también se la puede calcular como la relación entre la potencia promedio y la potencia aparente.

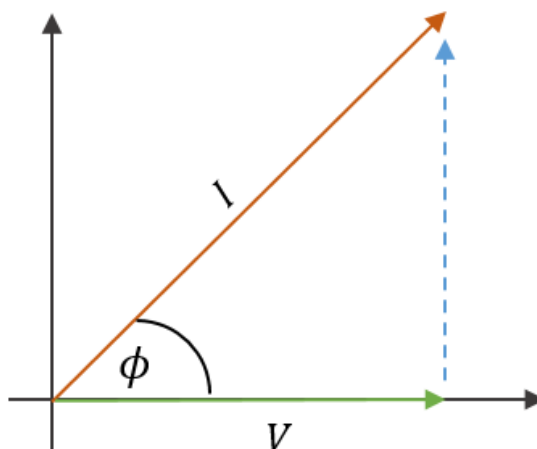
$$fp = \cos(\phi) = \frac{P}{S} \quad (2.7)$$

Dónde:

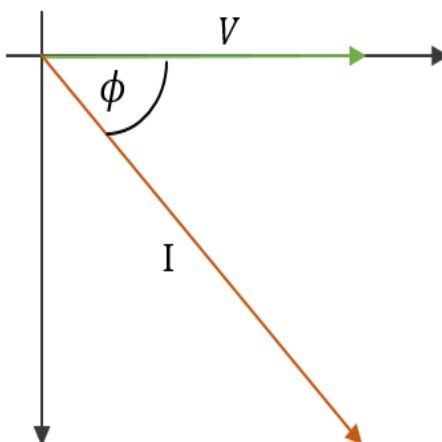
fp = Factor de potencia

Triángulo de Potencias

Las potencias activa, reactiva y aparente, se pueden expresar mediante un triángulo de potencias para las cargas inductivas y capacitivas. En la carga inductiva la señal de corriente está en retraso con respecto a la señal de voltaje (Figura 6):

Figura 6*Triángulo inductivo*

En la carga capacitiva la señal de corriente está en adelanto con respecto a la señal de voltaje (Figura 7):

Figura 7*Triángulo capacitivo***Factor de Potencia (FP) y $\cos \phi$**

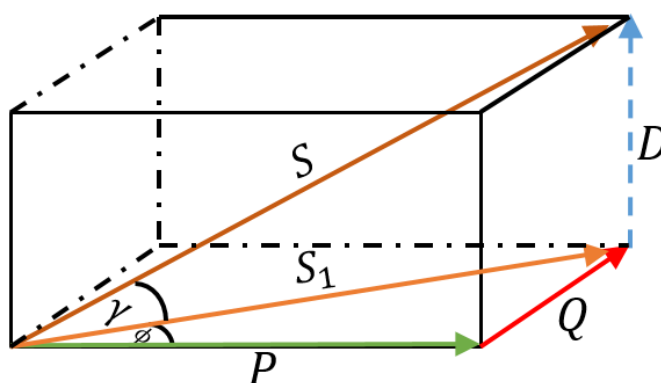
El factor de potencia es utilizado como un indicador de eficiencia en el uso de la potencia eléctrica, es el cociente entre la potencia activa y potencia aparente, como en

la ecuación (2.7), esto ocurre siempre y cuando la onda de corriente alterna sea perfectamente senoidal. Dado que en la industria la onda no es perfecta, el FP no estaría compuesto solo por P y Q, sino que aparecería una componente adicional proveniente de la suma de las potencias que generan una distorsión, esta componente se llamara D.

Dentro de la industria existe la presencia de THD (Tasa de Distorsión Armónica) proveniente de las corrientes armónicas presentes en la instalación, estas corrientes junto con la tensión generan una potencia la cual correspondería al total de distorsiones D gráficamente se la puede visualizar en la Figura 8.

Figura 8

Prisma de potencia



En la parte inferior del prisma se tiene el triángulo de potencias común con la diferencia que en la hipotenusa no es S sino S1. Dado que el FP involucra las distorsiones es necesario tener en cuenta las componentes que involucran a D, para lo cual se presta atención al ángulo γ y partiendo de la definición de FP como la relación entre P y S se tiene:

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (2.8)$$

Como se evidencia el FP y el $\cos(\phi)$ son términos distintos, el coseno de phi depende exclusivamente de la potencia activa (P), como reactiva (Q) mientras que el factor de potencia dependerá de P, Q y de las distorsiones (D) (Quintoarmonico, 2017). A continuación, se presentas las demás formas de calcular el FP: de forma fasorial:

$$S = P + jQ \quad (2.9)$$

En relación con el coseno del ángulo ϕ , que se forma la potencia activa P y aparente S, el factor de potencia es:

$$fp = \cos(\phi_v - \phi_i) \quad (2.10)$$

Si se tiene un sistema trifásico las potencias se pueden calcular de la siguiente forma: (Ribas, 2015)

$$Q = \sqrt{3}V \times I \times \sin(\phi) \quad (2.11)$$

$$S = \sqrt{3}V \times I \quad (2.12)$$

El factor de potencia puede tener valores entre cero y uno, si se tiene un valor cercano a uno, existe un uso eficiente de la energía en el sistema, mientras que, si el factor de potencia tiene un valor cercano a cero, se tiene un valor ineficiente de la energía en el sistema, el factor de potencia en atraso se da cuando la señal de corriente está atrasada con respecto a la de voltaje (cargas inductivas), se tiene un factor de potencia en adelanto si la señal de corriente esta adelantada con respecto a la señal de voltaje, el valor de factor de potencia será el ángulo de desfase entre las señales de voltaje y corriente.

Causas del bajo Factor de Potencia

El bajo factor de potencia principalmente se da debido a la gran cantidad de equipos que se encuentran en la red y que generan potencias reactivas, el exceso de la energía reactiva en la red genera daños a las instalaciones eléctricas debido a sobrecargas o produciendo caídas de tensión, esto genera que la corriente se desfase en relación del voltaje lo que provoca un bajo factor de potencia, las causas más comunes de un bajo factor de potencia se da por equipos como: (Llumiquina Loya, 2012)

- Motores de inducción.
- Motores en vacío.
- Transformadores mal dimensionados.
- Hornos eléctricos.
- Soldadoras eléctricas.

Efectos del bajo Factor de Potencia

Cualquier instalación puede trabajaba con un factor de potencia menor que uno, esto atrae consecuencias como: (Arcos & Chicaiza, 2015)

1. Aumento en las perdidas por efecto Joule.
2. Sobrecargas en transformadores, generadores y líneas de distribución.
3. Incremento de la caída de voltaje.
4. Disparos sin razón aparente de los dispositivos de protección.
5. Mayor capacidad de los conductores.
6. Deterioro de los aislamientos de los conductores.
7. Incremento de la facturación eléctrica.

Corrección del bajo Factor de Potencia

Como muchas cargas en la industria son del tipo inductivo, el desfase entre voltaje y corriente existente es mucho mayor esto ocasiona que el factor de potencia varíe significativamente. La potencia reactiva presente no genera trabajo directo en las cargas, pero es fundamental para generar un flujo electromagnético presente en motores, equipos de refrigeración, soldadores, etc.

Tabla 2

Factor de potencia de cargas convencionales

Dispositivo	Cos(ϕ)
Motor síncrono a: 0%	0.17
25%	0.55
50%	0.73
75%	0.80
100%	0.85
Lámparas incandescentes	1
Tubos fluorescentes no compensados	0.5
Tubos fluorescentes compensados	0.93
Lámpara de descarga	0.4 a 0.6
Hornos a resistencia	1
Hornos a inducción con compensación incorpora	0.85
Hornos a calentamiento dieléctrico	0.85
Hornos de arco	0.8
Máquinas de soldar a resistencia	0.8 a 0.9
Electrodos monofásicos	0.7 a 0.9
Transformadores rectificadores de soldadura de arco	0.7 a 0.9

Fuente: Tomado de (Llumiquinga Loya, 2012)

Si existe una cantidad considerable de estos equipos, la potencia reactiva se vuelve significativa, lo cual conlleva a tener un factor de potencia bajo. Un factor de potencia bajo atrae varias desventajas como se menciona en la sección anterior, por lo mencionado es necesario realizar una corrección del factor de potencia, donde la alternativas más económica y más empleada es el empleo de capacitores, los cuales serán conectados en paralelo, y su principal objetivo es mitigar el desfase generado por estas cargas. Para realizar la corrección, es necesario conocer la capacidad en KVAR

requeridos para corregir dicho factor, para lo cual se hace empleo de la siguiente ecuación:

$$Q[kVAR] = P(\tan(\phi_1) - \tan(\phi_2)) \quad (2.13)$$

También es posible calcular el valor real del capacitor requerido para la compensación y se emplea la siguiente ecuación:

$$Cap = \frac{Q_c}{\omega V^2} = \frac{P(\tan(\phi) - \tan(\phi_2))}{\omega V^2} \quad (2.14)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (2.15)$$

Dónde:

Cap = Capacitor

Q_c = Potencia reactiva para compensación

ω = Velocidad angular

f = frecuencia

Entre otras alternativas se tiene:

- Reducir el tiempo de operación en vacío de los motores
- Evitar la operación de equipos con un voltaje menor al especificado.

Ventajas técnicas de la corrección del Factor de Potencia

Si se mejora el factor de potencia de la red eléctrica se obtiene mayor eficiencia en el consumo de energía y los siguientes beneficios técnicos. (Grupo Elecond, 2018)

- Mayor aprovechamiento en la capacidad interna de distribución de la energía.
- Reducción de las pérdidas eléctricas.
- Mejora de la calidad de energía
- Eliminación de penalidades por bajo factor de potencia

Métodos para la corrección del Factor de Potencia

Para realizar la corrección del factor de potencia se lo debe realizar de forma cautelosa, tratando de mantenerlo lo más alto posible, pero sin llegar a la unidad, para evitar problemas de resonancia, que lo único que atraerán será intensidades peligrosas en la red. (Arcos & Chicaiza, 2015). Entre las alternativas se puede encontrar:

a) Maquinas síncronas

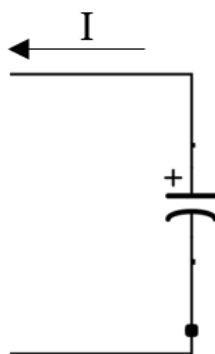
Son dispositivos que se encargan de transformar la energía mecánica rotacional en energía eléctrica, se destaca ya que puede operar como generador de KVAR, esta característica les permite funcionar como compensadores de bajo factor de potencia.

b) Capacitores estáticos

Las implementaciones de estos elementos ayudan a compensar el factor de potencia, por lo general se piensa en el capacitor como un generador de potencia reactiva positiva, en vez de considerarlo como una carga que requiere potencia reactiva negativa. El capacitor suministra la Q requerida por la carga inductiva, es decir entrega una corriente en atraso a la carga como se observa en la Figura 9 (Grainger & Stevenson Jr, 1996).

Figura 9

Generador que suministra corriente en retraso



Este método es el más aconsejable de implementar a nivel industrial debido a las siguientes ventajas: (LlumiQuinga Loya, 2012)

- Es un equipo de alto rendimiento 99% para potencias pequeñas.
- No se necesita algún tipo de combustible para que entre en funcionamiento.
- Su consumo eléctrico es muy pequeño no más de 3 vatios por KVAR

Sin embargo, este método también presenta las siguientes desventajas

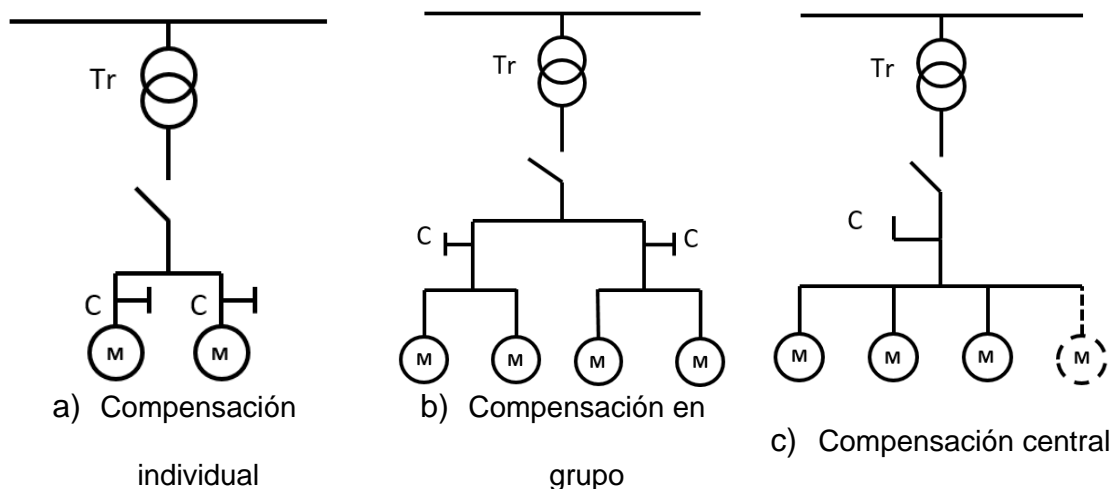
- Si la planta comienza a trabajar con pequeñas cargas, es posible que se genere resonancia, lo que produce que el capacitor se sobrecaliente, por lo cual es recomendable dejar el mínimo número posible para evitar la resonancia o a su vez desconectarlos.
- Si el dieléctrico se ve perforado en el interior del capacitor se generará un cortocircuito el cual puede ocasionar que el tanque del capacitor explote, para esto se recomienda un fusible rápido individual mayor que el 170% de la corriente nominal del capacitor

Tipos de instalación de capacitores

Los capacitores o bancos de capacitores pueden ser instalados en diferentes partes de la planta y podrán mejorar el factor de potencia, sin embargo, antes de instalar los capacitores se deben tomar en cuenta factores como: la carga eléctrica, variación, distribución y longitud de circuitos, factor de carga, disposición, tensión entre líneas etc., en la Figura 10, se presentan los esquemas más comunes de instalación: (Méndez, 2014)

Figura 10

Tipos de instalación de capacitores



- Compensación individual:** en esta configuración a cada carga inductiva se le asigna un capacitor que ayude a la compensación, las pérdidas por efecto Joule en los cables se suprimen, pero puede llegar a ser muy costosa de implementar.
- Compensación en grupo:** esta configuración se debe emplear cuando varias cargas se conecten simultáneamente, sin embargo, presenta una clara desventaja en caso de existir una sobrecarga de potencia reactiva esta seguirá circulando entre el centro de control y los motores, por otro lado, el efecto Joule en los cables solo disminuye.
- Compensación central:** es una solución general ya que esta instalación se la realiza directamente en la acometida, es principalmente utilizada con controladores automáticos que inyectan energía reactiva según se la necesite.

Tipos de conexión de capacitores

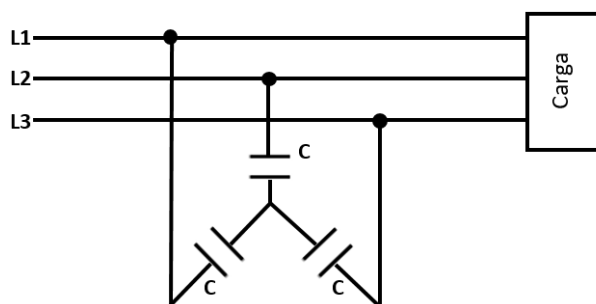
Estrella

Este tipo de conexión se emplea en instalaciones de hasta 35 KV, se la puede visualizar en la Figura 11, una ventaja que esta conexión ofrece es poder balancear las

fases de forma más fácil, sin embargo, posee una desventaja si un capacitor llega a presentar una falla, eso generara una sobretensión en las demás unidades creando mayor esfuerzo en los aisladores.

Figura 11

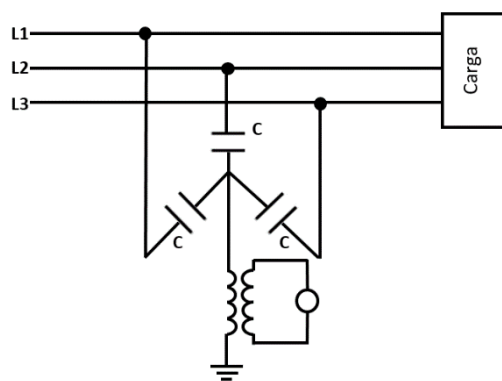
Conexión en estrella



Existe una variación en esta conexión y es con neutro flotante (Figura 12), es empleada en sistemas mayores a los 13.4 KV, la ventaja que esta conexión ofrece es que puede evitar la presencia de transitorios de sobretensión, en esta conexión se genera un desbalance del voltaje, esto provoca que exista tensión en el neutro, para solucionar este problema se recomienda instalar protecciones contra sobre corrientes en la línea del neutro. (Izurieta, 2015)

Figura 12

Conexión en estrella con neutro flotante

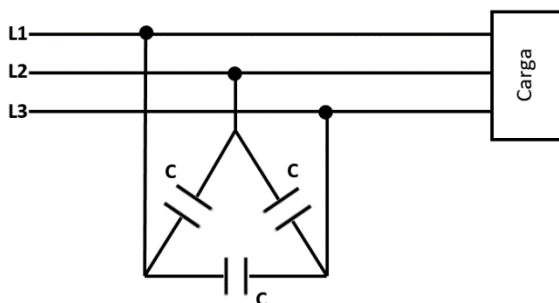


Delta

Esta conexión se la visualiza en la Figura 13 emplea generalmente en sistemas de baja tensión, su ventaja radica en que puede solucionar problemas relacionados con desbalances de las fases, con respecto al costo de la implementación, esta es mucho más económica que las conexiones en estrella, las protecciones que se deben emplear en este tipo de instalaciones ya sea delta o estrella debe ser un breaker principal y un breaker por cada capacitor a emplear. (Izurietta, 2015)

Figura 13

Conexión en delta



Armónicos








Hoy el día el incremento en el uso de diferentes dispositivos electrónicos que ayudan a mejorar la eficiencia en los procesos de potencia, han generado cambios en los tipos de cargas conectadas a la red. Estos dispositivos pueden ser desde ordenadores personales, hasta variadores de frecuencia, estos son empleados en: industrias, empresas, hoteles, etc., llegando a distorsionar la forma de onda de la red, a esto se lo conoce como armónica. (CIRCUTOR, 2013).

Definición de armónicos

Un armónico se define una perturbación que afecta a la amplitud y forma de onda, cuyas frecuencias son múltiplo de la frecuencia fundamental (Tabla 3). (Arcila, 2010)

Tabla 3

Comportamiento de los armónicos

Orden	Fund.	2	3	4	5	6	7
Frecuencia	60	120	180	240	300	360	420
Secuencia							

Efecto de los armónicos

En la industria el uso de dispositivos electrónicos que mejoren el rendimiento energético ha ido creciendo significativamente haciendo evidentes problemas que años atrás no se presentaban entre los cuales se tiene: (Arcila, 2010)

- 1) Incremento de sollicitación termina
 - Perdida en los conductores
 - Perdida en magnéticas en maquinas
- 2) Mayor aislación en cables y capacitores
 - Caídas de tensión considerables
 - Perdidas de capacidad de distribución en las líneas de energía
 - Sobrecargas de los conductores.
 - Presencia de una cantidad importante de corriente en el neutro
- 3) Funcionamiento anormal de máquinas y equipos
 - Interferencias en comunicaciones

- Errores de medición
 - Interferencias en dispositivos de control
- 4) Resonancia en la red
- Explosión de bancos de capacitores
 - Sobrecarga en transformadores
 - Daño a fusibles

Es evidente que la presencia de armónicos en una instalación atrae grandes consecuencias que se resumen principalmente a pérdida de la confiabilidad del sistema eléctrico, lo cual trae consigo costes económicos significativos a la empresa, entre los cuales se tiene: (CIRCUTOR, 2013)

- 1) Mayor consumo eléctrico
- 2) Recargo por pago de energía reactiva
- 3) Perdidas en la distribución
- 4) Perdidas de potencia
- 5) Paradas no planificadas de los procesos productivos

Límites permitidos en los niveles de armónicos

La agencia regulatoria (ARCONEL, 2018) establece límites máximos de armónicos presentes en la red con el fin de garantizar la calidad de energía, por tal razón se debe tener en cuenta que la instalación no sobrepase dichos límites, en la Tabla 4 se presentan los límites correspondientes a voltaje mientras que en la Tabla 5 los límites correspondientes a la corriente.

Tabla 4

Límites máximos de armónicos de tensión.

Nivel de voltaje	Armónica individual (%)	THD (%)
Bajo	5.0	8.0
Medio	3.0	5.0
Alto (Grupo 1)	1.5	2.5
Alto (Grupo 2)	1.0	1.5

Tabla 5

Límites máximos de armónicos de corriente

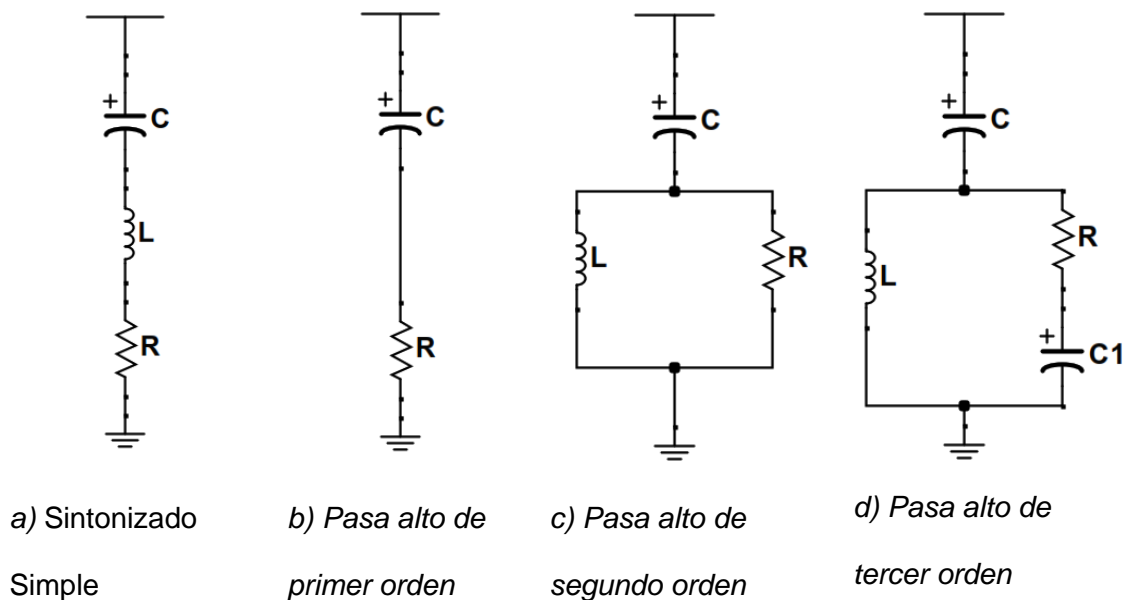
Nivel máximo de armónicos impares (% de la corriente máxima de demanda)						
I_{cc}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	TDD
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20 < 50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50 < 100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100 < 1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Tratamiento de los armónicos

Con la finalidad de eliminar los armónicos de la red, se debe buscar una solución técnica y económica, la solución más adecuada sería filtrar directamente las cargas que generan distorsión, de esta manera se evitara la propagación de los armónicos hacia la red, se pueden emplear filtros con el fin de mitigar sus efectos, la Figura 14 representa los más comunes. Sin embargo, existen filtros más actuales como: (CIRCUTOR, 2013)

1. Filtro LCL
2. FB3
3. Filtro EMI

4. FAR-H/Q

Figura 14*Tipos de filtro*

Por otro lado, si se requiere emplearlo lo más próximo a la carga se tiene los siguientes filtros

1. Filtros activos AF/APF
2. TSA
3. Filtro de bloqueo FB3T
4. Filtro absorción/hibrido FAR-H/Q
5. Filtro de rechazo FR

Sistemas para el control automático de Factor de Potencia

Actualmente en el mercado existen varios controladores dedicados que permiten realizar la corrección del factor de potencia de una forma sencilla, generalmente se emplean para la medición y control de la potencia reactiva presente en la red, el

regulador desactiva o activa los diferentes capacitores que son los encargados de corregir el factor de potencia y llevarlo hasta un valor adecuado según lo establecido. La información que estos dispositivos presentan es: (Schneider, 2019)

- Valor RMS de tensión
- Intensidad
- Potencia activa
- Potencia reactiva
- Factor de potencia

Sin embargo, dependiendo de lo sofisticado del modelo existen controladores que pueden presentar también: (Circutor, 2017)

- Armónicos
- Energías
- Frecuencia
- Temperatura del dispositivo
- Alarmas

Algoritmos de control

Cada regulador consta con al menos 3 algoritmos de control, el cual permitirá dependiendo la lógica activar o desactivar los capacitores para corregir el factor de potencia en base a la energía reactiva que detecte el controlador, otra terminología que es importante conocer es:

Pasos

Se entiende como pasos al grupo de capacitores en que se divide un equipo de reactiva, normalmente en relaciones de 1:1, 1:2, 1:2:4. Etc.

Plug and play

Una vez que el regulador sea instalado bastara con realizar las configuraciones pertinentes, y especificar algunos valores de referencia como el de los capacitores para que esté listo para operar.

Monitoreo de sistemas de análisis de recursos energéticos

Un sistema de monitoreo del consumo energético industrial tiene por objetivo optimizar el consumo energético que presenta sus instalaciones, es importante utilizar adecuadamente los diferentes tipos de energía. Para hacer esto más eficiente, es necesario un sistema de control capaz de realizar una gestión energética adecuada a los diferentes recursos. Por ejemplo, los equipos denominados Smart Meters o medidores inteligentes, son capaces de medir la energía consumida y realizar la respectiva gestión de la energía, su principal beneficio es la optimización eficaz de las redes de transmisión y distribución energética. (Recursos, 2018)

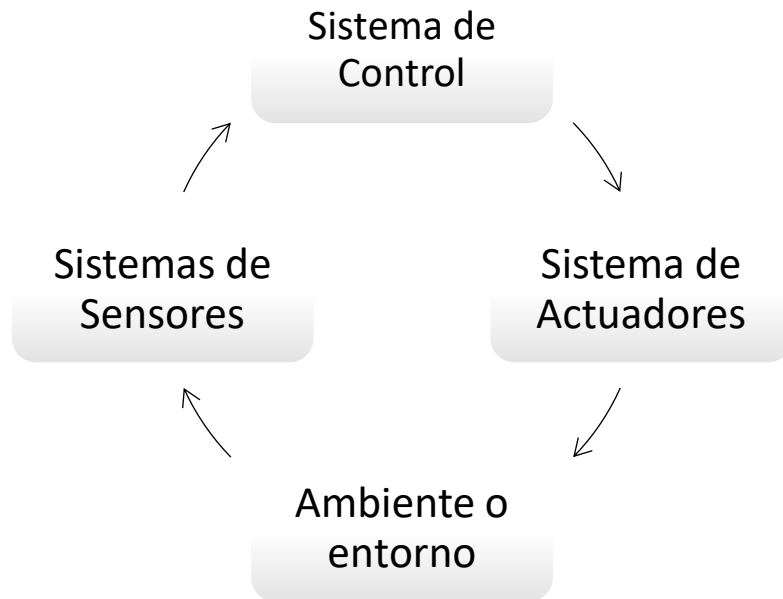
Elementos de un sistema de monitoreo y supervisión de la energía reactiva

El monitoreo y supervisión es un proceso de compensación de la potencia reactiva es posible realizar la corrección del FP de manera remota, empleando distintos elementos en tiempo real, en donde se requiere un tiempo de respuesta específico para evitar pérdidas o fallos en el sistema de control.

Un sistema en tiempo real (STR) es: "Cualquier sistema que interactúa con su medio físico para lo cual la entrada percibirá algún movimiento en el mundo físico, y la salida estará relacionada a dicho movimiento, el tiempo de respuesta ante el estímulo de entrada debe ser lo suficientemente pequeño para generar una respuesta aceptable". Este sistema requiere una conexión con el mundo físico y un elemento sobre el cual actuar para ser considerado como un STR, esto se puede observar en la Figura 15.

Figura 15

Diagrama de bloque de un sistema en tiempo real



Fuente: (Yero, Ramírez, Rosa, & García, 2018)

En estos sistemas hay que tener en cuenta, los siguientes elementos eléctricos:

- Captadores de señales
- Datos
- Actuadores

En los sistemas basados en capacitores, es importante considerar el tiempo de carga y descarga de los mismos, así como las conmutaciones de los contactores. (Yero, Ramírez, Rosa, & García, 2018).

Comunicación con protocolo Modbus

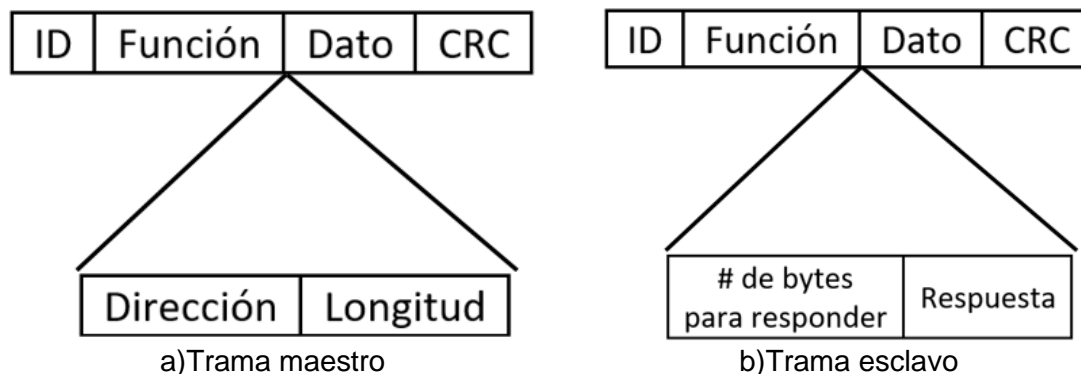
La comunicación entre dispositivos a través de este protocolo es la más empleada, debido a la simplicidad con la que opera, este protocolo de mensajería puede trabajar sobre la siguiente capa física:

- RS 232: posee dos elementos, uno maestro y otro esclavo.

- RS 422: posee un solo maestro y puede llegar a tener 31 esclavos.
- RS 485: similar al RS 232 solo que puede tener más de un maestro, empleado en MODBUS PLUS

Figura 16

Trama de Datos Modbus



Fuente: (Hurtado, 2018)

Es un protocolo estándar a nivel industrial, debido a la disponibilidad para la conexión entre diferentes dispositivos electrónicos, las ventajas que este protocolo ofrece son: (Abaurrea, 2008)

- 1 Es publico
- 2 Fácil implementación
- 3 Maneja bloque de datos sin restricciones

La trama de datos que se maneja en esta comunicación viene dada tanto para el maestro como para el esclavo. (Hurtado, 2018)

- Trama maestro: está integrado por dos subcampos, la dirección y la longitud (Figura 16.a). En la dirección se indica al esclavo en qué lugar debe buscar lo que se ha solicitado a través de la función y la longitud indica a partir de esa dirección cuantos elementos se deben tomar.

- Trama del esclavo: La estructura se mantiene para el esclavo (Figura 16.b) pero nuevamente el cambio está en el campo de Dato, pues aparecen dos subcampos que son: Número de bytes para dar la respuesta y la respuesta en sí.

Estructura de los mensajes

- a) Dirección (ID): El maestro direcciona la comunicación mediante un byte lo que le permite acceder al esclavo correspondiente al byte enviado, además se puede enviar un mensaje a todos los esclavos conectados a él, mediante la dirección cero (0) esto dependerá si el dispositivo admite en la red broadcast (WEG, 2016).
- b) Función: El campo contiene un byte donde se especificará el servicio requerido del esclavo, estas pueden ser: lectura, escritura, etc. Las funciones vienen dadas por cada dispositivo como ejemplo se pueden evidenciar en las Tabla 6 y Tabla 7 donde a cada código le corresponde una función determinada por el fabricante.
- c) Campo de datos: Este campo es de tamaño variable ya que dependerá del formato y del contenido a transmitir, en este campo se especifica tanto la dirección como la longitud
- d) CRC (Cycling Redundancy Check): Este campo sirve para el chequeo de errores de transmisión, es formado por dos bytes donde:
 - El primer byte corresponde al menos significativo (CRC-).
 - El segundo byte es el más significativo (CRC+).

Tabla 6

Funciones correspondientes al convertidor de frecuencia WEG

Nombre	Descripción	Código
Read Holding Registers	Lectura de bloque de registro del tipo holding	03
Read Input Registers	Lectura de bloque de registro del tipo input	04
Write Single Registers	Escritura en un único registro del tipo holding	06
Write Multiple Registers	Escritura en bloque del registro de tipo holding	16
Read Device Identification	Identificación del modelo de equipo	43

Fuente: (WEG, 2016)

Tabla 7

Funciones correspondientes del Controller MASTER Lifasa.

Nombre	Código
Lectura del estado de los relés	01
Lectura de registros	03-04
Escritura de un relé	05
Escritura de múltiples relés	0F
Escritura de múltiples registros	10

Fuente: (Lifasa, 2018)

HMI (Interfaz Humano Maquina)

Es el principal enlace existente entre el operador y los sistemas automáticos, su función principal es proporcionar información y control sobre un proceso físico con el cual este enlazado. (Moya, 2019). El desarrollo de las HMI debe cumplir características específicas de los procesos y estas deben estar sujetas bajo la norma ANSI-ISA 101.

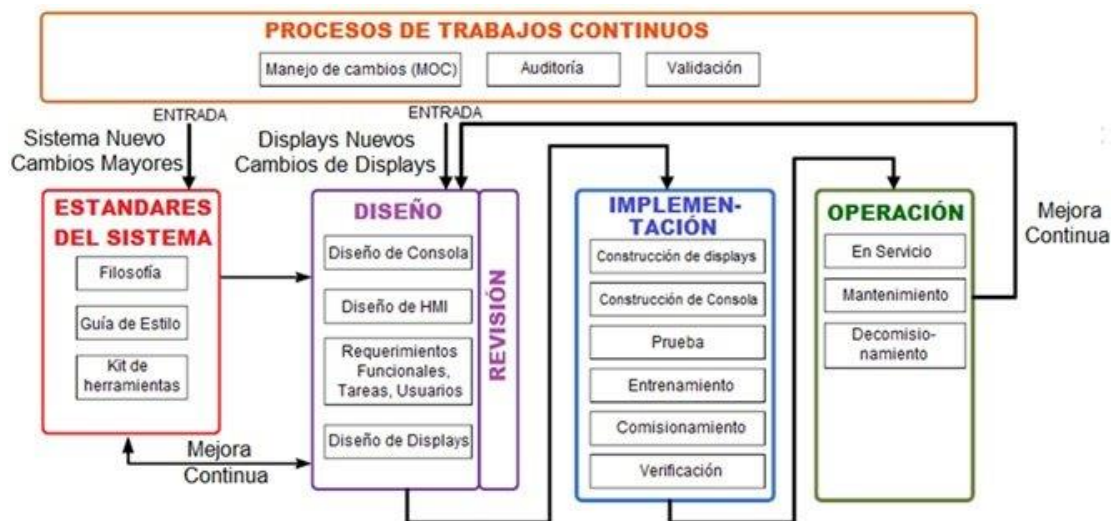
Norma ANSI-ISA 101

Esta normativa presenta un conjunto de lineamientos, sugerencias que abordan designación, implementación y mantenimiento. Además, presenta una orientación en el diseño y operación de las mismas para asegurar un control más seguro y efectivo del proceso tanto en situaciones normales como anormales de funcionamiento. (Bohórquez,

Prado, & Ramirez, 2019), este estándar debe ser desarrollado mediante un ciclo de vida como se muestra en la Figura 17

Figura 17

Ciclo de vida de la norma ANSI 101



Fuente: (Bohórquez, Prado, & Ramirez, 2019)

Este ciclo de vida está conformado por cuatro fases principales:

- Estándar del sistema
- Diseño
- Implementación
- Operación

Fase 1: Estándar del sistema

- a) **Filosofía:** considera varios aspectos conceptuales para el desarrollo, en este punto se deben alinear con los factores humanos (usuarios a los que van dirigidos), requerimientos funcionales del proceso, modos de operación, buenas prácticas de trabajo y modelos de seguridad
- b) **Guía de estilo:** tiene en cuenta los conceptos obtenidos por la filosofía previamente vista, para lo cual es importante tener como base los planos P&ID

que resumen los elementos, la relación entre ellos y brinde información relevante de los elementos de seguridad que el usuario debe tener presente para la operación y supervisión del proceso.

- c) Kit de herramientas: hace referencia a los diferentes softwares que se pueden implementar para el diseño de la interfaz teniendo en cuenta la información los dos ítems anteriores, en este punto se debe tener conocimiento del entorno de programación, así como identificado las alarmas y modos de operación a relacionar.

Fase 2: Diseño

- a) Diseño de consola: constituye el diseño del entorno gráfico, la jerarquía de visualización, número de operadores, además de los diferentes elementos interactivos, como botones, paneles, etc.
- b) Diseño de HMI: aquí se incluye la plataforma de control, los diferentes sistemas a controlar, el diseño de red, roles de usuario, sistema de seguridad y las interfaces de comunicación con terceros.
- c) Requerimientos funcionales, tareas, usuarios: se documentan los requisitos de la HMI, las funciones que realizarán cada grupo de usuarios, en donde se tendrán a los responsables directos y a los de apoyo. Entre las tareas se deben tener en cuenta en operación normal y anormal de funcionamiento, se deben asignar privilegios de usuario para la ejecución de algunas tareas.

Con todos los requisitos mencionados ya establecidos se debe desarrollar un diseño conceptual de la HMI. Para procesos más complejos se requerirá una revisión y refinamiento de las especificaciones del usuario, así como un proceso iterativo, paralelo al diseño. En las industrias altamente reguladas se pueden requerir pruebas de validación específicas para esta etapa. (Moya, 2019)

Fase 3: Implementación

En esta fase se integra tanto el software como el hardware y se estudian los resultados de las fases anteriores, se si la información mostrada es precisa y si cumple con los requerimientos establecidos.

- a) Construcción de consola: esta incluye la instalación del software donde se haya diseñado al HMI dentro del sistema operativo, esta puede incluir una etapa de pruebas con el fin de constatar su correcto funcionamiento.
- b) Prueba: esta se debe realizar con todos los sistemas ya integrados, pero fuera de línea o simultáneamente con la integración del sistema en vivo, estas pruebas deben ser realizadas antes de la puesta en marcha, la información recopilada de las pruebas debe ser documentada y puede incluir:
 - Planes de prueba
 - Metodología
 - Requisitos de plan de verificación
 - Seguimiento de deficiencias
 - Criterios de ingeniería de factores humanos
 - Manejo de cambios
- c) Entrenamiento o capacitación: esta debe generarse con el fin de que el usuario tenga pleno conocimiento de la operatividad de la interfaz HMI.
- d) Verificación: es la prueba final del sistema en marcha, donde se verifican que los criterios establecidos sean cumplidos. En industrias altamente reguladas esta verificación viene dada por un plan de validación específico.

Fase 4: Operación

En esta fase se incluyen las actividades de funcionamiento y mantenimiento de la HMI donde el operario puede llegar a dar observaciones que ayuden a tener una mejor interacción con la misma.

- a) Mantenimiento: se realizan cambios principalmente a nivel de software estos pueden ser de actualización, seguridad mejora de la plataforma, corrección de errores o modificación de procesos para admitir nuevas funcionalidades

Capítulo III

Estudio de carga y demanda eléctrica de la empresa EMFALU

Características generales de la empresa

EMFALU Cía. Ltda. es una empresa dedicada a proveer servicios integrales para la construcción aplicando métodos modernos de administración y tecnológicos a nivel nacional, comprometida con el desarrollo del Ecuador, surgió en el año 2000, para el año 2001 inicio su relación comercial a través de la marca NOVOCENTRO, actualmente atiende al mercado del Valle de los Chillos. La empresa cuenta con dos sucursales en las cuales se va a realizar un reconocimiento completo de sus componentes donde se establecerán:

1. Características eléctricas del sistema.
2. Carga del sistema

Características eléctricas del sistema

a) Establecimiento “San Rafael”

Sistema de distribución

- Consta de un circuito trifásico de 4 conductores (3 Fases + Neutro).
- Un tablero principal de distribución.
- 4 tableros de distribución secundaria (ver Tabla 8).

b) Establecimiento “Sangolquí - Bomberos”

Sistema de distribución

- Consta de un circuito trifásico de 4 conductores.
- Un tablero principal de distribución.
- 2 tableros de distribución secundaria (ver Tabla 9).

Tabla 8*Características de los tableros de distribución*

Tablero	Características	Circuitos
Principal	Centro de carga trifásico (3 ϕ ,4H) 12 puntos 4 conductores calibre 2 AWG	
Secundario 1	Centro de carga trifásico (3 ϕ ,4H) 20 puntos 4 conductores calibre 6 AWG en sus fases	Máquinas eléctricas
Secundario 2	Centro de carga trifásico (3 ϕ ,4H) + Tierra 12 puntos 4 conductores calibre 10 AWG en sus fases 1 conductor calibre 14 AWG para tierra	Máquinas eléctricas
Secundario 3	Centro de carga trifásico (3 ϕ ,4H) + Tierra 12 puntos 3 conductores calibre 6 AWG en sus fases 1 conductor calibre 8 AWG para neutro 1 conductor 8 AWG para tierra	Máquinas eléctricas
Secundario 4	Centro de carga trifásico (3 ϕ ,4H) + Tierra 16 puntos 3 conductores calibre 8 AWG en sus fases 1 conductor calibre 10 AWG para neutro 1 conductor calibre 8 AWG para tierra	Oficinas

Tabla 9*Características de los tableros de distribución*

Tablero	Características	Circuitos
Principal	Centro de carga trifásico (3 ϕ ,4H) 4 conductores calibre 0 AWG en sus fases	
Secundario 1	Centro de carga trifásico (3 ϕ ,3H) 3 conductores calibre 4 AWG en sus fases	Máquinas eléctricas
Secundario 2	Centro de carga trifásico (3 ϕ ,4H) + Tierra 40 puntos 4 conductores calibre 4 AWG en sus fases 1 conductor calibre 4 AWG para neutro 1 conductor calibre 4 AWG desnudo para tierra	Servicios computacionales

Carga del sistema

Para obtener la carga total instalada en cada establecimiento se procedió al registro de valores de potencia de la placa característica de cada equipo, estos valores se ven reflejados en las Tabla 10 y Tabla 11

Tabla 10

Carga instalada en el establecimiento del San Rafael

Descripción	CANT	Pn. Uni. [KW]	Pn. Total [KW]
Ventilador centrífugo de extracción de baja presión	1	1,5	1,5
Ventilador centrífugo de extracción de mediana presión	1	2,2	2,2
Ventilador centrífugo de extracción de alta presión	1	7,5	7,5
Laminadora K203	1	7,5	7,5
Laminadora K360	1	7,5	7,5
Sierra vertical 1265	1	5,5	5,5
Sierra vertical 1255	1	5,5	5,5
Perforadora Blum	1	1,1	1,1
Compresor Schulz	1	7,5	7,5
Secador de aire Kaeser TAH10	1	0,28	0,28
Fluorescente 2x32W	26	0,064	1,664
Equipos computacionales	1	4,15	4,15
Carga total instalada			51,894

Tabla 11

Carga instalada en el establecimiento de Sangolquí

Descripción	CANT	Pn.Uni [KW]	Pn.Total [KW]
Ventilador centrífugo de extracción de mediana presión	1	5,5	5,5
Laminadora K360	1	7,5	7,5
Sierra vertical 1255	1	5,5	5,5
Secador de aire Kaeser TBH9	1	0,28	0,28
Perforadora Blum	1	1,1	1,1
Compresor Schulz	1	7,5	7,5
Ducha eléctrica	1	4,5	4,5
Iluminación	1	2,16	2,16

Descripción	CANT	Pn.Uni [KW]	Pn.Total [KW]
Equipos computacionales	1	4,15	4,15
Carga total instalada			38,19

Obtención de parámetros eléctricos

Diseño del medidor del factor de potencia

Con el fin de poder obtener datos reales de la empresa se vio en la necesidad de desarrollar un circuito electrónico capaz de poder medir el factor de potencia por largos periodos de tiempo.

(Muñoz, 2016-2017) Diseña y construye un medidor de redes trifásico, haciendo uso de un Arduino mega y una interfaz HMI, en donde tiene como resultado un medidor completamente funcional con un error medio relativo del 0.52%, dicho dispositivo es capaz de presentar valores de potencia activa, reactiva, aparente además presenta el valor del factor de potencia por fase, voltaje de fase, los valores de corriente de línea y fase.

(Cuevas & Lozano, 2017) Implementa un sistema de medición de energía eléctrica, su principal aplicación es residencial, siendo posible tener los valores de voltaje y corriente, presenta potencia activa, reactiva y el factor de potencia, este modelo tiene como microcontrolador al Arduino uno.

(Trujillo) Elabora un analizador de consumo de potencia eléctrica para lo cual hace uso de Arduino y Matlab, este dispositivo es capaz de presentar valores como voltaje y corriente, potencia activa, reactiva y aparente, factor de potencia y la distorsión armónica individual del elemento a medir.

(Barrera, 2016) Diseña y construye un monitor de energía eléctrica para sistemas monofásicos, este diseño es elaborado con Arduino mega y hace uso de la

librería Emon Lib, para efectuar los cálculos de potencia activa, reactiva y aparente, factor de potencia y presenta valores de voltaje y corriente.

Con base a estos trabajos realizados y viendo que los resultados obtenidos han sido muy eficaces se decide realizar un analizador de red teniendo como base los trabajos de Muñoz y Barrera, los cuales hacen uso de la librería de uso libre Emon Lib, la cual es desarrollada por OpenEnergyMonitor.

Requerimientos de diseño

Para realizar el diseño se requiere conocer los parámetros eléctricos del sistema, por lo tanto se debe medir tanto tensión como corriente, con estos valores es posible realizar los respectivos cálculos para poder obtener: la potencia activa, reactiva, aparente y el factor de potencia, además es necesario llevar un registro cronológico de las medidas realizadas, en donde se pueda observar tanto la hora como fecha de la medición, estos son los requisitos para comenzar con el diseño del analizador

Circuito medidor de corriente

Para realizar las mediciones del consumo de corriente de la empresa se va a emplear un transformador de corriente (TC), modelo SCT-013-000 (Figura 18) el cual está diseñado para corrientes de entrada [0-100 A] y a su salida se tiene [0-50mA].

Figura 18

Sensor SCT013

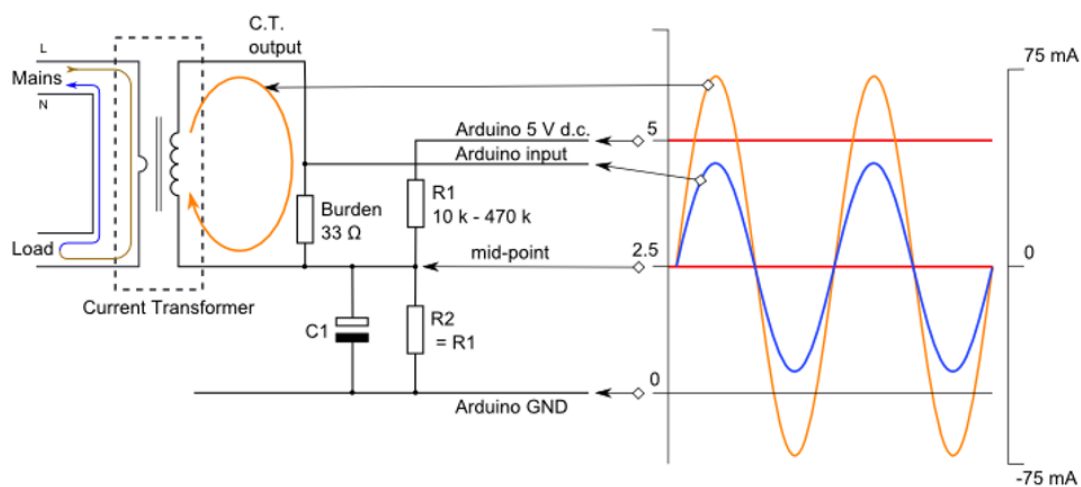


Circuito acondicionador

Primero es necesario calcular la resistencia burden la cual permitirá dar un nivel de referencia en voltios para que Arduino pueda medir el valor de voltaje de la red, primero es necesario determinar la corriente pico del secundario, para lo cual se emplea la siguiente ecuación (3.1)

Figura 19

Esquema circuito acondicionador de corriente



Fuente: (Openenergy, 2017)

$$I_{pico2} = \sqrt{2}I_{max} \quad (3.1)$$

$$I_{pico2} = \sqrt{2} \times 50 \text{ mA} = 0.0707 \text{ [A]}$$

Se calcula la resistencia burden empleando la ley de ohm.

$$R_{burden} = \frac{V}{I} \quad (3.2)$$

El valor de V es proveniente de Arduino, dado que se requiere medir tanto la parte positiva como negativa de la onda, se va a considerar $V=2.5[V]$

$$R_{burden} = \frac{2.5}{0.0707} = 35.36 \text{ } \Omega$$

El valor de dicha resistencia no se encuentra comercialmente, por lo que se empleara

$R_{burden} = 33 \Omega$, por lo tanto, la tensión de salida es:

$$V = 33 \times 0.0707 = 2.33 V$$

Como el valor suministrado por Arduino es de 2.5 voltios el valor pico que se va a tener a su salida es de:

$$V_{pico\ sup} = 2.5 + 2.33 = 4.83 [V]$$

$$V_{pico\ inf} = 2.5 - 2.33 = 0.17 [V]$$

Este valor se encuentra dentro del rango de medición (0-5) V por lo que puede ser medido sin problemas, en la Figura 19 se puede observar la presencia de un capacitor cuya función principal es evitar que la señal alterna desplace el valor de referencia (2.5 V) esto se logra, ya que el capacitor funciona como un circuito abierto ante la corriente continua, y solo va a dejar pasar a la corriente alterna, de esta manera se logra acoplar los dos circuitos. Se recomienda que la reactancia del capacitor sea de unos pocos kilos ohmios.

$$X_c = \frac{1}{2 \pi f C} \quad (3.3)$$

Dónde:

X_c = Reactancia capacitiva

f = frecuencia

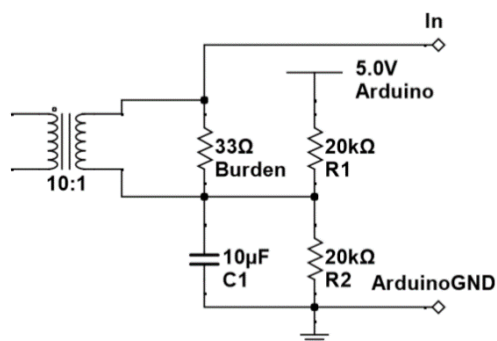
C = Capacitancia

$$X_c = \frac{1}{2 \pi \times 60 \times 10^{-6}} = 2652.58 \Omega$$

Por lo tanto, el circuito a implementar es:

Figura 20

Circuito acondicionador para el sensor de corriente



Circuito medidor de tensión

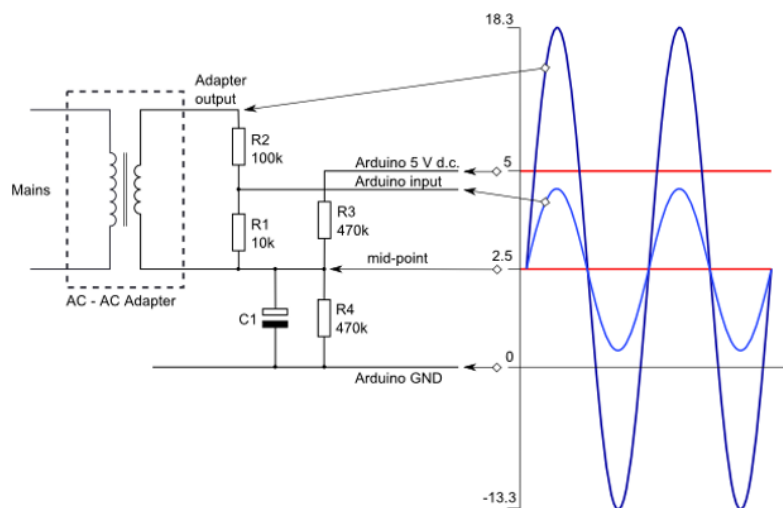
Como se puede apreciar el esquema propuesto (Figura 21) es similar al de la Figura 19 con la diferencia que este circuito emplea dos resistencias R1 R2 que sirven como divisor de tensión, el transformador tiene a su salida 12V se tiene:

$$V_{out} = \frac{R1 V_{in}}{R1 + R2} \quad (3.4)$$

$$V_{out} = \frac{10K \times 12}{10K + 100K} = 1.09 [V]$$

Figura 21

Esquema propuesto de tensión



Fuente: (Openenergy, 2017)

La tensión de salida será de 1.09 V, este valor va a oscilar entre -1.09 a 1.09 representando la parte negativa como positiva de los niveles de tensión AC, sin embargo, al emplear el divisor de tensión ecuación (3.4) los niveles de referencia serán:

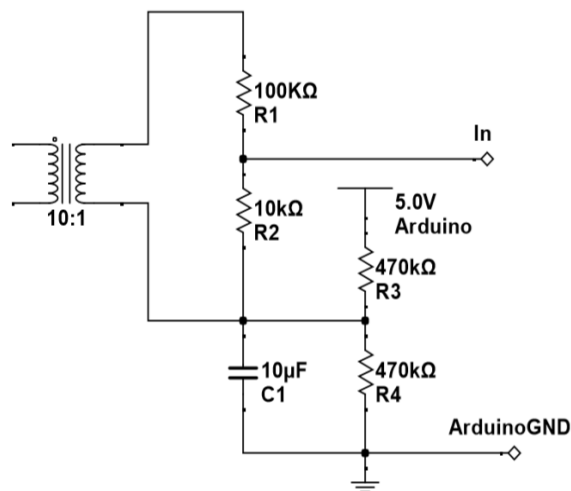
$$V_{pico\ sup} = 2.5 + 1.09 = 3.59 [V]$$

$$V_{pico\ inf} = 2.5 - 1.09 = 1.41 [V]$$

Estos nuevos niveles de tensión serán los que ingresen a las entradas analógicas del Arduino y permitan registrar adecuadamente el nivel de tensión de la red, como en el circuito anterior se debe emplear un capacitor dentro del rango de [1uf – 10uf] con el fin de acoplar estos dos circuitos adecuadamente, el circuito a implementar será el siguiente.

Figura 22

Circuito acondicionador para medición de tensión



Almacenamiento de datos

Debido a que Arduino no cuenta con la memoria suficiente para almacenar una gran cantidad de datos, se ve en la necesidad de implementar un módulo adicional, este será un lector de tarjetas micro SD (CATALEX).

Figura 23*MicroSD CATALEX*

Al ser un módulo incorpora sus propias funciones, estas son requeridas para poder almacenar los registros de las mediciones dentro de la memoria microSD.

<code>SD.begin(cspin)</code>	Iniciar la SD
<code>SD.open(filepath, mode)</code>	Abrir un fichero
<code>file.write(data)</code>	Mode: FILE_WRITE para lectura y escritura
<code>file.print(data)</code>	Escribir un byte en el fichero
<code>file.close()</code>	Escribir una variable en un fichero
	Cerrar el fichero

Registro de datos

Para la parte de hora y fecha, es posible realizarlo mediante software, ya que Arduino consta con sus propias librerías, sin embargo, estas requieren que se especifique de antemano la hora y fecha para sincronizar, pero tiene un defecto, si el módulo llega a perder energía la hora y fecha se reiniciarán, esto afectaría en el registro de los datos, sin embargo existe la posibilidad de realizar el reloj mediante hardware esto gracias al módulo Ds3231 RTC el cual viene siendo un reloj en tiempo real, consta con una batería externa que le permite mantener tanto la fecha y hora, de esta manera no se verá afectado el registro de los datos.

Figura 24

Ds3231 RTC



Las funciones requeridas para inicializarlo son:

<code>now.day()</code>	devuelve el día del mes.
<code>now.moth()</code>	devuelve el mes.
<code>now.year()</code>	devuelve el año.
<code>now.hour()</code>	devuelve la hora.
<code>now.minute()</code>	devuelve los minutos.
<code>now.second()</code>	devuelve los segundos.

Cálculo de parámetros requeridos

Para realizar los cálculos se va a emplear la librería Emon.Lib la cual es de uso libre y ha sido implementada en una serie de trabajos con excelentes resultados, esto se menciona en la sección 3.2.1 esta librería consta con las siguientes funciones:

<code>emon_F1.Vrms</code>	Devuelve el valor rms de la tensión medida
<code>emon_F1.Irms</code>	Devuelve el valor rms de la corriente medida
<code>emon_F1.realPower</code>	Devuelve el valor de la potencia activa
<code>emon_F3.apparentPower</code>	Devuelve el valor de la potencia aparente
<code>emon_F3.powerFactor</code>	Devuelve el valor del factor de potencia

Para el cálculo de la potencia activa la librería emplea la ecuación (2.3), para el cálculo de la potencia aparente emplea la ecuación (2.6) y para el factor de potencia emplea la ecuación (2.7).

Diagrama de bloques

En la Figura 25 se observa el esquema del diseño desarrollado en donde se ha establecido un bloque de entrada con la adquisición de datos de la empresa, el microcontrolador a emplear será el atmega2560, ya que consta con las entradas análogas suficientes para la aplicación, en los puertos digitales del mismo se ha ubicado el módulo Ds3231 RTC (reloj en tiempo real) y el lector de microSD adicional se agregó un bloque stop que permitirá detener la captura de información, finalmente como indicador de funcionamiento se ha establecido un Led.

Figura 25

Diagrama de bloques del analizador

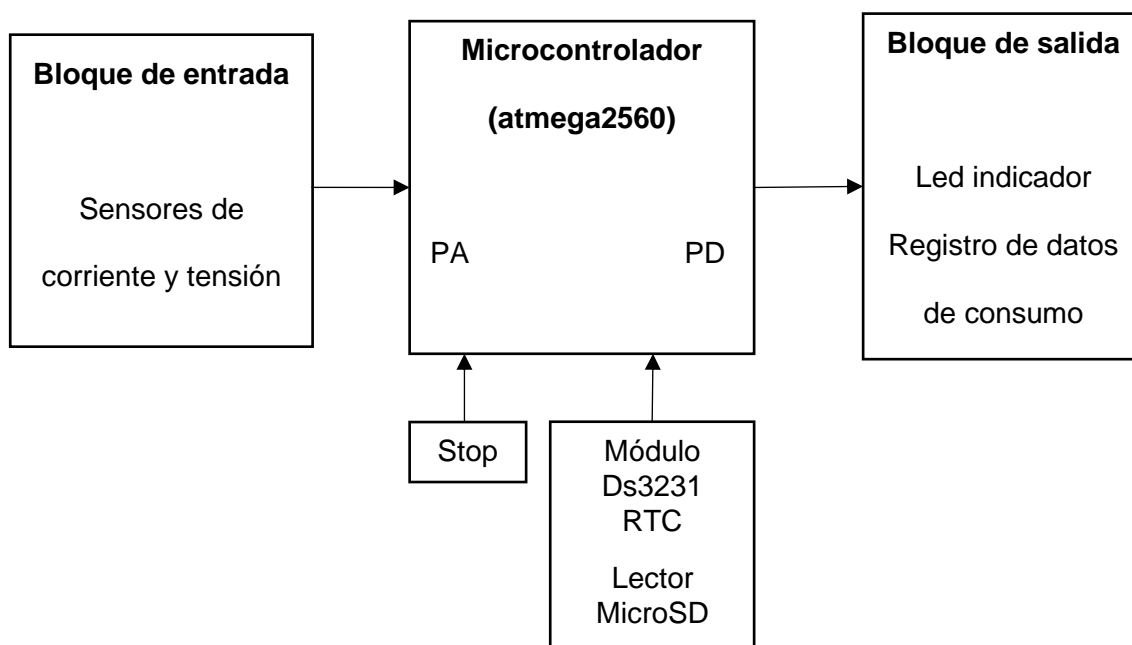


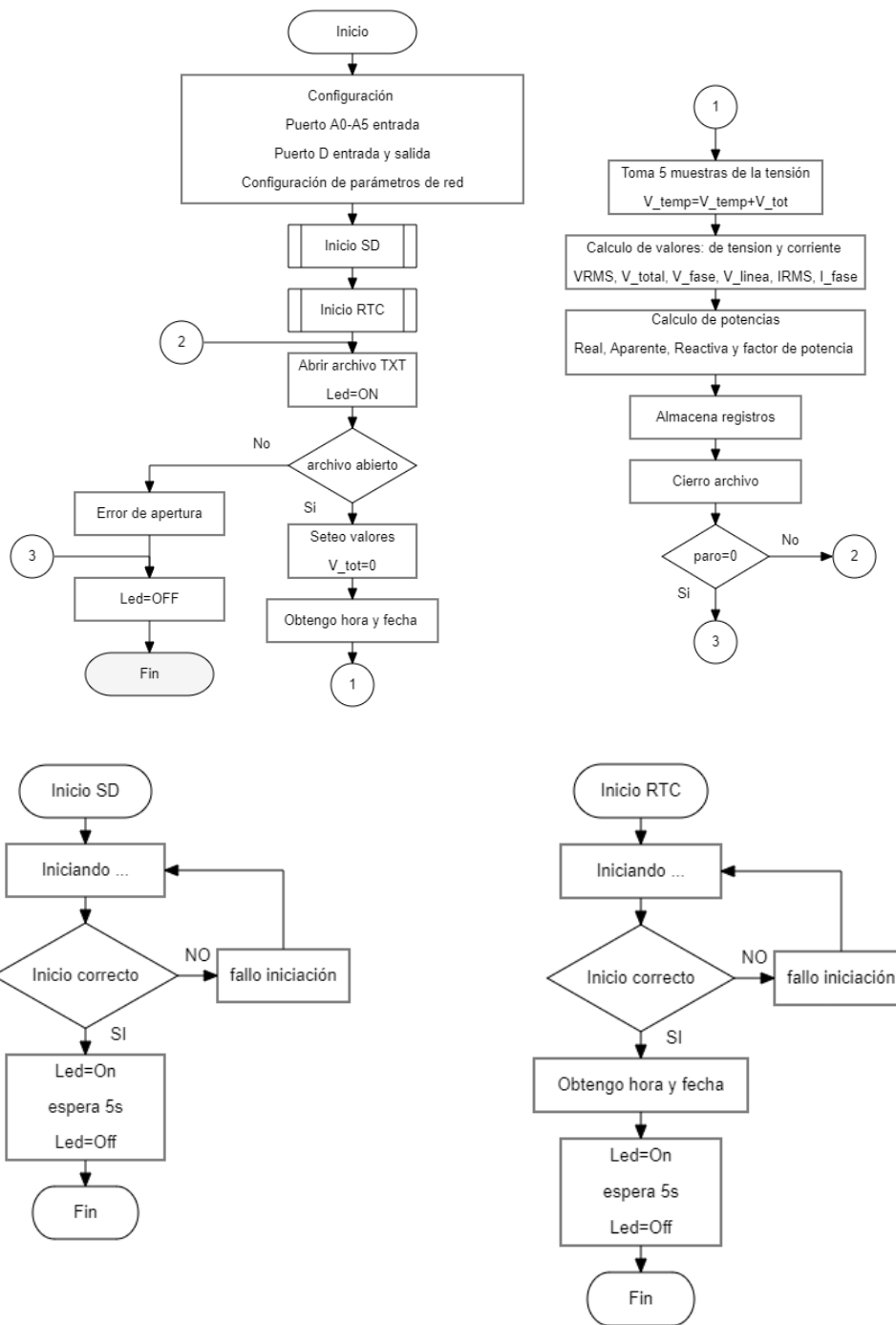
Diagrama de flujo

Con el fin de desarrollar el algoritmo de medición se planteó el siguiente diagrama de flujo, el cual consta con subrutinas que permiten realizar una iniciación correcta a los diferentes módulos, además se estableció que el almacenamiento de

información está dentro del bucle iterativo, de esta forma se puede garantizar que los datos siempre se almacenen y no se pierda la información del sistema a analizar.

Figura 26

Diagrama de Flujo

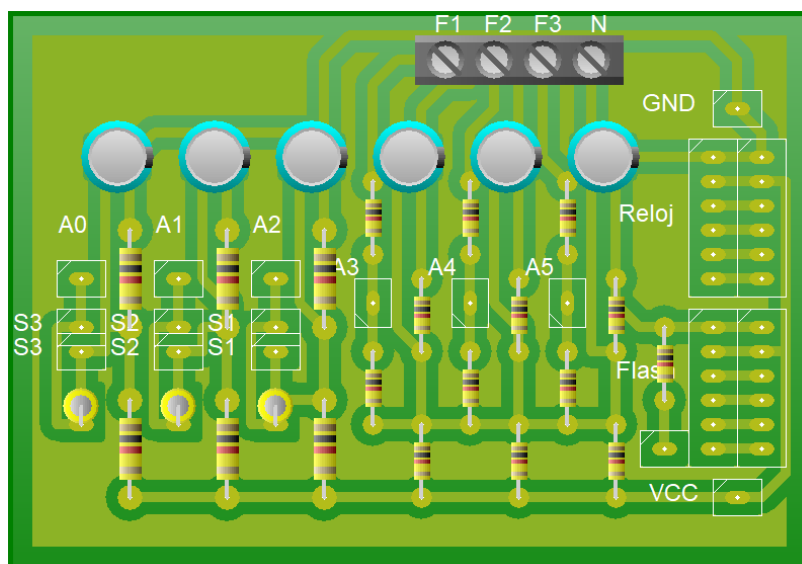


Diseño electrónico

Para el diseño de la placa se consideró que los módulos RTC y microSD no son componentes que se puedan agregar, sin embargo, se empleó conectores que representen los pines de cada módulo, es por eso que se puede observar en la Figura 27 existe el espacio respectivo para el Reloj RCT y el lector microSD (Flash), los conectores F1, F2, F3 y N representan las entradas de cada una de las fases, mientras que S1, S2 y S3, representa las entradas de los sensores de corriente.

Figura 27

Diseño de la placa a implementar.

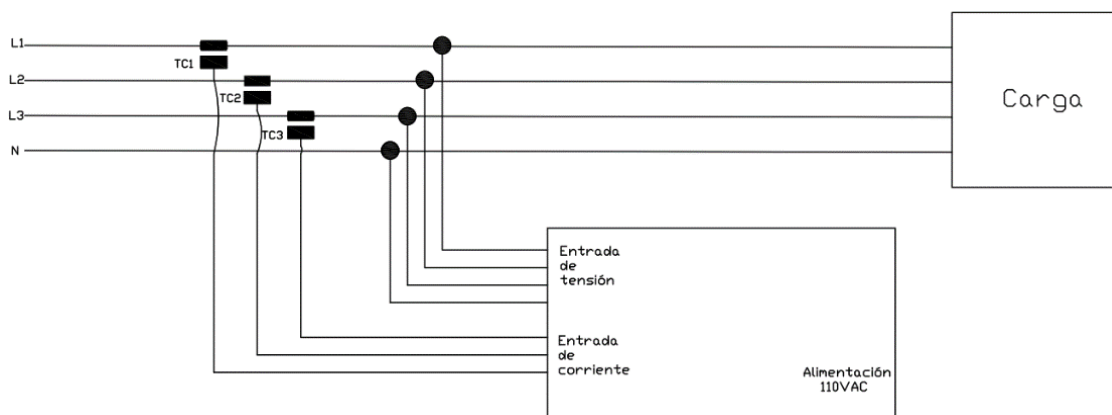


Montaje en la red

En la Figura 28 se puede observar un esquema de conexiones que se deben realizar en el analizador para que este pueda tomar datos de la red, como se puede apreciar se requiere conectar los tres transformadores de corriente a cada línea lo mismo para obtener los valores de tensión.

Figura 28

Diagrama de conexión en la red



Diseño de la estructura

La Figura 29 representa el analizador una vez culminada su construcción, fue elaborada mediante una caja de plástico color gris cuyas dimensiones son: (14 x 22 x 11) cm, consta en su parte frontal con 4 terminales tipo bornera para la conexión de las fases más neutro y 3 conectores para los transformadores de corriente, además está provisto con un pulsador y led, en la Figura 30 se puede observar cómo se encuentran distribuidos los elementos internamente.

Figura 29

Aspecto final del analizador



Además, se consideró que debe existir la posibilidad de realizar algún mantenimiento a nivel de software por lo cual se dejó libre el puerto de comunicación, el cual se utilizara exclusivamente para la actualización del mismo, tal como se puede observar en la Figura 31.

Figura 30

Distribución interna de los elementos

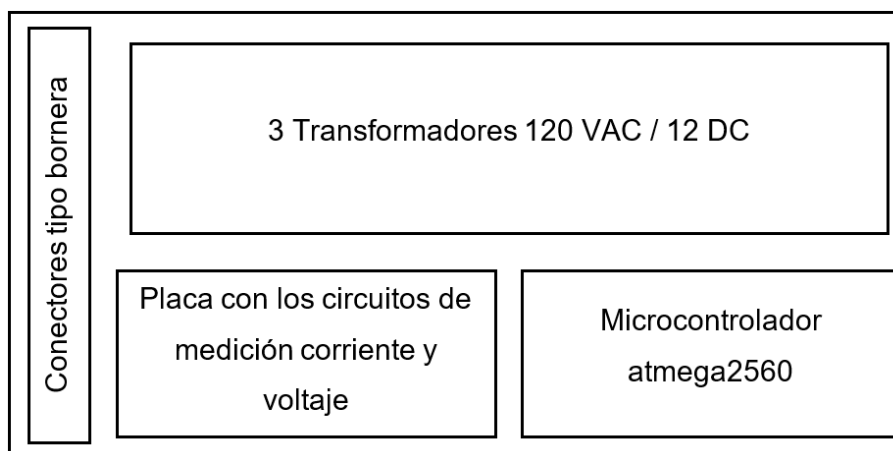


Figura 31

Analizador vista posterior



Análisis de la red eléctrica

Los datos adquiridos mediante el Analizador de Red Trifásico 100 [A] – 127/210 [V] implementado, son respaldados en una tarjeta de memoria externa, se realizó la

medición desde el 9 hasta el 13 de diciembre del 2019 para el local “Sangolquí”, y del 20 al 23 de diciembre del 2019 en el local “Triángulo”, los datos registrados fueron guardados en dos documentos de Microsoft Excel.

- SANGOLQUI.xlsx
- SAN RAFAEL.xlsx

Se tomó como referencia los días laborables en donde se presentó la carga máxima, esto se logró mediante gráficas realizadas en el software MATLAB, quedando para el local de “Sangolquí”, el día de carga máxima y datos estables el día martes 10 de diciembre del 2019, mientras que para el local “San Rafael” es el día viernes 20 de diciembre del 2019.

Para cada día se establece 3 análisis diferentes:

- Baja carga: consumo de corriente media de 10 [A]
- Plena Carga: consumo medio de corriente de 30 [A]
- Horario Nocturno: consumo medio de corriente de 2[A]

Con el estudio previos se procede con el análisis de los datos obtenidos con el objetivo de apreciar la cantidad de KVARh (kilovares por hora) adecuados para el diseño del banco de capacitores a instalar en los dos locales.

Local “Sangolquí”

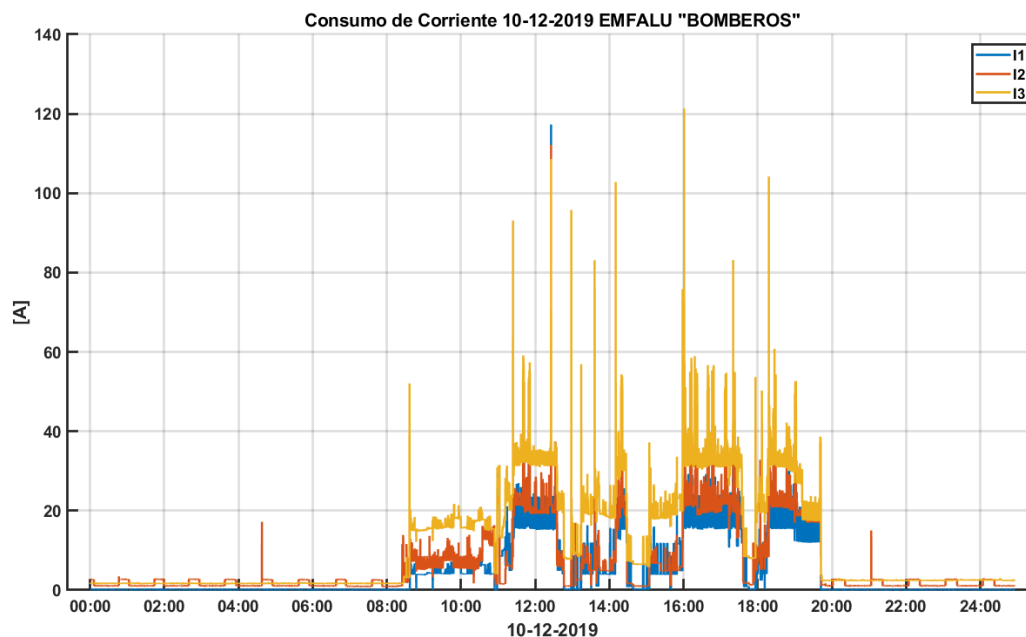
Baja carga

De acuerdo al estudio de carga realizado se establece el análisis del tipo de cargas que conforma la industria PYME (Pequeña y Mediana Empresa) EMFALU Cía. Ltda. Tomando en cuenta que es una industria de tratamiento de madera, se realiza cortes, laminaciones, perforaciones, por lo cual se tiene arranques y paros de motores

trifásicos de inducción en su gran mayoría, por lo que la variación de corriente es de niveles altos en periodos cortos de tiempo, esto se logra observar:

Figura 32

Consumo de Corriente 10-12-2019 "Sangolquí"

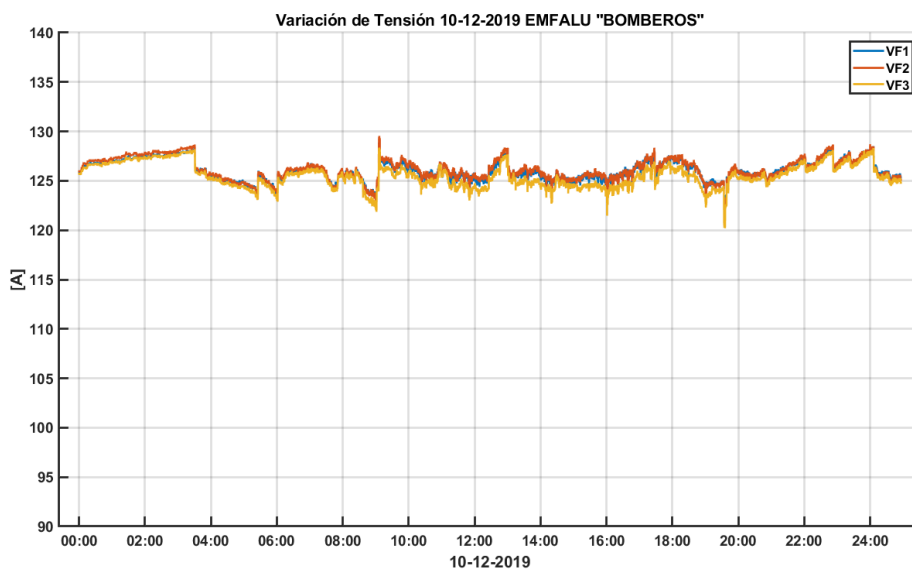


En la Figura 32 se puede observar el consumo de corriente en el periodo de 24 horas, estableciendo el periodo de baja carga en el horario de 09h00 a 10h00, en este periodo la maquinaria que muestran una carga significativa se encuentra apagada, o solo pocas de ellas en funcionamiento.

La tensión como se explicó en la sección Calidad de Energía Eléctrica, debe tener una variación máxima del 5% de su valor nominal, de igual manera con el analizador se tomaron medidas para el 10 de diciembre del 2019, se observa en la Figura 33.

Figura 33

Variación de tensión 10-12-2019 "Sangolquí"



En la Figura 33 se puede observar que la tensión varía en un rango normal teniendo los picos altos en el horario nocturno, debido a que no existen cargas considerables, y los picos bajos cuando existe una conexión considerable de las diferentes cargas en el local, para analizar estos datos se procede a parametrizar en el software MATLAB y se tiene:

Tabla 12

Variación de Tensión 10-12-2019 "Sangolquí"

PARAM.	VF1 [V]	VF2 [V]	VF3 [V]
Máximo	129,226	129,551	128,367
Mínimo	121,044	120,655	120,192
Media	126,021	126,145	125,498
Sigma	1,02837	1,10424	1,18549

Sigma representa la variación estándar de los datos en una distribución normal, el dato ayuda a observar cómo se distribuyen los datos a partir de la media de los datos.

En la Tabla 12 se observa los datos tabulados que muestra la Figura 33 en el cual se nota que la máxima variación de tensión se da en la fase 3, se tiene:

$$VF3_m = 120,192[V]$$

Dónde:

$$VF3_m = \text{ Voltaje mínimo de fase 3}$$

El voltaje nominal de tensión de la red pública de parte de la Empresa Eléctrica

Quito: (EEQ, 2014):

$$Vf_n = 127[V]$$

Dónde:

$$Vf_n = \text{ Voltaje nominal de fase}$$

Se tiene en cuenta el 5% de variación máxima se da:

$$Vf_{mv} = 127 - (127 * 0,05) = 120,65[V]$$

Dónde:

Vf_{mv} = Voltaje de fase máxima variación en carga

Se observa que existe una variación medida de:

$$e\% = \frac{Vf_n - VF3_m}{Vf_n} * 100\% \quad (3.5)$$

$$e\% = \frac{127 - 120,192}{127} * 100\%$$

$$e\% = 5,36\%$$

Dónde:

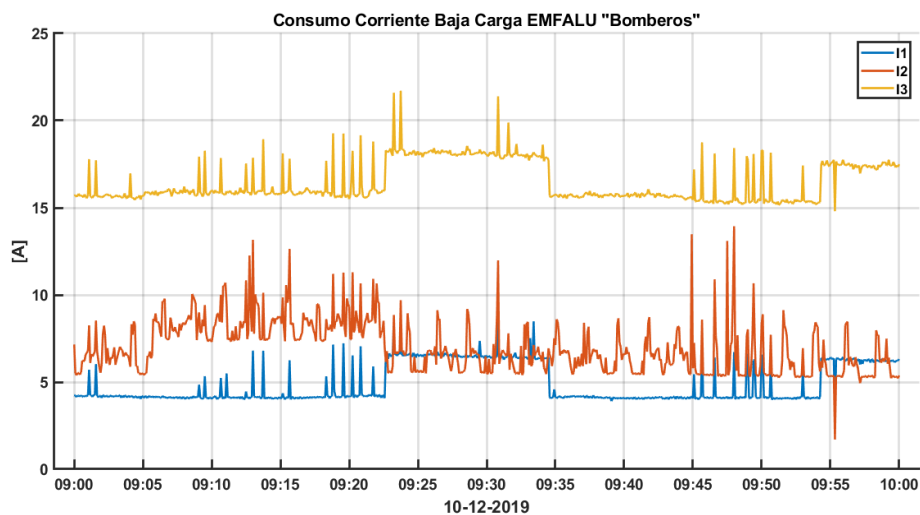
$e\%$ = Error relativo

Se observa que existe un error máximo de 5,36%, esto sobrepasa el error máximo permitido, lo que se toma en cuenta es la durabilidad o la repetibilidad de este error que nos da un valor de 1 de cada 10000 muestras es decir que esta medida se da en un estado instantáneo al momento en que la carga máxima del local "Sangolquí" se enciende (compresor SCHULZ de 10HP), en la Figura 32 se pueden observar picos de corriente mayores a los 80 [A], debido a este accionar, por lo que se determina que la tensión tiene valores muy estables que en su gran mayoría están en el rango permitido de variación.

Se realiza una ampliación de la Figura 32 para analizar el consumo de corriente en el periodo de baja carga para la toma de parámetros en donde se puede observar que en la Fase 3 existe un desbalance considerable, estos datos son de gran utilidad para obtener las variables que inciden en el sistema de control.

Figura 34

Consumo Corriente Baja Carga 10-12-2019 "Sangolquí"



En la Tabla 13 se tabulan los parámetros registrados en el horario de 09h00 a 10h00 del local "Sangolquí", en la cual se puede observar que el valor medio de consumo de corriente esta entre 4 y 17 [A].

Tabla 13

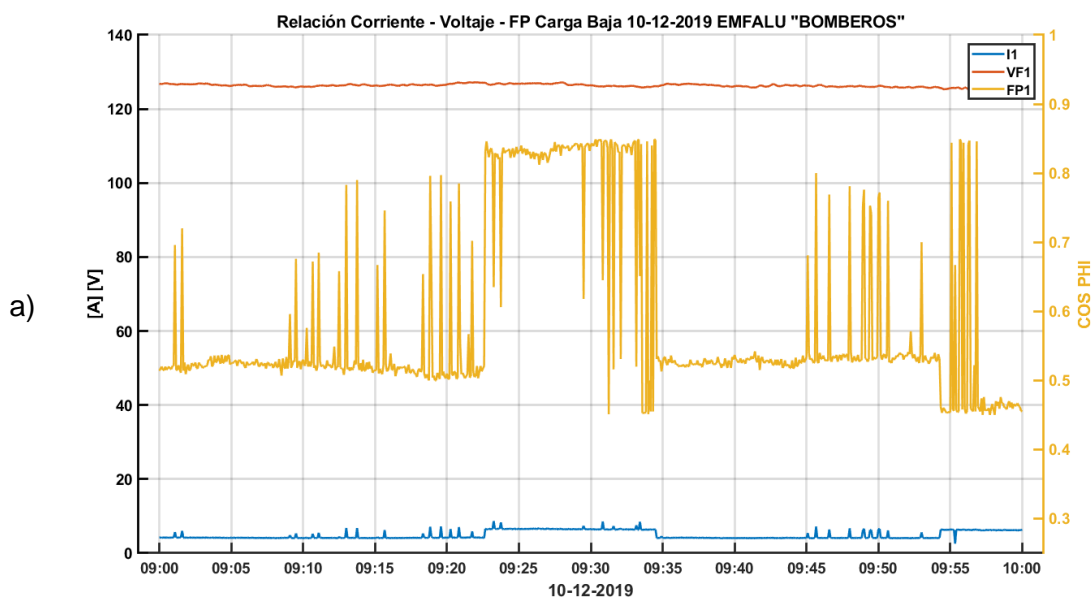
Parámetros de Consumo de Corriente Baja Carga

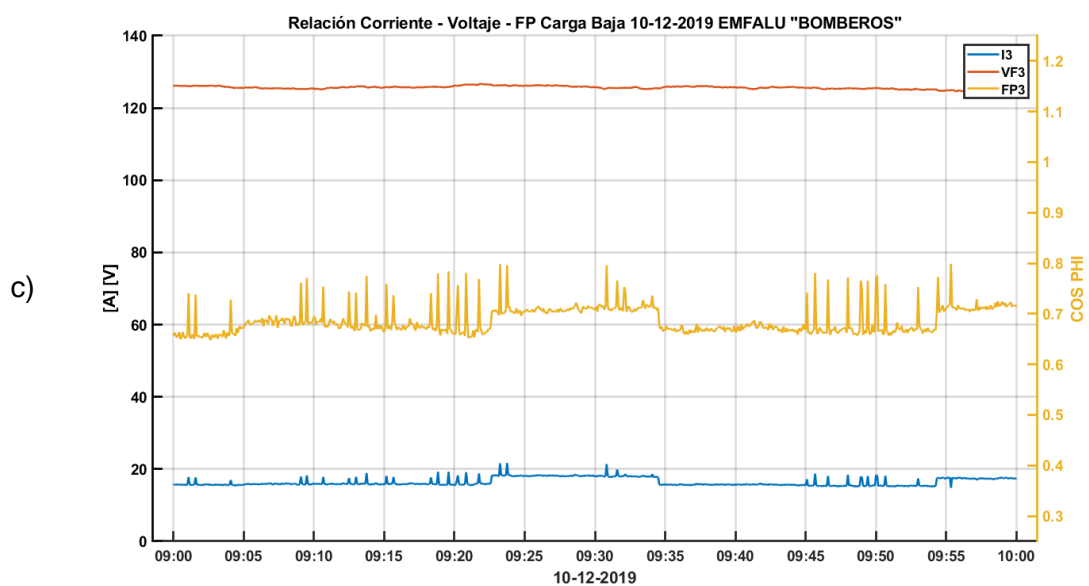
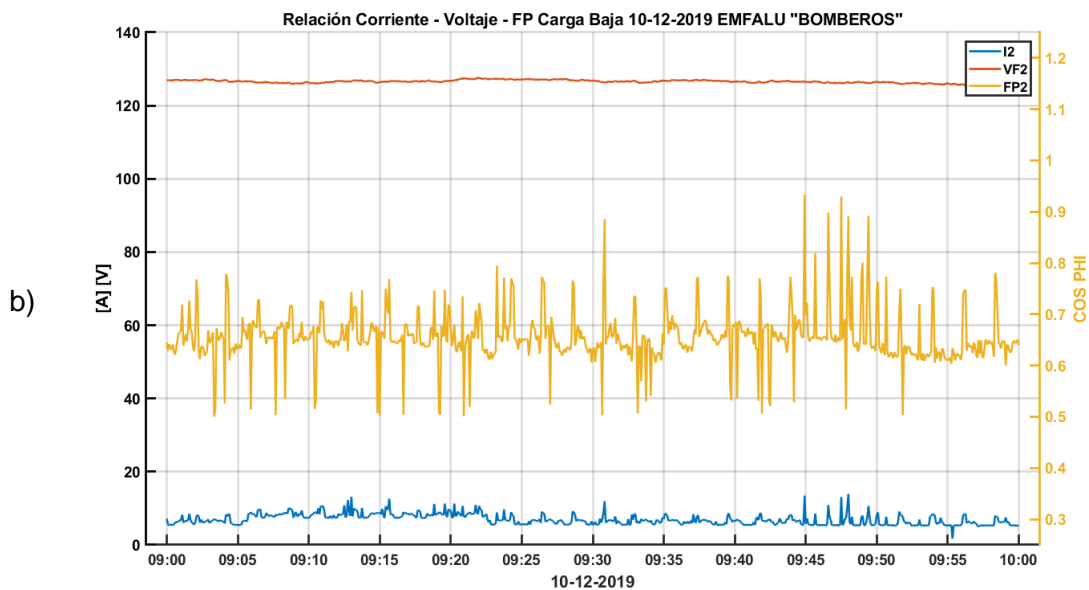
PARAM.	I1 [A]	I2 [A]	I3 [A]
Máximo	8,676	13,938	21,713
Mínimo	2,558	1,702	14,8
Media	4,884	6,968	16,439
Sigma	1,114	1,484	1,144

Se toma en cuenta los parámetros principales que son la corriente de consumo, la variación de voltaje y se procede a analizar la variación del factor de potencia en relación a los valores de corriente y tensión y comprobar que concuerde con los datos de la Tabla 2 que da valores de factor de potencia de las cargas convencionales, se puede observar con mayor importancia la primera sección de la Tabla 2 en donde se muestra la variación de factor de potencia según la cantidad de carga porcentual que realiza el motor de inducción.

Figura 35

Relación Corriente -Voltaje -FP 10-12-2019 "Bomberos", a) Fase 1, b) Fase 2, c) Fase 3





En la Figura 35 se observa que las tres fases del sistema se comportan de manera diferente, siendo la fase más estable la Fase 3 y la que más variaciones presenta es la Fase 1, para la comprensión de la Figura 35 se establece dos ejes de variables dependientes, es decir en el eje "Y" izquierdo esta la escala de medición de tensión [V] y corriente [A], en el eje "Y" derecho se puede observar la escala para la medición de factor de potencia, se puede determinar la relación que tiene la variación

de corriente con el factor de potencia, cuando existe un mayor consumo de corriente, los motores de inducción de la maquinaria de la empresa, presentan un factor de potencia más cercano a la unidad, debido a que están usando la energía entregada por la fuente para gran porcentaje de trabajo, cuando el motor está encendido y no está realizando una acción de corte, laminado o perforado, el factor de potencia tiende a ser bajo como se puede observar en la Figura 35 y la Tabla 2 Se realiza una ampliación para observar de manera precisa la variación del factor de potencia en las 3 fases, partiendo del horario de baja carga a un porcentaje de los datos en los cuales los valores son estables.

Figura 36

Variación de FP Baja Carga 10-12-2019 "Sangolquí"

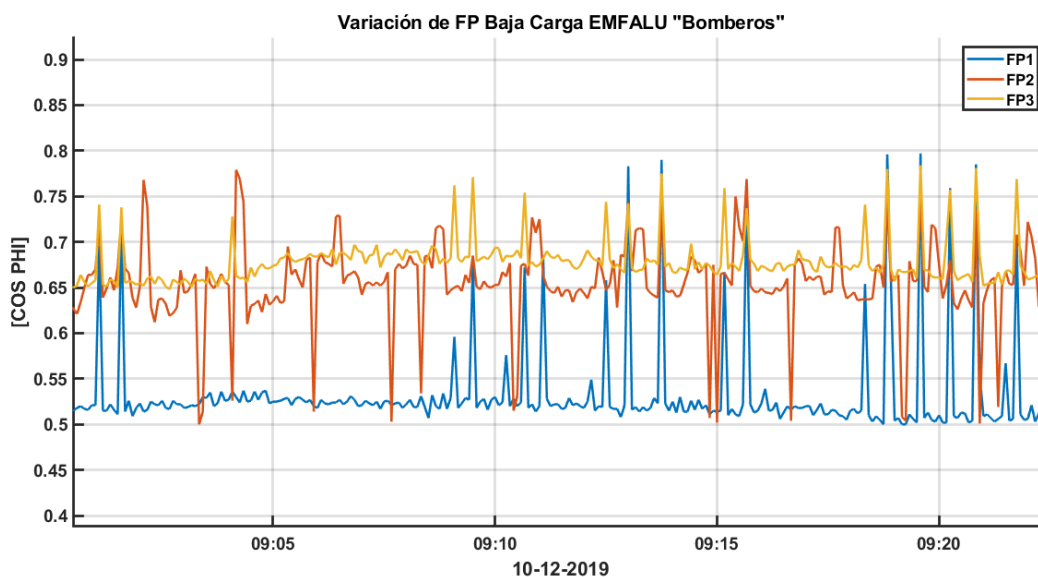


Tabla 14

Variación FP Baja Carga 10-12-2019 "Sangolquí"

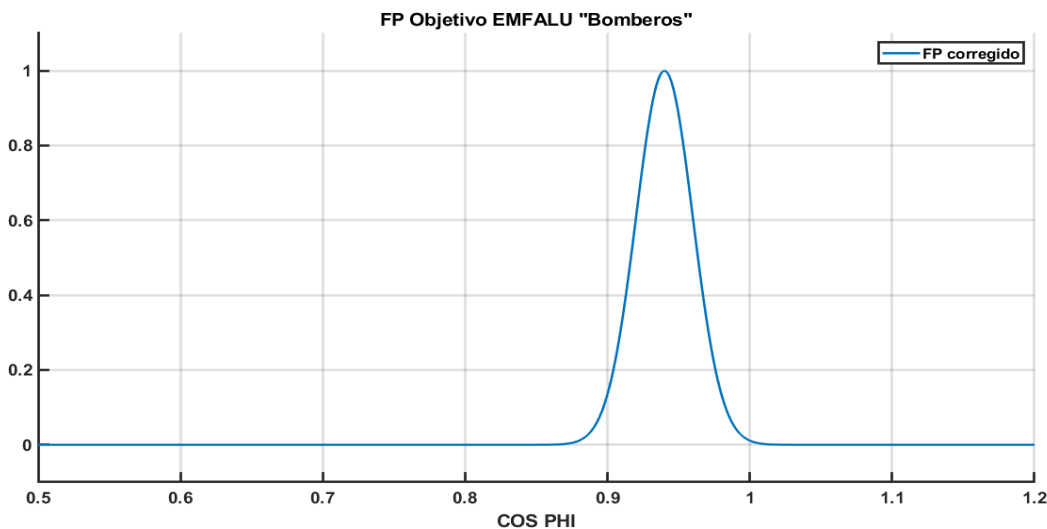
PARAM.	FP1	FP2	FP3
Máximo	0,849	0,933	0,799
Mínimo	0,45	0,5	0,648
Media	0,585	0,656	0,686
Sigma	0,129	0,0519	0,026

En esta sección de los datos en baja carga se tiene variaciones de factor de potencia bajas, para una mejor comprensión se observa los parámetros en la Tabla 14 en donde muestra que el factor de potencia registrado está muy debajo del mínimo permitido para evitar la penalización que es de 0,92.

Para entender de una mejor manera los valores en los cuales el factor de potencia no afecta a la red eléctrica se muestra una gráfica en campana de Gauss centrada en un factor de potencia de 0.94 y con una variación estándar de 0,02 y se realiza una comparativa con los valores reales en baja carga para poder establecer los parámetros principales que intervienen en el sistema de control. La campana de gauss es una distribución normal de datos con un valor medio y una dispersión simétrica en los dos lados, es al punto el cual se desea llegar con la implementación del sistema.

Figura 37

Datos de factor de potencia objetivo



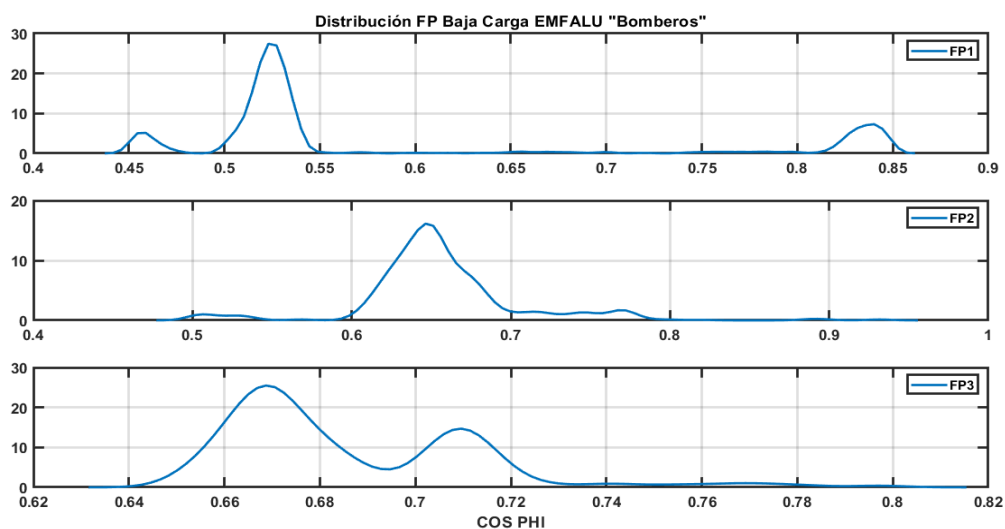
En la Figura 37 se puede observar que los datos de factor de potencia se encuentran en su gran porcentaje en valores entre 0,9 y 1, es el objetivo planteado del sistema de compensación controlado para la mejora del factor de potencia, es de vital

importancia el conocer la cantidad de muestras y el valor de factor de potencia medido que se registra en baja carga en el local "Sangolquí".

Como se puede observar de manera gráfica en la Figura 38 existe una gran cantidad de medidas en las cuales el valor de factor de potencia está debajo del mínimo permitido, y se encuentran dispersas en varios grupos, siendo en la fase 2 en donde se asimila una variación normal. Es el objetivo de este proyecto mejorar el factor de potencia, aplicando métodos de automatización y un sistema controlado para que grupos de actuadores, en este caso banco de capacitores, establezcan los valores a una media de 0,96 y una dispersión máxima de ± 0.4 .

Figura 38

Valores medidos y repetibilidad de factor de potencia 20-12-2019 "Sangolquí"



Además de corriente, tensión y factor de potencia, los datos adquiridos con el Analizador de Red Trifásico 100 [A] – 127/210 [V] implementado, son los valores de potencia activa y potencia aparente, todos estos datos son medidos por fase, se realiza un análisis monofásico para comprender de una mejor manera el análisis trifásico con los siguientes objetivos:

- Equilibrar las cargas monofásicas en las 3 fases, de manera que el factor de potencia tenga un valor medio por fase constante.
- Realizar una comparación de valor medio trifásico y el método de equilibrar cargas trifásicas de manera matemática

Se toma en cuenta los valores registrados de potencia activa y aparente, se procede al cálculo de la potencia reactiva necesaria para compensar al factor de potencia, con los datos de la Tabla 15 se puede calcular el valor del banco de capacitores necesario para llegar a un factor de potencia superior a 0,92, para este caso de estudio se propone un factor de potencia de 0,94, en un análisis trifásico posterior se realizará un cálculo con diferentes valores desde el mínimo permitido hasta un valor de factor de potencia de 1.

Figura 39

Potencia activa y aparente Baja Carga 10-12-2019 "Sangolquí"

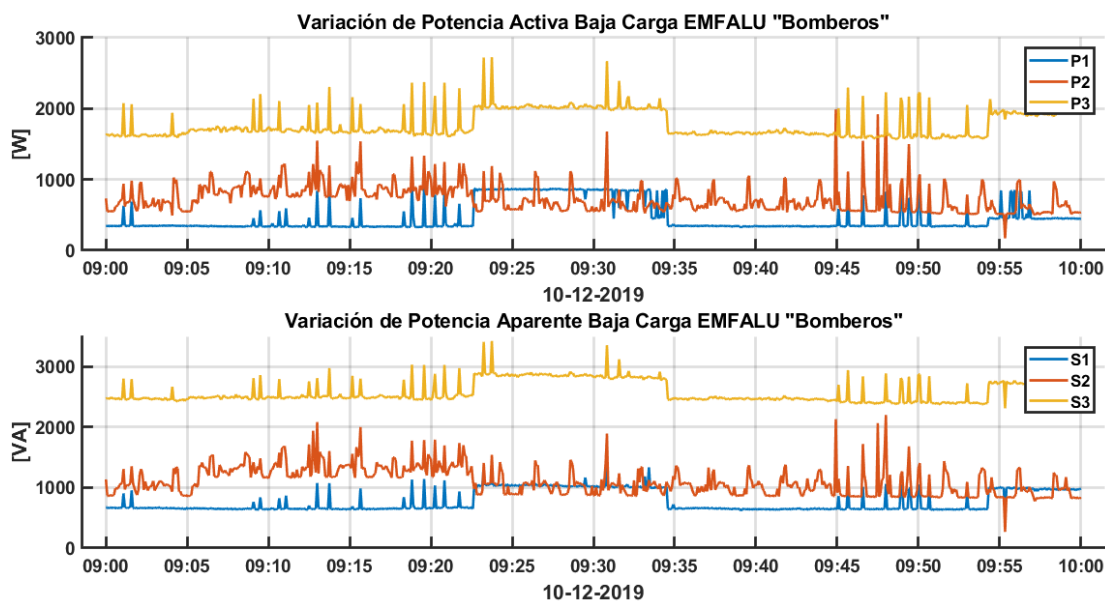


Tabla 15

Potencia activa y aparente Baja Carga 10-12-2019 "Sangolquí"

VARIACIÓN POTENCIA ACTIVA Y APARENTE- BAJA CARGA						
PARAM.	P1 [W]	P2 [W]	P3 [W]	S1 [VA]	S2 [VA]	S3 [VA]
Máximo	909,862	1988,8	2726	1373	2200,7	3424,7
Mínimo	267,927	169,769	1567,3	401,689	267,776	2310,9
Media	466,162	728,771	1775,58	770,781	1102,25	2581,12
Sigma	206,959	201,83	190,533	175,528	235,282	179,884

El factor de potencia se obtiene con la ecuación (2.7), Se calcula el valor de la potencia aparente objetivo, se despeja el valor de S en la ecuación (2.7).

$$S_{obj} = \frac{P}{fp} \quad (3.6)$$

Dónde:

fp = factor de potencia monofásico

P = potencia activa monofásica

S_{obj} = potencia aparente monofásica

Como se puede observar en la sección Triángulo de Potencias, la potencia activa en el sistema se mantiene constante, para disminuir el ángulo de retraso o delante de la corriente con respecto al voltaje se procede a compensar potencia reactiva, por lo que para el cálculo de la potencia reactiva se tiene:

$$Q_{obj} = \sqrt{S_{obj}^2 - P^2} \quad (3.7)$$

Dónde:

Q_{obj} = Potencia reactiva monofásica objetivo

Una vez obtenidos estos valores se procede al cálculo de la potencia reactiva monofásica del banco de capacitores:

$$Q_{capm} = Q - Q_{obj} \quad (3.8)$$

Dónde:

Q_{capm} = potencia reactiva monofásica del capacitor

Tabla 16

Potencias objetivo y valor de Capacitor monofásico Fase 1 Baja Carga "Sangolquí"

PARA M.	P1 [W]	Q1 [VAR]	S1 [VA]	FP1 []	FP-Obj.	S-Obj. [VA]	Q-Obj. [VAR]	Q-Capacitor [VAR]
Máximo	909,86 2	1060,6	1373	0,92 4	0,96	947,77 2	265,37 6	795,223
Mínimo	267,92 7	299,28 2	401,68 9	0,89 4	0,92	291,22 5	114,13 6	185,145
Media	466,16 2	594,82 2	770,78 1	0,90 4	0,94	495,91 7	169,19 4	425,627
Sigma	206,95 9	104,84 9	175,52 8	0,00 8	0,02			

Tabla 17

Potencias objetivo y valor de Capacitor monofásico Fase 2 Baja Carga "Sangolquí"

PARAM.	P2 [W]	Q2 [VAR]	S2 [VA]	FP2 []	FP-Obj.	S-Obj. [VA]	Q-Obj. [VAR]	Q-Capacitor [VAR]
Máximo	1988, 8	1509,5	2200,7	0,88 6	0,96	2071,66 6	580,06 6	929,433
Mínimo	169,7 69	207,07 9	267,77 6	0,78 8	0,92	184,531	72,321	134,757
Media	728,7 71	821,83 2	1102,2 5	0,79 9	0,94	775,288	264,50 8	557,323
Sigma	201,8 3	151,89 8	235,28 2	0,00 8	0,02			

Tabla 18

Potencias objetivo y valor de Capacitor monofásico Fase 3 Baja Carga "Sangolquí"

PARAM.	P3 [W]	Q3 [VAR]	S3 [VA]	FP3 []	FP-Obj.	S-Obj. [VA]	Q-Obj. [VAR]	Q-Capacitor [VAR]
Máximo	2726	2072,9	3424,7	0,88	0,96	2839,58 3	795,08 3	1277,816

PARAM.	P3 [W]	Q3 [VAR]	S3 [VA]	FP3 []	FP- Obj.	S-Obj. [VA]	Q-Obj. [VAR]	Q- Capacitor [VAR]
Mínimo	1567, 3	1389,6	2310,9	0,76 3	0,92	1703,58 6	667,66 7	721,932
Media	1775, 58	1870,6 6	2581,1 2	0,78 9	0,94	1888,91 4	644,44 9	1226,210
Sigma	190,5 33	78,85	179,88 4	0,03 5	0,02			

Todos los datos que se obtuvieron muestran valores máximos y mínimos de compensación de potencia reactiva, el actuar de los capacitores es para llegar a un nivel de potencia reactiva adecuado para que el factor de potencia llegue a un nivel de 0,92 o superior, de igual manera permite visualizar de manera gráfica en la Figura 40 el accionar del banco de capacitores en cada fase. Se debe recordar que se está realizando un análisis monofásico para en lo posterior concluir con un análisis trifásico y obtener el valor final del banco de capacitores.

Figura 40

Compensación de capacitor Análisis monofásico Baja Carga 10-12-2019 "Sangolquí"

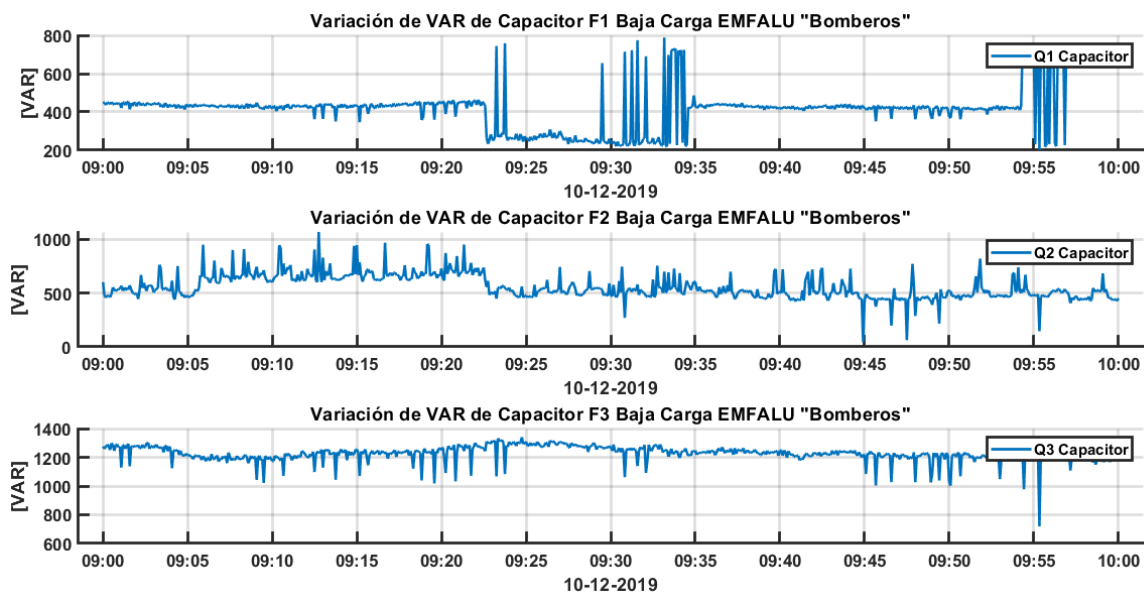


Tabla 19

Parámetros de Capacitor monofásico Baja Carga 10-12-2019 "Sangolquí"

VARIACIÓN VAR CAPACITOR - BAJA CARGA			
PARAM.	Q1 [VAR]	Q2 [VAR]	Q3 [VAR]
Máximo	788,332	1067,4	1339,9
Mínimo	202,037	45,28	719,444
Media	425,628	557,323	1226,21
Sigma	121,146	112,85	53,6707

Se puede observar de manera clara en la Figura 40 que la fase 3 permite una compensación estable del sistema monofásico, entonces se concluye en este apartado que el método para equilibrar las cargas en un sistema trifásico desbalanceado se parte de la Fase 3, ya que esta permite un estudio estable del sistema, además que tiene un valor máximo de potencia reactiva de alrededor de 1,34 [kVAR], acercándose de manera muy efectiva a los bancos de capacitores trifásicos comerciales para una compensación en Baja Carga.

Plena Carga

Para el análisis en plena carga se establece el estudio en el día martes 10 de diciembre del 2019, como se puede observar en la Figura 32 en el horario de 16h00 a 17h00 existe el máximo consumo de corriente debido a que la mayoría de maquinaria de corte, laminación y perforación se encuentran en funcionamiento además de los extractores y el compresor por periodos de tiempo. Este caso se establece como Plena Carga para realizar el análisis, debido a que en este periodo de tiempo existe un factor de potencia bajo el mínimo permitido y un consumo de corriente mayor, en este caso se necesita de mayor potencia reactiva para la acción magnética de los motores, y por lo tanto mayor compensación de parte del banco de capacitores.

En la Tabla 20 están los parámetros puntuales de la Figura 41 en donde se observa variaciones periódicas en el consumo de corriente, esto debido a la función de corte de las máquinas, el motor se enciende en vacío, es decir sin carga, al momento de identificar la medida se procede a utilizar la sierra de corte por lo que necesita más torque por lo tanto más corriente, esto produce la variación, además que se observa que existen 4 picos debido al encendido del compresor, es un compresor SCHULZ de 10HP, con un tanque de almacenamiento, al registrar presión menor a 4.5 Bares se produce el encendido hasta llegar a una presión de 7.5 Bares. Además, se verifica que el consumo medio en Plena Carga es de 21 a 35 [A], este dato en la posteridad será de gran importancia debido al mínimo de potencia reactiva trifásica necesaria para compensar al sistema.

Figura 41

Consumo de corriente Plena Carga 10-12-2019 "Sangolquí"

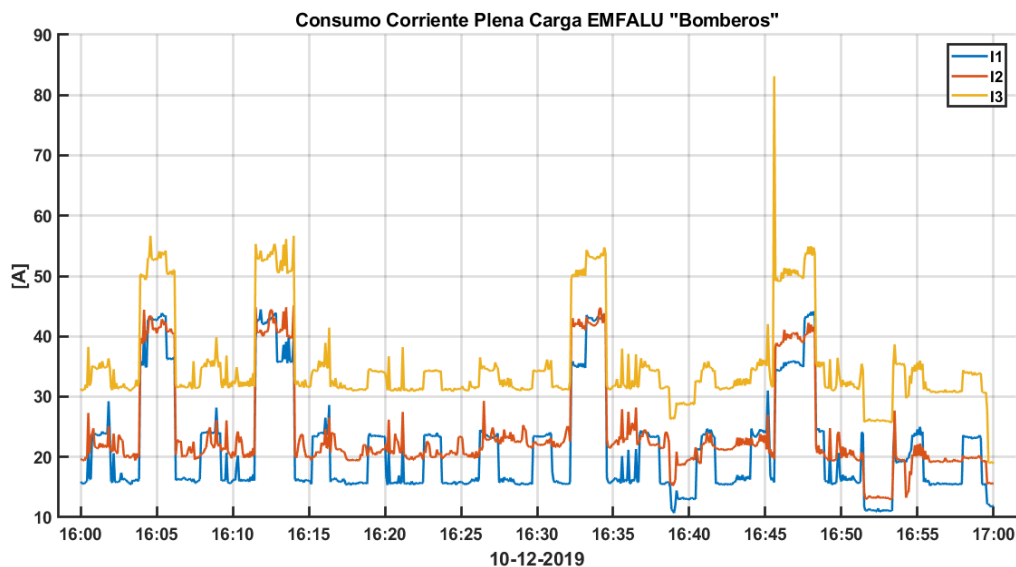


Tabla 20

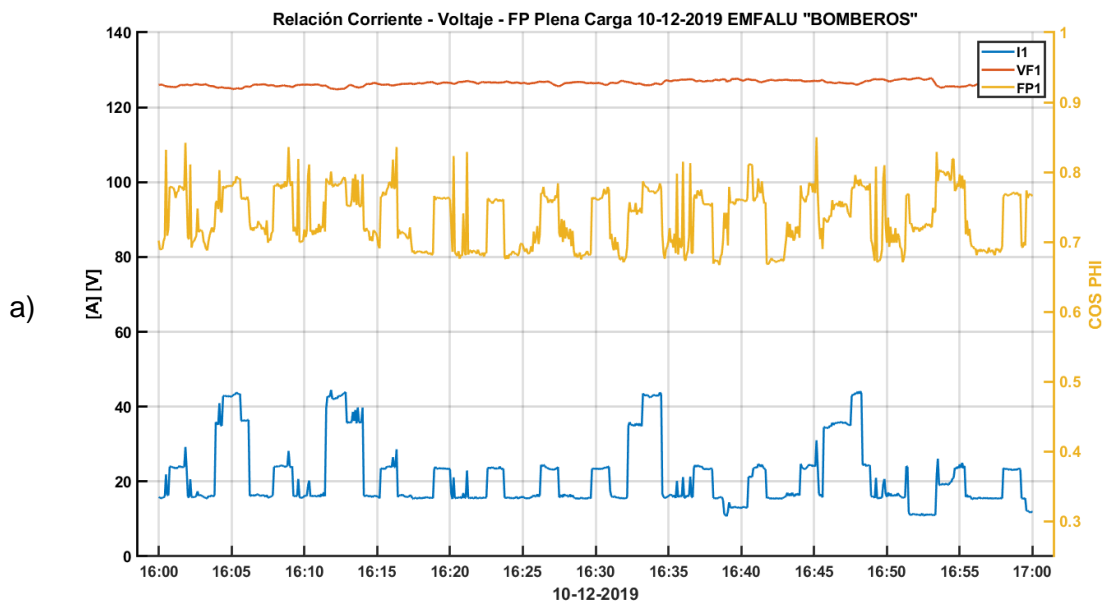
Consumo de corriente Plena Carga 10-12-2019 "Sangolquí"

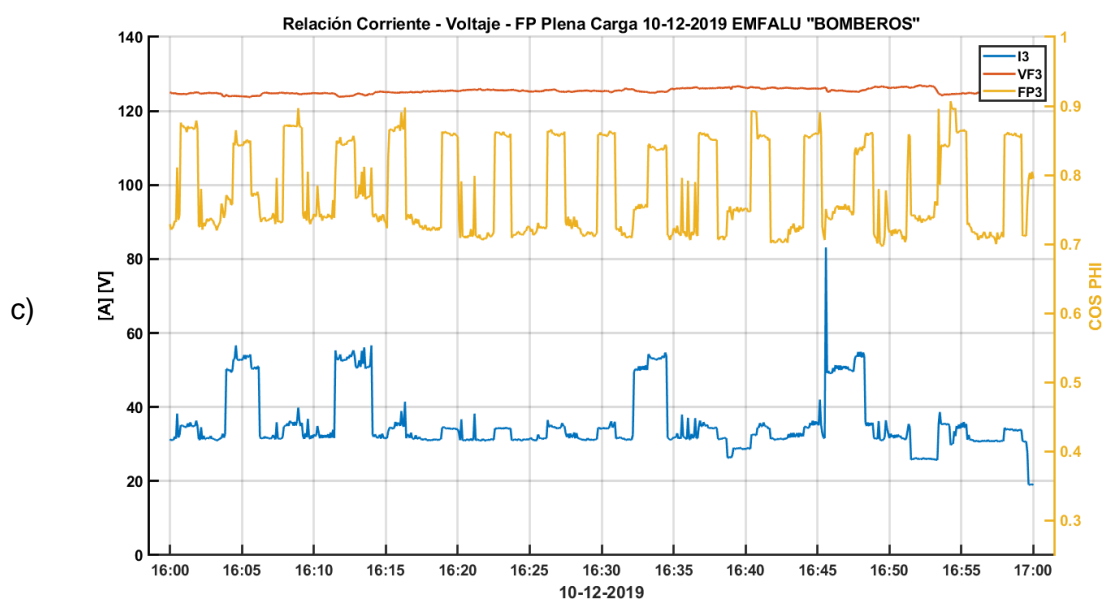
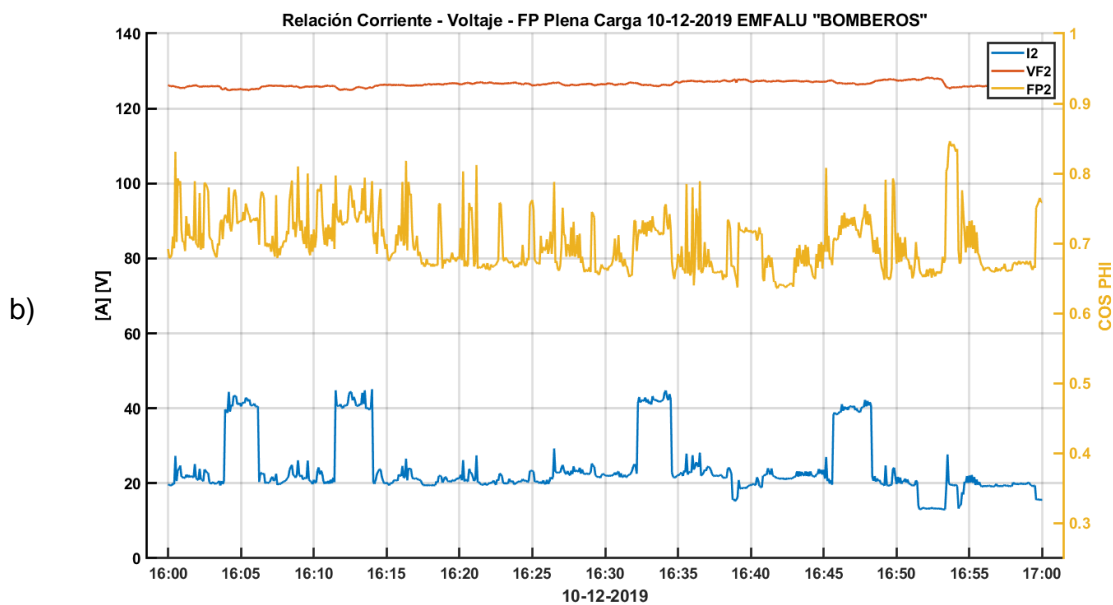
PARAM.	I1 [A]	I2 [A]	I3 [A]
Máximo	44,475	45,102	83,137
Mínimo	10,708	13,003	18,89
Media	21,661	24,279	35,633
Sigma	8,805	7,901	7,965

Para poder apreciar de una manera más clara como el consumo de corriente afecta al rendimiento del sistema, se grafica la variación del factor de potencia en el periodo de Plena Carga.

Figura 42

Relación Corriente - Voltaje-FP 10-12-2019 "Sangolquí", a) Fase 1, b) Fase 2, c) Fase 3

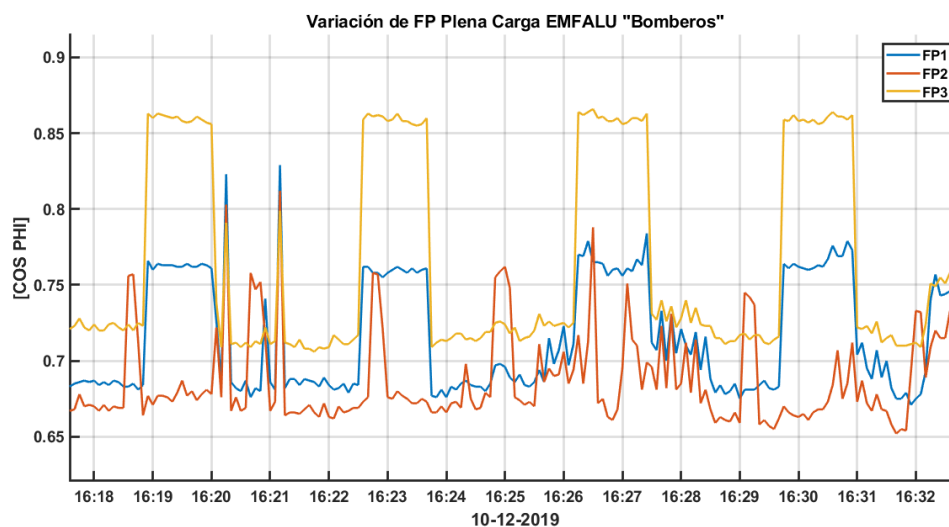




En la Figura 42 se puede observar que a diferencia de la Figura 35 existe un nivel medio de factor de potencia más cercano al mínimo permitido, además de la variación que tiene el rendimiento de potencia con el consumo de corriente. Se procede a realizar una ampliación de la Figura 41 para establecer valores medios de factor de potencia en consumo estable.

Figura 43

Variación de FP Plena Carga 10-12-2019 "Sangolquí"



Se observa con claridad en la Figura 43 el desbalance que existe en la fase 3 del sistema, y nos permite calcular los máximos valores de potencia reactiva que necesita compensar el sistema por parte del banco de capacitores a calcular.

En la Tabla 21, se puede apreciar que el valor medio del factor de potencia se aproxima al valor de 0,8, con máximos de 0,9 en la fase 3, se debe tomar en cuenta que los valores de factor de potencia recomendados son los apreciados en la curva de la Figura 37.

Tabla 21

Variación de FP Plena Carga 10-12-2019 "Sangolquí"

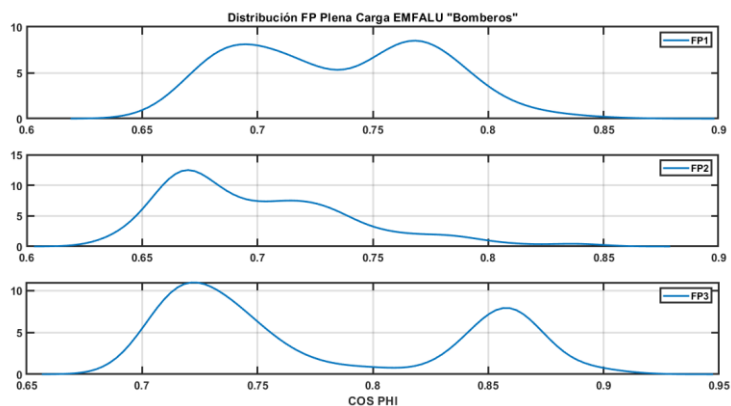
PARAM.	FP1	FP2	FP3
Máximo	0,85	0,846	0,907
Mínimo	0,667	0,636	0,697
Media	0,734	0,701	0,777
Sigma	0,041	0,041	0,064

Los valores medidos de factor de potencia se visualizan de mejor manera en la Figura 44, en la fase 1. Se establece una distribución normal con 2 valores medios de 0,7 y 0,76, mientras que la fase 2 registra los valores más bajos de factor de potencia.

Figura 44

Valores medidos y repetibilidad de factor de potencia Plena Carga 10-12-2019

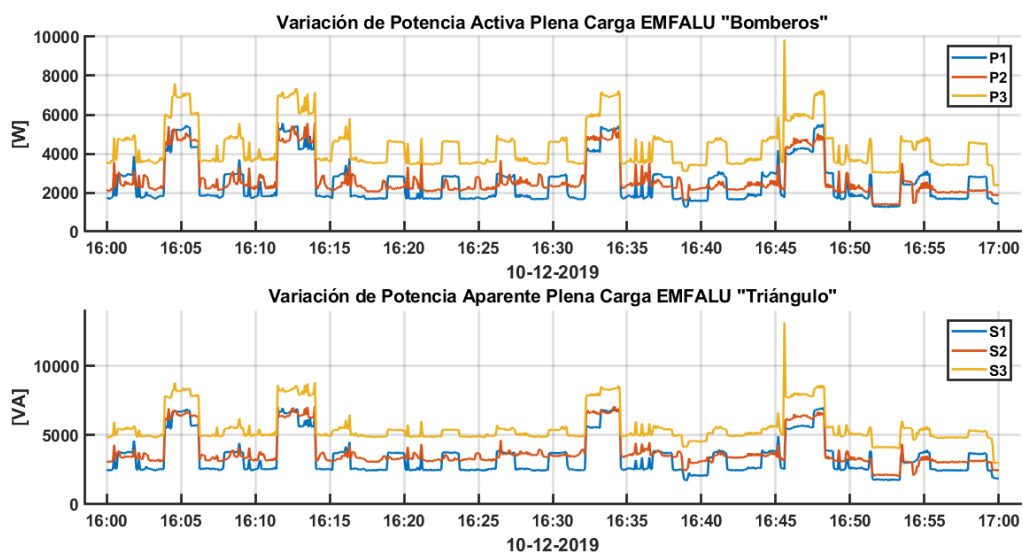
"Sangolquí"



Los valores de potencia activa y aparente son de gran importancia para el cálculo de la potencia reactiva monofásica que se necesita para compensar el sistema, la variación en Plena Carga se puede observar en las ecuaciones (3.6), (3.7), (3.8).

Figura 45

Potencia activa y aparente Plena Carga 10-12-2019 "Sangolquí"



En la Tabla 22, se tiene una media de 4300 [W] en la fase 3 como valor máximo a tomar en cuenta para la compensación.

Tabla 22

Potencia activa y aparente Plena Carga 10-12-2019 "Sangolquí"

PARAM.	P1 [W]	P2 [W]	P3 [W]	S1 [VA]	S2 [VA]	S3 [VA]
Máximo	5566,3	5615,5	9859,2	6975,3	7071,3	13128
Mínimo	1256,2	1375,1	2361,2	1696,7	2060,1	2970,2
Media	2547,98	2710,56	4361,06	3419,07	3835,76	5580,55
Sigma	1131,93	975,385	1141,3	1377,9	1237,01	1231,13

Nota: Los valores presentados reflejan la variación de la potencia activa y aparente a plena carga

Se realiza el cálculo y se tabula los datos para una mejor comprensión del modo de compensación que se tiene como valor máximo, mínimo, medio y la desviación que aparenta.

Tabla 23

Potencias objetivo y valor de Capacitor monofásico Fase 1 Plena Carga "Sangolquí"

PARAM.	P1 [W]	Q1 [VAR]	S1 [VA]	FP1 []	FP- Obj.	S-Obj. [VA]	Q-Obj. [VAR]	Q- Capacitor [VAR]
Máximo	5566, 3	4338,4	6975,3	0,92 3	0,96	5798,2 2	1623,5 0	2714,89
Mínimo	1256, 2	1137,5	1696,7	0,61 9	0,92	1365,4 3	535,13	602,36
Media	2547, 98	2270,6 2	3419,0 7	0,75 8	0,94	2710,6 1	924,79	1345,82
Sigma	1131, 93	812,11 8	1377,9	0,08 8	0,02			

Tabla 24

Potencias objetivo y valor de Capacitor monofásico Fase 2 Plena Carga "Sangolquí"

PARA M.	P2 [W]	Q2 [VAR]	S2 [VA]	FP2 []	FP- Obj.	S-Obj. [VA]	Q-Obj. [VAR]	Q- Capacitor [VAR]
Máxim o	5615,5	4722,6	7071,3	0,88 6	0,96	5849,47 9	1637,85 4	3084,745
Mínim o	1375,1	1507,5	2060,1	0,78 8	0,92	1494,67 3	585,790	921,709
Media	2710,5 6	2704,5	3835,7 6	0,79 9	0,94	2883,57 4	983,801	1720,698

PARA M.	P2 [W]	Q2 [VAR]	S2 [VA]	FP2 []	FP-Obj.	S-Obj. [VA]	Q-Obj. [VAR]	Q-Capacitor [VAR]
Sigma	975,38 5	794,01 9	1237,0 1	0,00 8	0,02			

La compensación de los capacitores en análisis monofásico nos muestra la cantidad de potencia reactiva que necesita el sistema en cada una de las fases, es importante mencionar que los datos adquiridos nos sirven para realizar un cálculo medio para compensación o para realizar un balance de las cargas y de la potencia reactiva requerida en el sistema trifásico.

Tabla 25

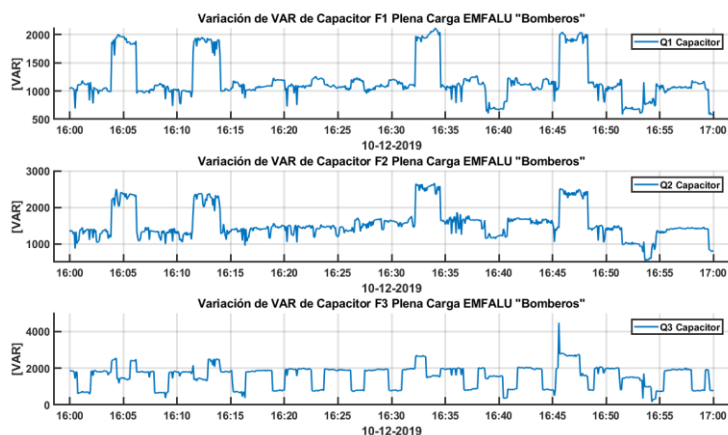
Potencias objetivo y valor de Capacitor monofásico Fase 3 Plena Carga "Sangolquí"

PARA M.	P3 [W]	Q3 [VAR]	S3 [VA]	FP3 []	FP-Obj.	S-Obj. [VA]	Q-Obj. [VAR]	Q-Capacitor [VAR]
Máximo	9859,2	8668,5	13128	0,88	0,96	10270	2875,6	5792,9
Mínimo	2361,2	1785,3	2970,2	0,76	0,92	2566,52	1005,86	779,433
Media	4361,0 6	3432,6 7	5580,5 5	0,78 9	0,94	4639,42 5	1582,85 3	1849,816
Sigma	1141,3	744,30 3	1231,1 3	0,03 5	0,02			

En la Figura 46 la compensación que necesita cada fase para llegar a un factor de potencia es de 0,94, y se establecen los parámetros observados en la Tabla 26, en donde se puede apreciar que la media de potencia reactiva del banco monofásico es de 1574,86 [VAR] en su máximo valor de carga.

Figura 46

Compensación de capacitor Análisis monofásico Plena Carga 10-12-2019 "Sangolquí"

**Tabla 26**

Parámetros de Capacitor monofásico Plena Carga 10-12-2019 "Sangolquí"

VARIACIÓN VAR MONO CAPACITOR - PLENA CARGA			
PARAM.	Q1 [VAR]	Q2 [VAR]	Q3 [VAR]
Máximo	2114	2660,4	4468,5
Mínimo	576,275	529,418	160,894
Media	1185,19	1549,81	1574,86
Sigma	357,291	420,073	595,162

Local "San Rafael - Sangolquí"

Baja Carga

El estudio realizado tiene similitud con el local "Sangolquí", los tipos de cargas y las características se encuentran en la sección Local "Sangolquí", el consumo de corriente para el análisis en Baja y Plena Carga se puede observar que es de forma más balanceada que en el anterior local analizado, en la Figura 47 se observa el consumo de corriente en el periodo de 10h00 a 24h00, se realizó el día viernes 20 de

diciembre del 2019, se tomó estos datos a razón de que se observa de manera más clara el consumo en Baja Carga y en Plena Carga.

Para el análisis de tensión como se explica en la sección Calidad de Energía Eléctrica, debe tener un 5% de variación con respecto a su valor nominal, en la Figura 48, la variación de tensión en el transcurso del periodo de medidas, como se puede observar en el análisis de tensión del anterior local. Se tiene en cuenta el 5% de variación máxima se da:

$$V_{f_{mv}} = 127 - (127 * 0,05) = 120,65[V]$$

Dónde:

$V_{f_{mv}}$ = voltaje de fase máxima variación en carga

Figura 47

Consumo de corriente 20-12-2019 "San Rafael"

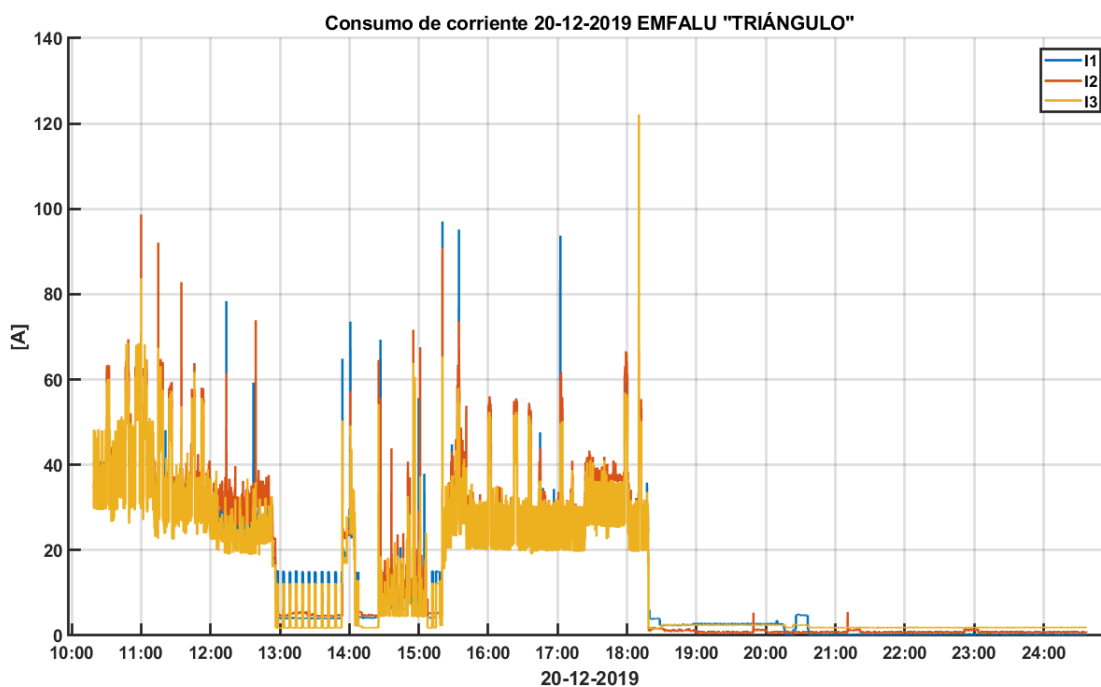
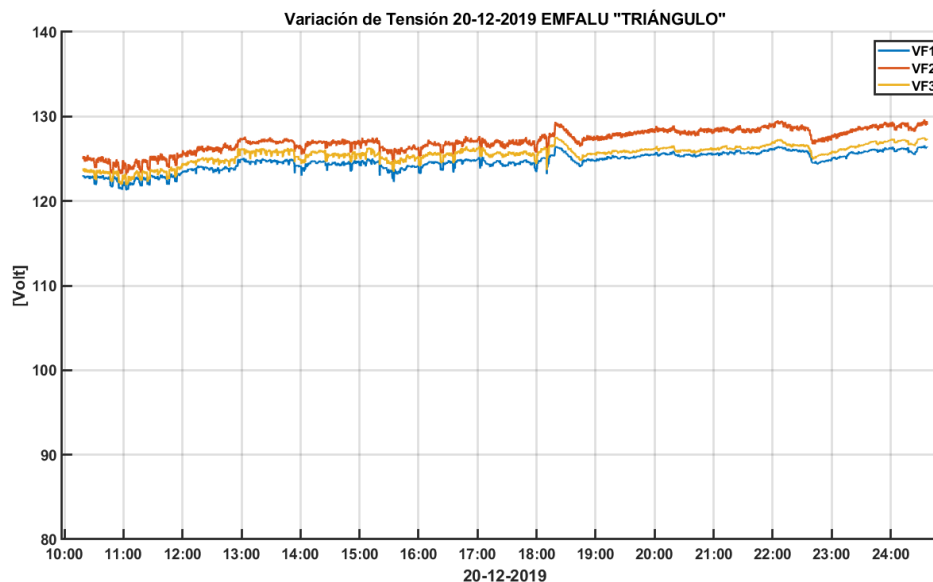


Figura 48

Variación de tensión 20-12-2019 “San Rafael”



En la Tabla 27 se puede observar que el mínimo dato de tensión medida es de 121,278 [V] y el máximo en 129,654 [V], con esto se puede concluir que la tensión trabaja en sus rangos nominales, en todo el periodo de medida.

Tabla 27

Variación de tensión 20-12-2019 “San Rafael”

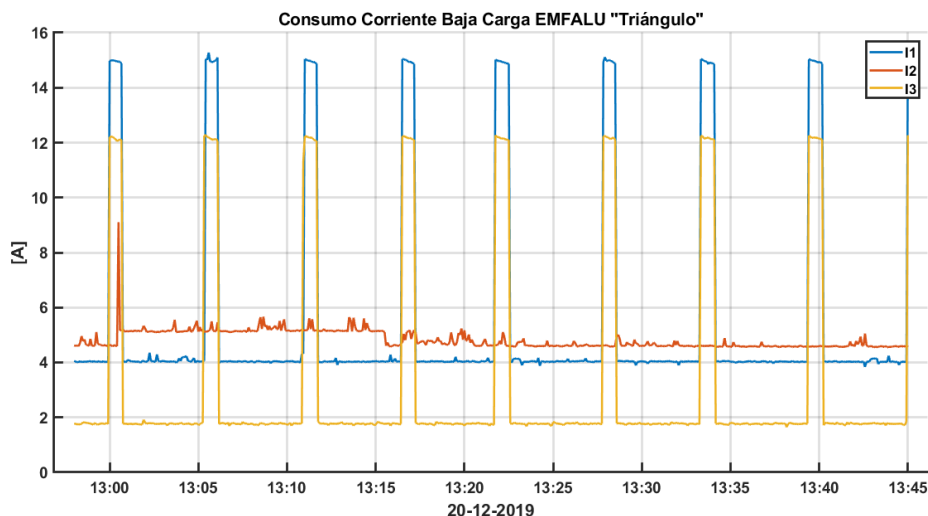
PARAM.	VF1 [V]	VF2 [V]	VF3 [V]
Máximo	126,578	129,654	127,565
Mínimo	121,278	123,117	121,907
Media	124,67	127,143	125,547
Sigma	1,068	1,327	1,075

Nota: Los datos presentados reflejan la variación del voltaje con baja carga

Se realiza una ampliación de la Figura 47 para observar el consumo de corriente en el periodo de baja carga para la toma de parámetros en la cual se puede observar que en la Fase 2 existe un desbalance.

Figura 49

Consumo de corriente Baja Carga 20-12-2019 "San Rafael"



En la Tabla 28 se pueden observar los parámetros de importancia registrados en el periodo de Baja Carga establecido en el horario de 13h00 a 14h00, se observa que existe un equilibrio en las cargas llegando a una media de 3 a 5 [A].

Tabla 28

Parámetros de consumo de corriente Baja Carga 20-12-2019 "San Rafael"

PARAM.	I1 [A]	I2 [A]	I3 [A]
Máximo	15,277	9,105	12,275
Mínimo	3,836	4,55	1,649
Media	5,508	4,834	3,203
Sigma	3,731	0,334	3,585

Nota: Estos valores reflejan el consumo de corriente con baja carga

Se tiene en cuenta los parámetros principales que son la corriente de consumo y la variación de voltaje se procede a analizar la variación del factor de potencia con relación a los valores de corriente y tensión, y observar que concuerde con los datos de la Tabla 2 que nos da los valores de factor de potencia de las cargas convencionales, se puede observar con mayor importancia la primera sección de la Tabla 2 en donde se

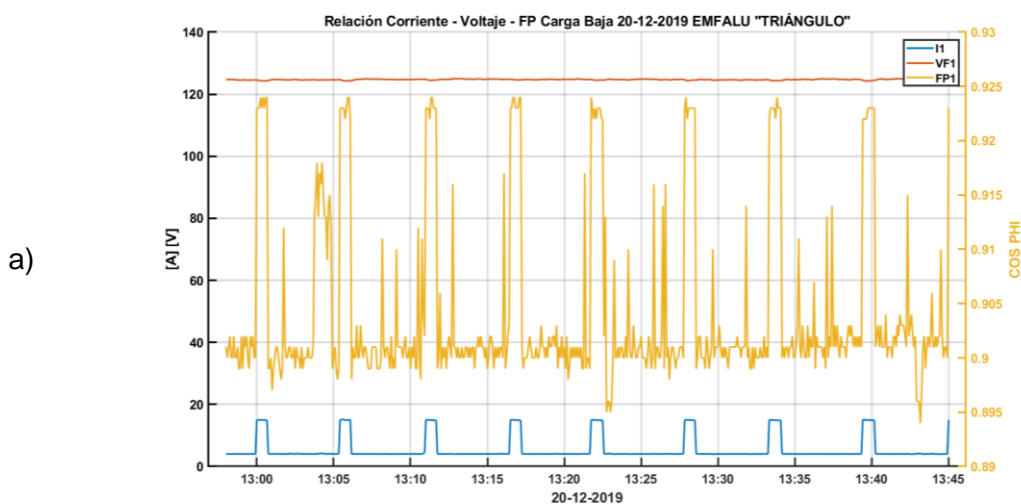
muestra la variación de factor de potencia según la cantidad de carga porcentual que realiza el motor trifásico de inducción.

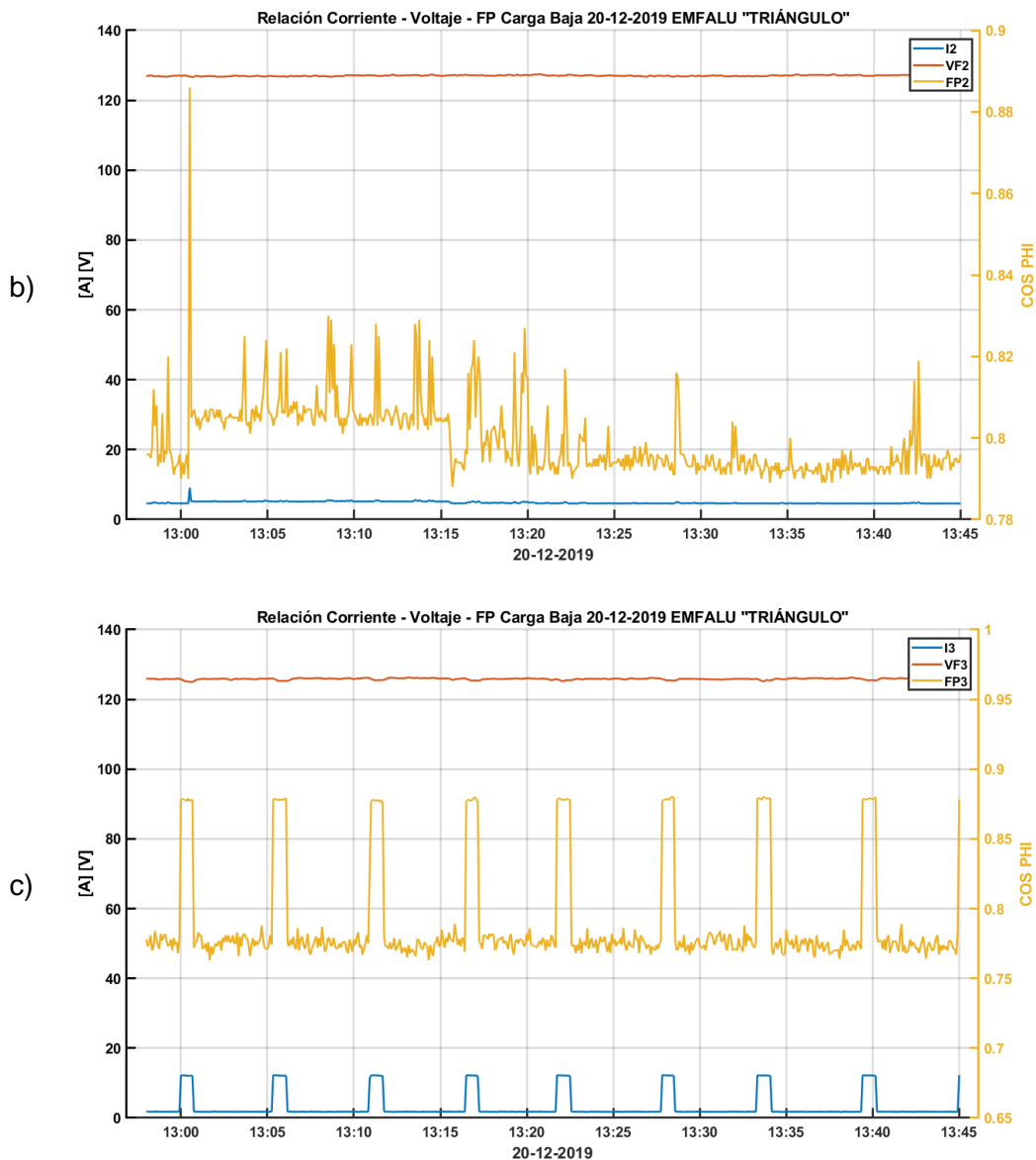
En la Figura 50 el eje "Y" izquierdo se tiene la escala de corriente en [A] y de tensión en [V], mientras que en el eje "Y" derecho se tiene la escala de factor de potencia, se estima que la fase 2 tiene un comportamiento poco estable, debido al desbalance verificado en la Figura 49 además se puede observar la incidencia del consumo de corriente del arranque y acción de los motores de inducción con la variación de factor de potencia.

Para analizar la variación del factor de potencia de una manera precisa se realiza una ampliación de sus datos en el periodo de Baja Carga en la Figura 51 se puede observar que los valores de factor de potencia se encuentran cercanos al mínimo permitido que es de 0,92, los datos se encuentran tabulados en la Tabla 29 en donde se nota una media en la Fase 1 de 0,9 y en fase 2 y 3 de 0,8, en estos casos los datos nos permiten analizar los mínimos permitidos para la compensación de factor de potencia.

Figura 50

Relación Corriente-Voltaje- FP 20-12-2019 "San Rafael", a) Fase 1, b) Fase 2, c) Fase 3

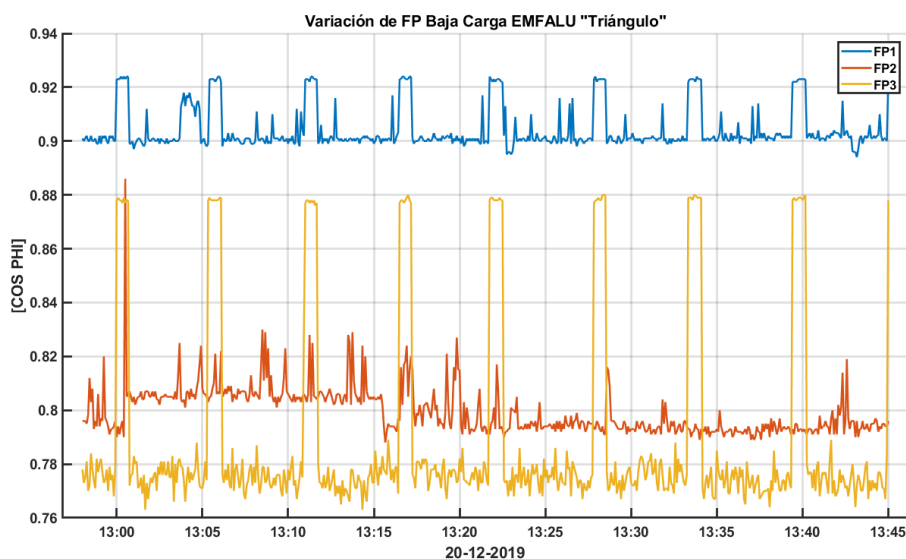




La distribución de los datos medidos de factor de potencia se pueden observar en la Figura 52, se debe tomar en cuenta que el objetivo planteado al realizar el sistema automático de corrección de factor de potencia debe llegar a una curva semejante a la Figura 37 se puede observar que existen valores dispersos pero cercanos al mínimo permitido, en Baja Carga al tener un bajo consumo de corriente se puede establecer un periodo de no corrección y analizar al sistema solo en el periodo de Plena Carga.

Figura 51

Variación de factor de potencia Baja Carga 20-12-2019 “San Rafael”

**Tabla 29**

Variación de factor de potencia Baja Carga 20-12-2019 “San Rafael”

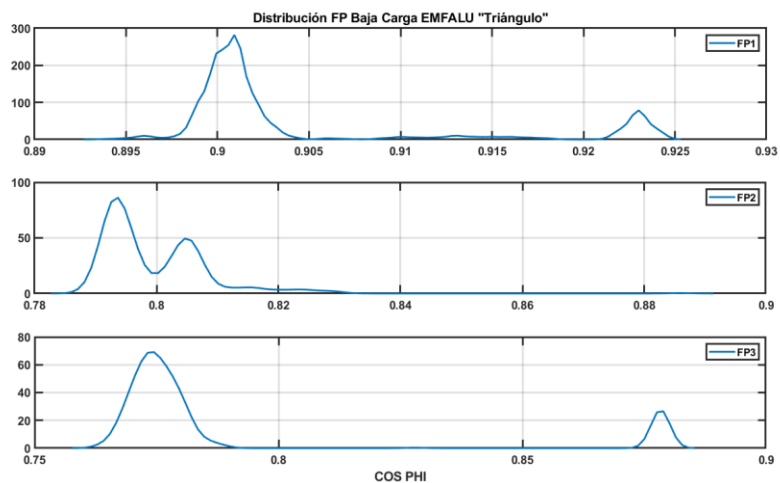
PARAM.	FP1	FP2	FP3
Máximo	0,924	0,886	0,88
Mínimo	0,894	0,788	0,763
Media	0,904	0,799	0,789
Sigma	0,008	0,008	0,035

Nota: Los valores presentan la variación del FP con baja carga

Los datos de potencia activa y aparente medidos con el Analizador de Red Trifásico 120 [A] – 127/210 [V] implementado para el local “San Rafael - Sangolquí”, se muestran en la Figura 53 se puede observar que al tener un factor de potencia cercano al mínimo permitido, las curvas son similares en valores máximos, medios y mínimos, con estos datos se procede a calcular la potencia reactiva monofásica necesaria para compensar el sistema trifásico, con la ecuación (3.6), (3.7), (3.8).

Figura 52

Valores medidos y repetibilidad de factor de potencia 20-12-2019 "San Rafael"



En la Tabla 30 se observan los parámetros medidos para el cálculo de las potencias objetivo para lograr una compensación de 0,92 a 0,96 en valores monofásicos, al realizar este análisis en Baja Carga nos permite calcular los mínimos valores de compensación del sistema, además de realizar una estimación para el equilibrio de las cargas en el análisis trifásico.

Figura 53

Potencia activa y aparente Baja Carga 20-12-2019 "San Rafael"

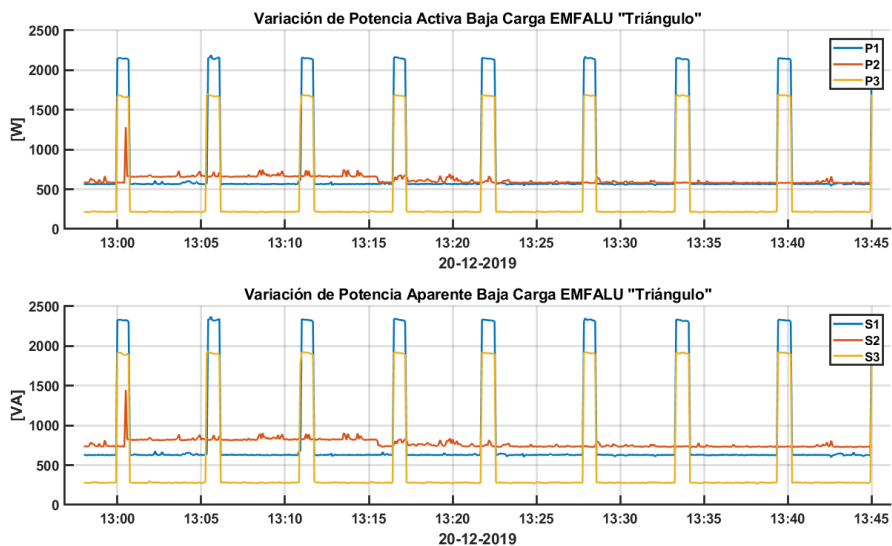


Tabla 30*Potencia activa y aparente Baja Carga 20-12-2019 "San Rafael"*

VARIACIÓN POTENCIA ACTIVA Y APARENTE- BAJA CARGA						
PARAM.	P1 [W]	P2 [W]	P3 [W]	S1 [VA]	S2 [VA]	S3 [VA]
Máximo	2190,1	1283,1	1694,1	2373	1448,6	1928,7
Mínimo	541,087	573,857	201,714	598,594	722,66	260,517
Media	780,373	617,959	418,032	858,17	772,357	504,523
Sigma	539,749	50,3575	503,953	579,783	53,1844	562,813

Los datos obtenidos en los cálculos se muestran en la Tabla 31 Tabla 32, Tabla 33, para cada fase respectiva, se concluye que en el local "San Rafael", los valores de potencia reactiva son bajos para la compensación del sistema en análisis monofásico, llegando a un valor máximo de 503,9455 [VAR] en un factor de potencia de 0,96, relativamente alto en comparación con el mínimo permitido, los que nos permite observar que en Baja Carga el sistema no necesita de una compensación por parte del sistema automático de corrección a diseñar, en el análisis de Plena Carga se darán los valores máximos y mínimo que necesita el sistema. En la Figura 54 se observa la compensación del capacitor monofásico en las 3 fases, y en la Tabla 34 se tabulan los datos de importancia, para una corrección del factor de potencia de 0,94.

Tabla 31*Potencias objetivo y valor de Capacitor monofásico Fase 1 Baja Carga "San Rafael"*

PARAM.	P1 [W]	Q1 [VAR]	S1 [VA]	FP1 []	FP- Obj.	S-Obj. [VA]	Q-Obj. [VAR]	Q- Capacitor [VAR]
Máximo	2190, 1	913,53 1	2373	0,92 4	0,96	2281,35 4	638,77 9	274,751
Mínimo	541,0 87	251,46 8	598,59 4	0,89 4	0,92	588,138	230,50 2	20,965
Media	780,3 73	356,32 7	858,17	0,90 4	0,94	830,184	283,23 7	73,089
Sigma	539,7 49	212,89 7	579,78 3	0,00 8	0,02			

Figura 54

Compensación de capacitor Análisis monofásico Baja Carga

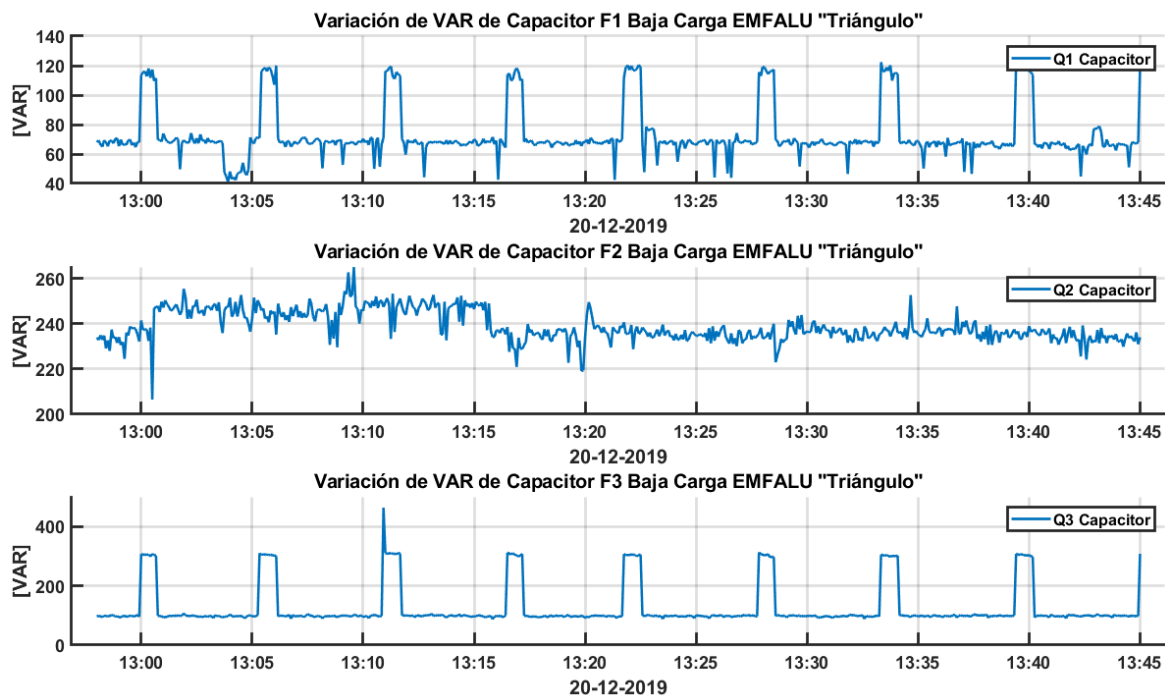


Tabla 32

Potencias objetivo y valor de Capacitor monofásico Fase 2 Baja Carga "San Rafael"

PARAM.	P2 [W]	Q2 [VAR]	S2 [VA]	FP2 []	FP- Obj.	S-Obj. [VA]	Q-Obj. [VAR]	Q- Capacitor [VAR]
Máximo	1283, 1	672,23 2	1448,6	0,88 6	0,96	1336,56 2	374,23 7	297,994
Mínimo	573,8 57	439,23 3	722,66	0,78 8	0,92	623,757	244,46 2	194,770
Media	617,9 59	463,13 7	772,35 7	0,79 9	0,94	657,403	224,28 9	238,847
Sigma	50,35 75	21,436	53,184 4	0,00 8	0,02			

Tabla 33

Potencias objetivo y valor de Capacitor monofásico Fase 3 Baja Carga "San Rafael"

PARAM.	P3 [W]	Q3 [VAR]	S3 [VA]	FP3 []	FP- Obj.	S-Obj. [VA]	Q-Obj. [VAR]	Q- Capacitor [VAR]
Máximo	1694, 1	998,05 8	1928,7	0,88	0,96	1764,68 7	494,11 2	503,945
Mínimo	201,7 14	163,92 4	260,51 7	0,76 3	0,92	219,254	85,929	77,994
Media	418,0 32	278,58 8	504,52 3	0,78 9	0,94	444,714	151,72 5	126,862
Sigma	503,9 53	254,90 2	562,81 3	0,03 5	0,02			

Tabla 34

Parámetros de Capacitor monofásico Baja Carga 20-12-2019 "San Rafael"

PARAM.	Q1 [VAR]	Q2 [VAR]	Q3 [VAR]
Máximo	122,524	265,08	463,3731
Mínimo	41,152	206,5133	87,5672
Media	73,0896	238,848	126,863
Sigma	17,827	6,709	72,336

Nota: Los valores muestran la variación en [VAR] del sistema monofásico en baja carga

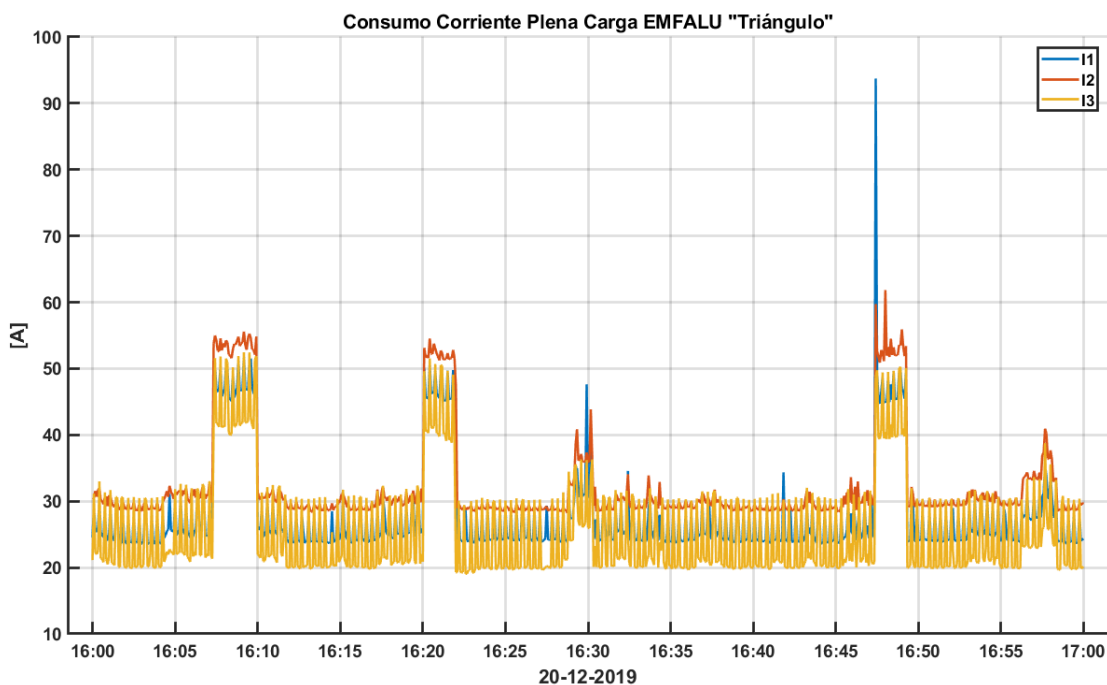
Plena Carga

En el análisis de Plena Carga se establece el estudio el día viernes 20 de diciembre del 2019, en el horario de 16h00 a 17h00, en la Figura 47 en ese periodo se da el mayor consumo y la curva se nota estable, se realiza una ampliación y se puede observar que el sistema en las 3 fases tiende a estar equilibrado.

En la Tabla 35 la media de las 3 fases va desde 25 a 32 [A], se da un punto máximo de consumo en el arranque del compresor, en este periodo se puede observar 3 arranques del compresor y su uso está en el orden de los 3 a 4 minutos, para compensar la presión de aire comprimido del sistema.

Figura 55

Consumo de corriente Plena Carga 20-12-2019 "San Rafael"

**Tabla 35**

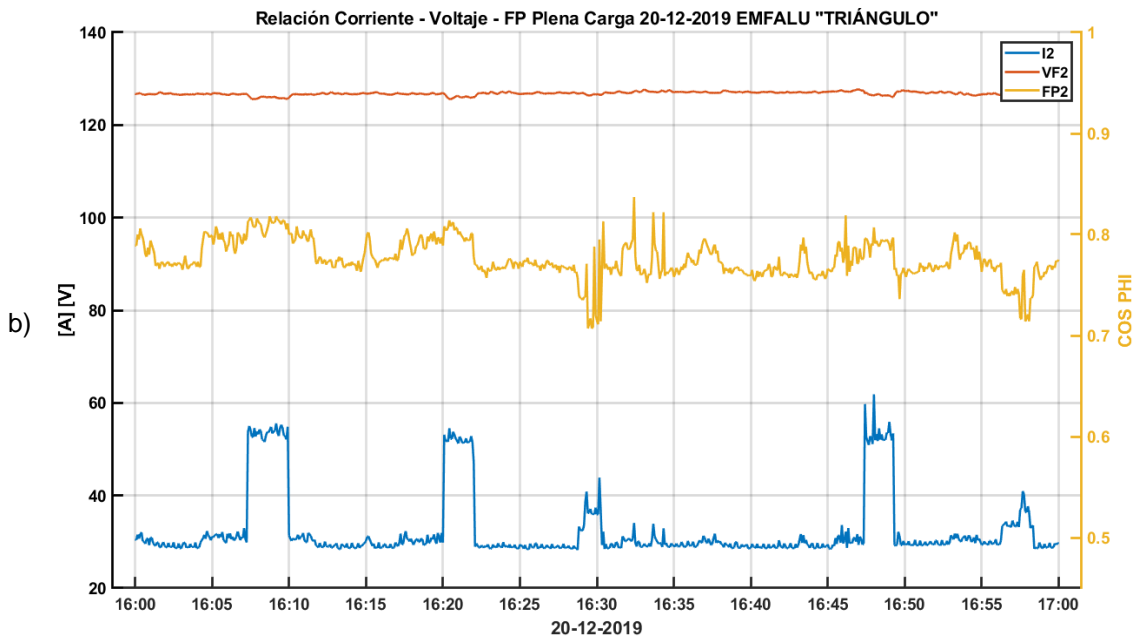
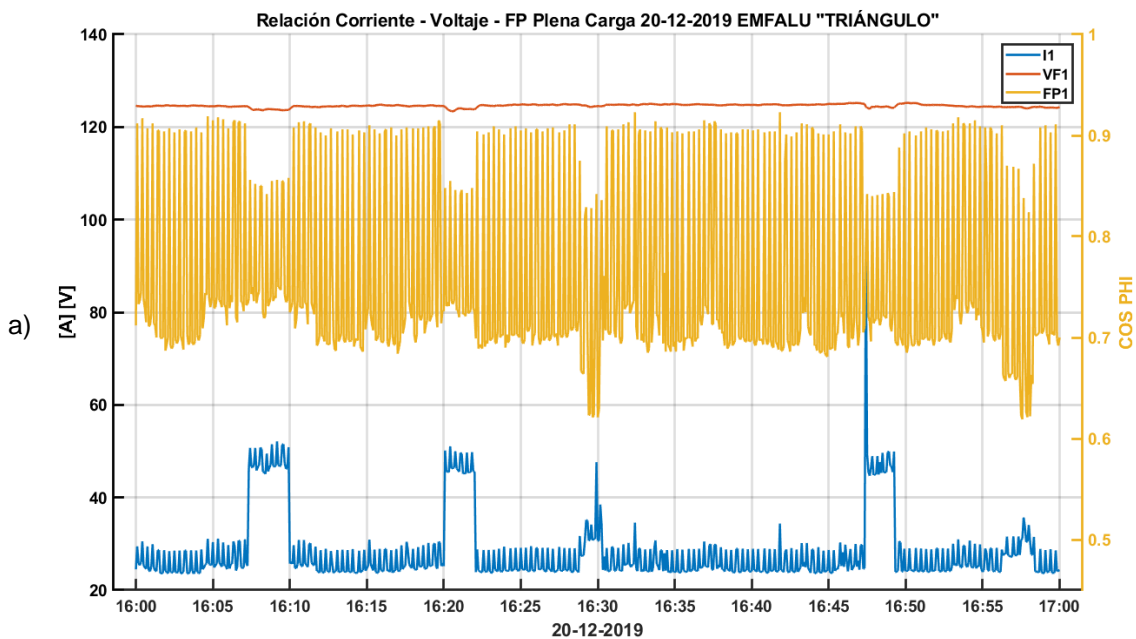
Consumo de corriente Plena Carga 20-12-2019 "San Rafael"

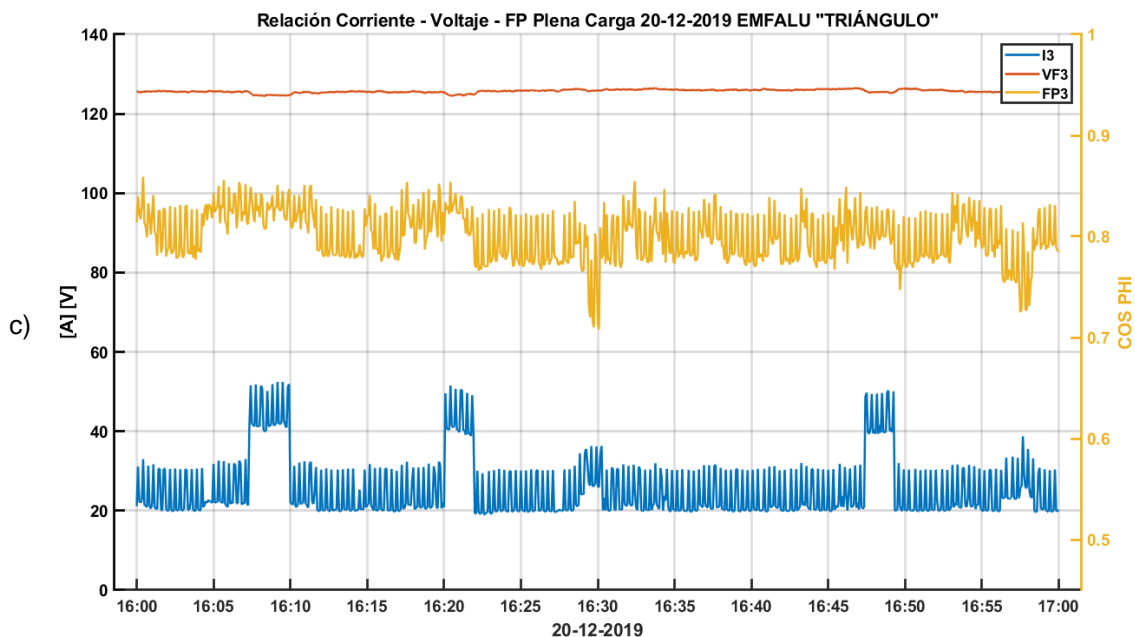
CONSUMO CORRIENTE - PLENA CARGA			
PARAM.	I1 [A]	I2 [A]	I3 [A]
Máximo	93,735	61,839	52,456
Mínimo	23,534	28,217	19,057
Media	28,498	32,573	25,761
Sigma	7,515	7,419	7,9

La relación que existe entre los valores de consumo de corriente, tensión y factor de potencia se pueden apreciar en la Figura 56.

Figura 56

Relación Corriente-Voltaje-FP 20-12-2019 "San Rafael", a) Fase 1, b) Fase 2, c) Fase 3

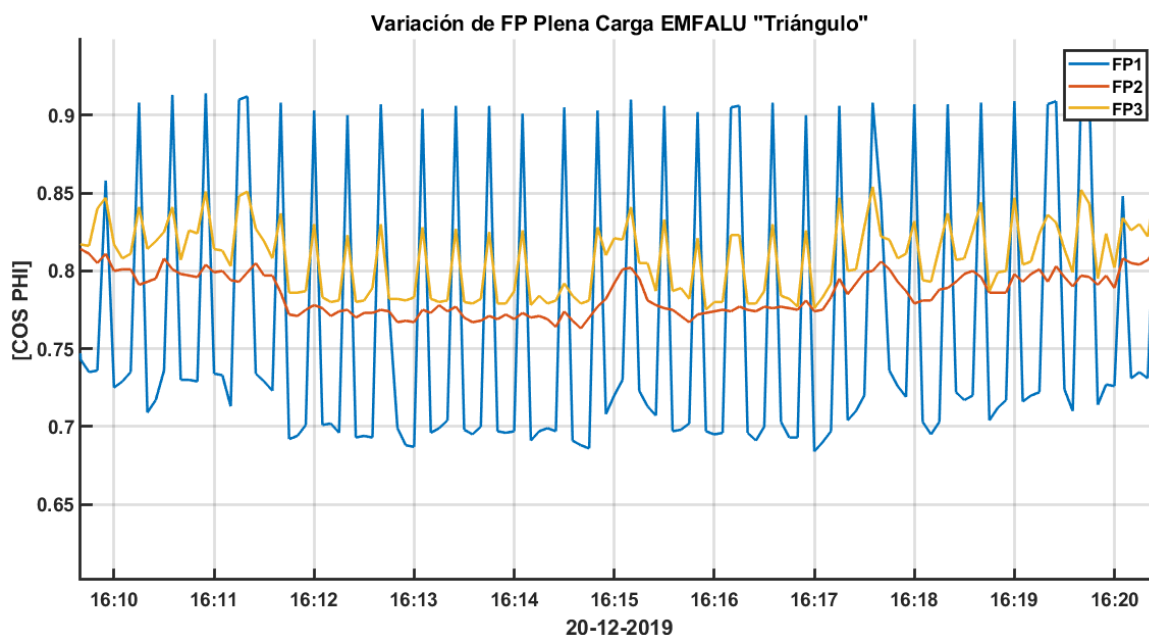




Los valores de factor de potencia están cercanos al mínimo permitido, los cambios se deben a los valores mostrados en la Tabla 2, teniendo en cuenta que la carga principal del local son motores trifásicos de inducción. Al realizar una ampliación en el periodo de variación de factor de potencia para analizar los cambios rápidos que tiene el valor de factor de potencia, en la Figura 57 se observa que la fase 1 tiene las variaciones más significativas, en el estudio de carga realizado se registra que los circuitos conectados en las cargas monofásicas de 1 y 2 fases son desde computadoras, lámparas, lo que infiere en el desbalance del sistema y el comportamiento de cada fase, si se tuviese un sistema equilibrado en las 3 fases las curvas de variación serían de los mismos valores, realizar esto en una industria es posible con mucho esfuerzo en la planificación de calidad de energía, con esto se determina con gran facilidad los valores necesarios para compensar la potencia reactiva, el objetivo de este análisis es identificar los fallos en la calidad de energía y las posibles soluciones para el consumo correcto que aporte a la disminución de coste en la facturación y evitar la multa por bajo factor de potencia.

Figura 57

Variación de FP Plena Carga 20-12-2019 "San Rafael"



En la Tabla 36 se puede apreciar los datos tabulados de la Figura 57 se nota que el valor medio, están entre 0,75 a 0,8, lo que significa que necesita un valor relativo de compensación, es decir depende de la cantidad de potencia activa de consumo.

Tabla 36

Variación de FP Plena Carga 20-12-2019 "San Rafael"

PARAM.	FP1	FP2	FP3
Máximo	0,923	0,837	0,859
Mínimo	0,619	0,707	0,708
Media	0,758	0,776	0,801
Sigma	0,088	0,019	0,026

Nota: Los datos representan la variación del FP en plena carga

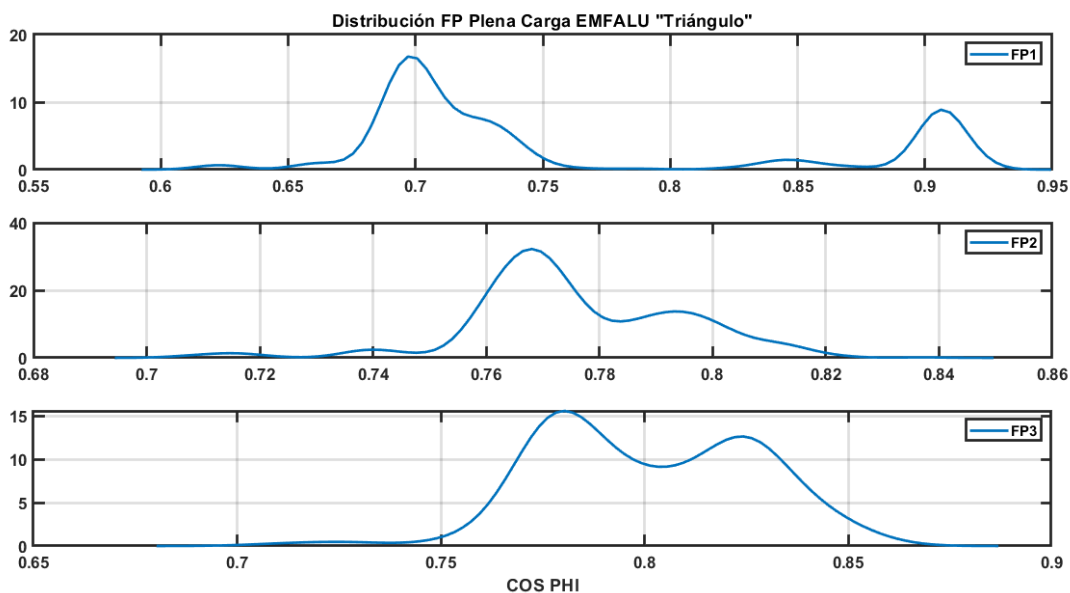
El consumo de potencia activa monofásica es de gran importancia debido a que esta potencia se mantiene constante con o sin compensación, los motores necesitan de potencia reactiva para crear campo magnético lo que causa un desfase entre los valores de voltaje y corriente, este desfase produce un uso ineficiente de la energía

entregada por la empresa pública de distribución, el banco de capacitores, es un generador de potencia reactiva, con esto se logra disminuir el desfase que producen las cargas inductivas, al realizar un análisis monofásico se tiene los datos necesarios para conocer qué fase necesita mayor o menor compensación, además del valor aproximado para tener un sistema óptimo.

El comportamiento de los datos medidos de factor de potencia se puede observar de mejor manera en la Figura 58 en donde se puede apreciar que gran cantidad de los datos medidos se encuentran de 0,7 a 0,8 en las 3 fases, existe una tendencia importante en la fase 1 con medidas cercanas a el mínimo permitido.

Figura 58

Valores medidos y repetibilidad de factor de potencia Plena Carga 20-12-2019 "San Rafael"



Los datos medidos de potencia activa y aparente se pueden observar en la Figura 59, es visible que las medias se encuentran equilibradas, estos datos se pueden entender de mejor manera en la Tabla 37, se obtiene valores de gran importancia, en la fase 1 existe un consumo máximo de 11302 [W], en este apartado a diferencia del

análisis en Baja Carga, es necesaria una compensación de importancia por parte del banco de capacitores.

Los datos de potencia reactiva necesario para compensar el sistema están en la Tabla 38, Tabla 39 Tabla 40, después de realizar los cálculos con las ecuaciones (2.5), (2.6) y (2.7), se da un valor de importancia en la compensación monofásica en la fase 1 de 5526,38 [VAR], lo que en análisis trifásico con cargas equilibradas muestra un valor real y comercial de banco de capacitores.

Figura 59

Potencia activa y aparente Plena Carga 20-12-2019 "San Rafael"

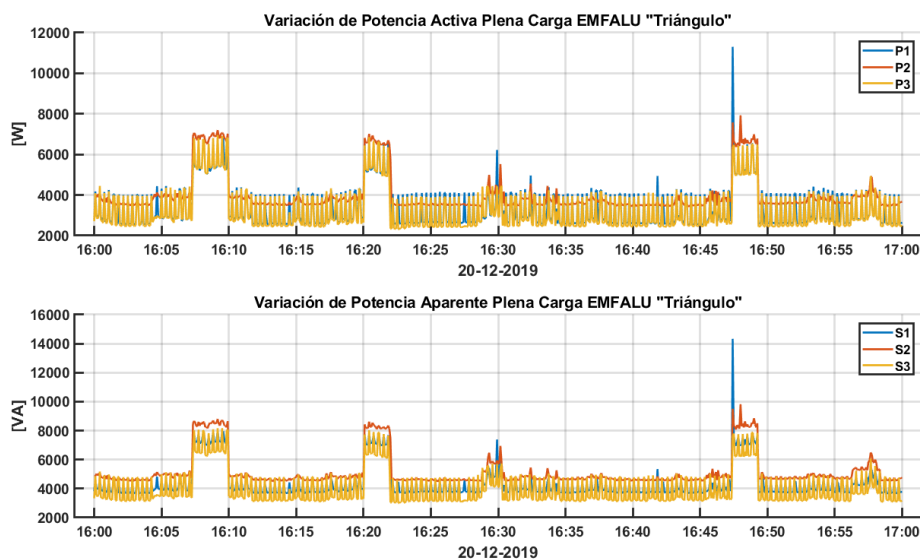


Tabla 37

Potencia activa y aparente Plena Carga 20-12-2019 "San Rafael"

VARIACIÓN POTENCIA ACTIVA Y APARENTE PLENA CARGA						
PARAM.	P1	P2	P3	S1	S2	S3
	[W]	[W]	[W]	[VA]	[VA]	[VA]
Máximo	11302	7930,2	6950,6	14338	9824,2	8174,8
Mínimo	2540,3	3409,9	2312,9	3665,6	4503,4	3003,2
Media	3391,75	4036,33	3266,97	4435,39	5190,27	4055,48
Sigma	1072,26	978,854	1068,43	1154,32	1165,23	1228,1

Tabla 38

Potencias objetivo y valor de Capacitor monofásico Fase 1 Plena Carga "San Rafael"

	P1 [W]	Q1 [VAR]	S1 [VA]	FP1 []	FP- Obj.	S-Obj. [VA]	Q-Obj. [VAR]	Q- Capacitor [VAR]
Máximo	11302	8822,8	14338	0,92	0,96	11772,9	3296,41	5526,38
Mínimo	2540,3	1825,3	3665,6	0,61	0,92	2761,19	1082,16	743,136
Media	3391,7	2777,19	4435,39	0,75	0,94	3608,24	1231,04	1546,14
Sigma	1072,2	799,53	1154,32	0,08	0,02			

Tabla 39

Potencias objetivo y valor de Capacitor monofásico Fase 2 Plena Carga "San Rafael"

	P2 [W]	Q2 [VAR]	S2 [VA]	FP2 []	FP- Obj.	S-Obj. [VA]	Q-Obj. [VAR]	Q- Capacitor [VAR]
Máximo	7930,2	5799	9824,2	0,88	0,96	8260,625	2312,975	3486,025
Mínimo	3409,9	2847,6	4503,4	0,78	0,92	3706,413	1452,611	1394,988
Media	4036,33	3258,66	5190,27	0,79	0,94	4293,968	1464,992	1793,667
Sigma	978,854	653,941	1165,23	0,00	0,02			

Tabla 40

Potencias objetivo y valor de Capacitor monofásico Fase 3 Plena Carga "San Rafael"

	P3 [W]	Q3 [VAR]	S3 [VA]	FP3 []	FP- Obj.	S-Obj. [VA]	Q-Obj. [VAR]	Q- Capacitor [VAR]
Máximo	6950,6	4430,2	8174,8	0,88	0,96	7240,208	2027,258	2402,94
Mínimo	2312,9	1858,8	3003,2	0,76	0,92	2514,021	985,291	873,508
Media	3266,97	2396,05	4055,48	0,78	0,94	3475,5	1185,751	1210,298
Sigma	1068,43	632,085	1228,15	0,03	0,02			

La compensación de potencia reactiva por parte del capacitor monofásico es descrita en la Figura 60, los parámetros calculados con un factor de potencia de 0,94 se muestran en la Tabla 41, en donde se puede apreciar valores medios de compensación de 1200 a 1500 [VAR], los cuales en análisis trifásico comprende una compensación importante hacia el sistema.

Figura 60

Compensación de capacitor Análisis monofásico Plena Carga 20-12-2019 "San Rafael"

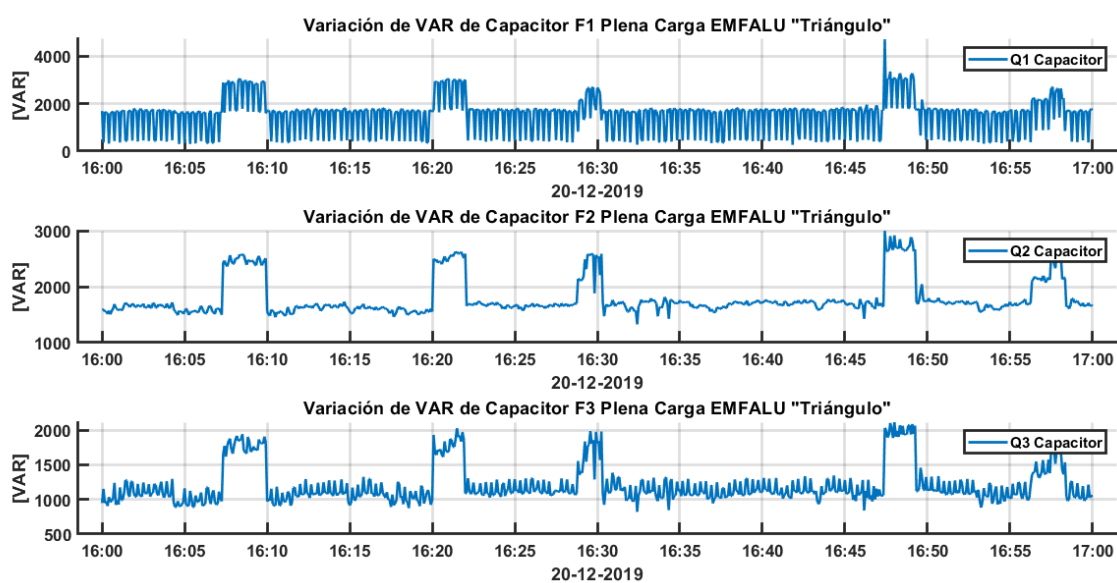


Tabla 41

Parámetros de Capacitor monofásico Plena Carga 20-12-2019 "San Rafael"

VARIACIÓN VAR CAPACITOR - PLENA CARGA			
	Q1	Q2	Q3
	[VAR]	[VAR]	[VAR]
Máximo	4720,7	3003,7	2113,3
Mínimo	265,918	1325,8	820,141
Media	1546,15	1793,67	1210,3
Sigma	717,202	325,552	275,734

El análisis realizado muestra la cantidad de potencia reactiva que necesita cada fase individual para tener un factor de potencia óptimo, visto desde un punto del mínimo

permitido y el valor máximo de consumo, así como la desviación y repetibilidad de los valores.

Las gráficas presentadas permiten definir el número de pasos, para la adquisición del controlador de potencia reactiva al realizar el análisis del sistema de control a implementar.

Análisis Trifásico

El sistema eléctrico de alimentación principal es de uso industrial para una red de 127/210 [V], el transformador de distribución de la empresa pública en su lado secundario tiene una configuración en estrella, es decir la tensión entre fases es de 210[V], y entre fase y neutro es de 127[V], como se menciona en la sección Sistema de distribución, Conexiones de los transformadores. La empresa muestra cargas desbalanceada como se puede observar en la Figura 32, para el local de “Sangolquí” y en la Figura 47 para el local “San Rafael”, al tener una configuración en estrella con circuitos monofásicos de 3 líneas (fase, neutro, tierra), monofásico de 4 líneas (2 fases, neutro, tierra) y trifásicos de 4 líneas (3 fases, tierra), se da un desbalance de consumo de corriente.

Los sistemas ideales para realizar compensación de potencia reactiva son sistemas con cargas equilibradas, para lo cual se usa bancos trifásicos que compensan la potencia reactiva de manera que las 3 fases puedan tener el mismo rendimiento. Al realizar el análisis monofásico se puede observar que cada una de las fases para los dos locales necesita de un valor diferente de compensación, esto debido a los circuitos monofásicos conectados a las diferentes fases, esto se puede observar en el estudio de carga realizado al inicio del capítulo.

Las posibles soluciones que se plantean para obtener un sistema óptimo de compensación son:

- Balancear las cargas monofásicas en el sistema trifásico, teniendo en cuenta que un equilibrio total es sumamente difícil de conseguir, por lo que se daría un equilibrio aproximado.
- Realizar un análisis de equilibrio matemático para conseguir los valores exactos de desbalance y llegar a un punto de equilibrio, se debe tomar en cuenta que los bancos de compensación son trifásicos y balanceados, es decir entregan la misma cantidad de potencia reactiva a las 3 fases, pero como se visualizó en el análisis monofásico cada una de las fases debe tener un valor específico de compensación.
- Observar el análisis monofásico realizado y obtener una media de compensación, tal que el mínimo valor y el máximo valor de compensación del banco puedan lograr que el factor de potencia en las 3 fases esté en el rango de 0,92 a 1

El último método se describe a continuación, realizando un análisis trifásico teniendo en cuenta la configuración del sistema trifásico conectado en estrella, por lo que se define el equilibrio según fase 1, 2 y 3, con esto se tiene el valor máximo, mínimo y el valor medio de compensación, se usa las siguientes ecuaciones para el análisis trifásico de los datos obtenidos con el analizador de red en los dos locales.

Para el cálculo de factor de potencia se usa la ecuación (2.7).

Se describen las ecuaciones que se utilizaron para el cálculo de potencia activa, reactiva y aparente monofásica y trifásica.

$$S_{mono} = V_f * I_f \quad (3.9)$$

Dónde:

S_{mono} = Potencia aparente monofásica

V_f = Voltaje entre fase y neutro

I_f = Corriente de fase

$$P_{mono} = S_{mono} * fp \quad (3.10)$$

Dónde:

P_{mono} = Potencia activa monofásica

$$Q_{mono} = \sqrt{S_{mono}^2 - P_{mono}^2} \quad (3.11)$$

Dónde:

Q_{mono} = Potencia reactiva monofásica

$$fp = \cos\phi \quad (3.12)$$

$$P_{trif} = 3 * V_f * I_f * \cos\phi \quad (3.13)$$

Dónde:

P_{trif} = Potencia activa trifásica

$$Q_{trif} = 3 * V_f * I_f * \sin\phi \quad (3.14)$$

Dónde:

Q_{trif} = Potencia reactiva trifásica

$$S_{trif} = 3 * V_f * I_f \quad (3.15)$$

Dónde:

S_{trif} = Potencia aparente trifásica

Para el cálculo del banco de capacitor de acuerdo al factor de potencia requerido, teniendo en cuenta que el valor de potencia activa es fijo, y los valores de factor de potencia requerida modifican los valores de potencia aparente y reactiva en el sistema.

$$S_{obj} = P * fp_{obj} \quad (3.16)$$

Dónde:

S_{obj} = Potencia aparente objetivo

$$Q_{obj} = \sqrt{S_{obj}^2 - P^2} \quad (3.17)$$

Dónde:

Q_{obj} = Potencia reactiva objetivo

$$Q_{cap} = Q_{obj} - Q_{trif} \quad (3.18)$$

Dónde:

Q_{cap} = Potencia reactiva del banco de capacitores

Local “Sangolquí”

Para realizar el análisis trifásico se toma en referencia a cada una de las fases como un sistema trifásico equilibrado y se da el uso de las ecuaciones (3.13), (3.14), (3.15), este análisis se realiza de esta manera a razón de:

- Los sistemas de compensación basados en banco de capacitores trifásicos, inyectan potencia reactiva en la misma cantidad a las tres fases
- Realizar los cálculos pertinentes para encontrar el valor medio que compense al sistema y el factor de potencia de las tres fases se encuentren en un valor entre 0,92 a 1.

Referencia a sistema equilibrado

A continuación, se describe la tabulación de valores calculados para cada uno de los valores de factor de potencia en monofásico (para observar el valor necesario de potencia reactiva que necesita cada fase) y trifásico para tener los valores máximos, mínimos y medios para mantener el valor de compensación en los puntos objetivos.

Para el análisis monofásico se tiene los siguientes datos tabulados:

Tabla 42

Parámetros de Potencia Reactiva Monofásica $f_p=0,92$ 10-12-2019 "Sangolquí"

POTENCIA REACTIVA CAPACITOR MONOFÁSICO $f_p=0,92$			
	Q1	Q2	Q3
	[VAR]	[VAR]	[VAR]
Máximo	1691,2	2128,3	3574,8
Mínimo	461,0203	423,5344	128,7153
Media	948,152	1239,85	1259,89
Sigma	285,833	336,058	476,13

Tabla 43

Parámetros de Potencia Reactiva Monofásica $f_p=0,94$ 10-12-2019 "Sangolquí"

POTENCIA REACTIVA CAPACITOR MONOFÁSICO $f_p=0,94$			
	Q1	Q2	Q3
	[VAR]	[VAR]	[VAR]
Máximo	1954,31	2369,03	4072,06
Mínimo	532,74	554,27	340,52
Media	1076,67	1376,56	1479,85
Sigma	336,623	376,835	475,967

Tabla 44

Parámetros de Potencia Reactiva Monofásica $f_p=0,96$ 10-12-2019 "Sangolquí"

POTENCIA REACTIVA CAPACITOR MONOFÁSICO $f_p=0,96$			
	Q1	Q2	Q3
	[VAR]	[VAR]	[VAR]
Máximo	2251,78	2641,22	4634,32
Mínimo	613,83	702,1	580,01
Media	1221,97	1531,14	1728,55
Sigma	396,123	425,092	484,1

Tabla 45

Parámetros de Potencia Reactiva Monofásica $f_p=0,98$ 10-12-2019 "Sangolquí"

POTENCIA REACTIVA CAPACITOR MONOFÁSICO $f_p=0,98$			
	Q1	Q2	Q3
	[VAR]	[VAR]	[VAR]
Máximo	2621,54	2982,13	5333,19

POTENCIA REACTIVA CAPACITOR MONOFÁSICO $f_p=0,98$			
	Q1	Q2	Q3
	[VAR]	[VAR]	[VAR]
Mínimo	705,47	885,84	877,689
Media	1402,59	1723,28	2037,69
Sigma	471,936	487,271	505,836

Tabla 46

Parámetros de Potencia Reactiva Monofásica $f_p=1$ 10-12-2019 "Sangolquí"

POTENCIA REACTIVA CAPACITOR MONOFÁSICO $f_p=1$			
	Q1	Q2	Q3
	[VAR]	[VAR]	[VAR]
Máximo	3470,69	3778,07	6934,78
Mínimo	909,99	1206,03	1428,23
Media	1816,5	2163,6	2746,13
Sigma	649,694	635,215	595,443

Se da como referencia el gráfico con los datos de un factor de potencia medio en este caso de 0,96, en la variación de la compensación de potencia reactiva en cada fase con un valor máximo en fase 3 de 4634,32 [VAR] y un mínimo de 580,01 [VAR]. Para el cálculo de potencia reactiva trifásica se usa las ecuaciones (3.14 - 3.18), con lo que se obtiene los valores máximos y mínimos para un sistema equilibrado. Para el análisis trifásico se tienen los siguientes datos tabulados:

Tabla 47

Parámetros de Potencia Reactiva Trifásica $fp=0,92$ 10-12-2019 "Sangolquí"

POTENCIA REACTIVA CAPACITOR TRIFÁSICO $fp=0,92$			
	Q1 [VAR]	Q2 [VAR]	Q3 [VAR]
Máximo	5073,6	6384,9	10724
Mínimo	1383,1	1270,6	386,1458
Media	2844,46	3719,55	3779,67
Sigma	857,499	1008,18	1428,39

En la Figura 62 se muestran los valores de compensación de potencia reactiva para un factor de potencia de 0,96 que necesita el sistema equilibrado a cada fase, con esto se puede identificar el máximo y mínimo valor para que se logre una compensación adecuada, ya que como se explicó, cada fase necesita de un valor específico de compensación.

Figura 61

Potencia Reactiva monofásica de Capacitor $fp=0,96$ 10-12-2019 "Sangolquí"

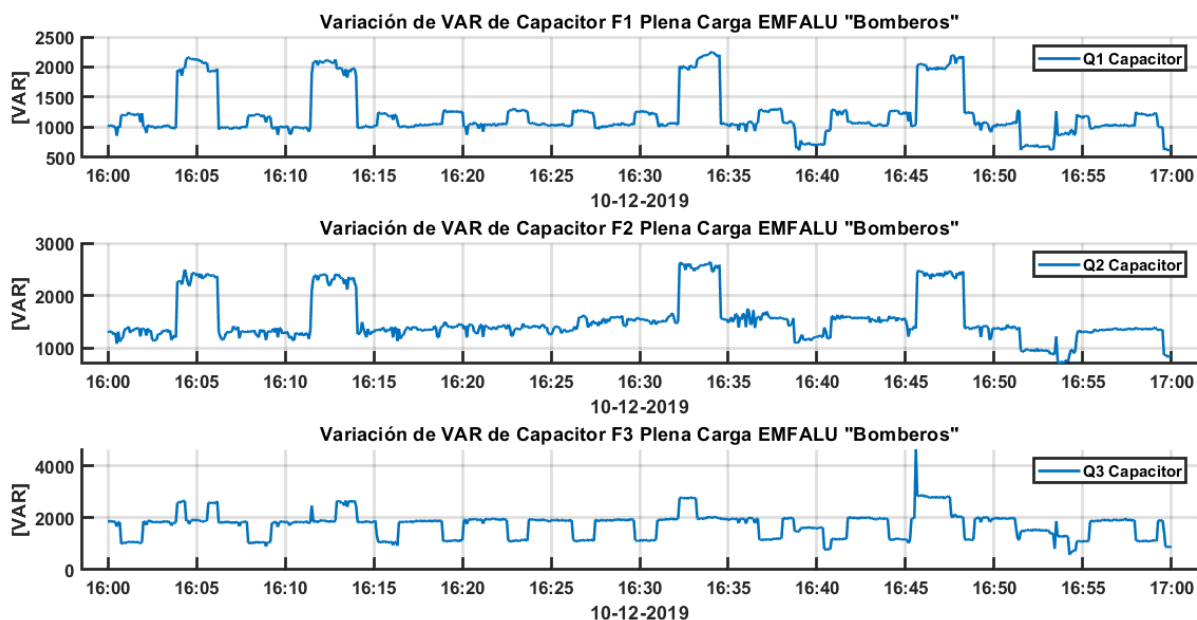


Tabla 48

Parámetros de Potencia Reactiva Trifásica $f_p=0,94$ 10-12-2019 "Sangolquí"

POTENCIA REACTIVA CAPACITOR TRIFÁSICO $f_p=0,94$			
	Q1	Q2	Q3
	[VAR]	[VAR]	[VAR]
Máximo	5862,92	7107,09	12216,2
Mínimo	1598,22	1662,82	1021,57
Media	3230	4129,69	4439,55
Sigma	1009,87	1130,51	1427,9

Tabla 49

Parámetros de Potencia Reactiva Trifásica $f_p=0,96$ 10-12-2019 "Sangolquí"

POTENCIA REACTIVA CAPACITOR TRIFÁSICO $f_p=0,96$			
	Q1	Q2	Q3
	[VAR]	[VAR]	[VAR]
Máximo	6755,34	7923,65	13902,95
Mínimo	1841,48	2106,29	1740,02
Media	3665,91	4593,42	5185,66
Sigma	1188,37	1275,28	1452,3

En la Figura 62 se muestran los valores de compensación de potencia reactiva para un factor de potencia de 0,96 que necesita el sistema equilibrado a cada fase, con esto se puede identificar el máximo y mínimo valor para que se logre una compensación adecuada, ya que como se explicó, cada fase necesita de un valor específico de compensación.

El máximo valor de potencia reactiva trifásica es para la fase 3 con un valor de 13902,95 [VAR] y un mínimo de 1740,02 [VAR]. Además, se puede identificar los pasos que necesita para tener los valores coherentes de compensación y no exista una sobre compensación del sistema, esto sucede cuando el factor de potencia pasa del valor de 1 y vuelve a descender a valores inferiores.

Tabla 50

Parámetros de Potencia Reactiva Trifásica $f_p=0,98$ 10-12-2019 "Sangolquí"

POTENCIA REACTIVA CAPACITOR TRIFÁSICO $f_p=0,98$			
	Q1	Q2	Q3
	[VAR]	[VAR]	[VAR]
Máximo	7864,62	8946,39	15999,59
Mínimo	2116,43	2657,52	2633,06
Media	4207,76	5169,84	6113,08
Sigma	1415,81	1461,81	1517,51

Tabla 51

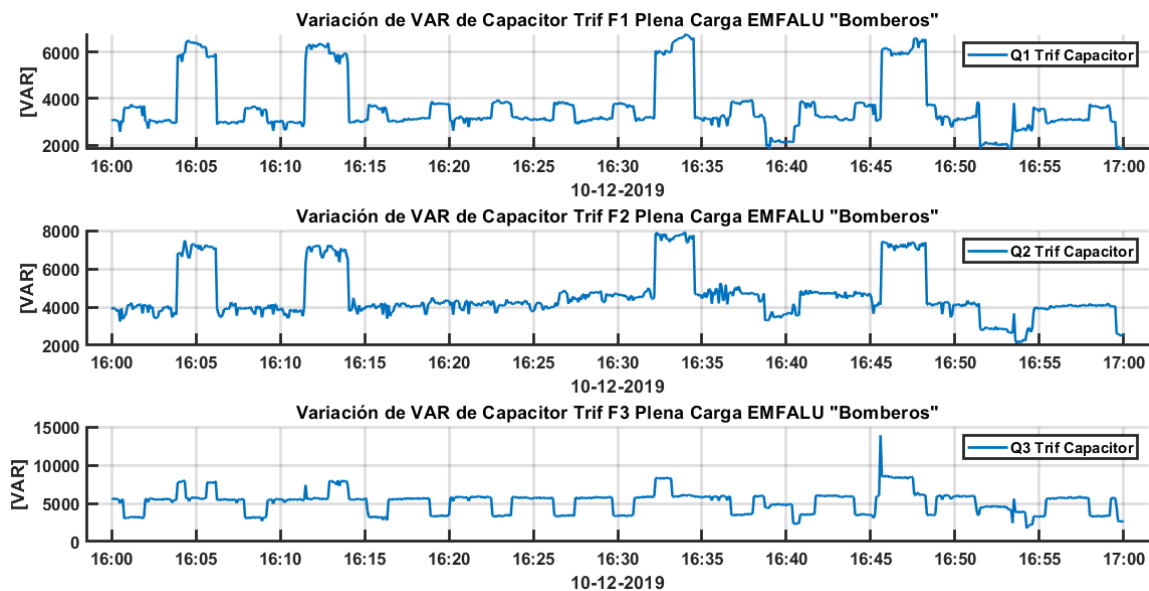
Parámetros de Potencia Reactiva Trifásica $f_p=1$ 10-12-2019 "Sangolquí"

POTENCIA REACTIVA CAPACITOR TRIFÁSICO $f_p=1$			
	Q1	Q2	Q3
	[VAR]	[VAR]	[VAR]
Máximo	10412,07	11334,21	20804,36
Mínimo	2729,98	3618,09	4284,68
Media	5449,5	6490,81	8238,4
Sigma	1949,08	1905,65	1786,33

Para tener una media de compensación se obtuvo el valor promedio en las tres fases, para tener un valor referencial del banco de capacitores desde un factor de potencia de 0,90 a un valor de 1, en la Tabla 52 los valores medios de potencia reactiva necesaria para tener un factor de potencia desde 0,9 a 1, se entiende que el banco de capacitores genera energía reactiva equilibrada para las tres fases, por tal motivo se miden los mínimos y máximos valores que cumplen con el objetivo, para tener un factor de potencia mínimo de 0.92 y evitar la multa y los cargos de consumo que esto conlleva.

Figura 62

Potencia Reactiva trifásica de Capacitor $fp=0,96$ 10-12-2019 "Sangolqui"

**Tabla 52**

Valores máximos y mínimos para la compensación de potencia reactiva en un sistema equilibrado

FP	MAX [VAR]	MIN [VAR]
0,9	6469,4	630,0365
0,92	7394,3	1013,3
0,94	8395,41	1427,53
0,96	9257,31	1895,93
0,98	10936,87	2469,01
1	14183,55	3544,25

Nota: Los valores representan la media de la potencia reactiva

Referencia a sistema no equilibrado

Para realizar el análisis se tiene en cuenta que no es un sistema equilibrado, por lo tanto, se da un análisis matemático con el uso de números complejos para la facilidad de obtención de los vectores, por la gran cantidad de datos a procesar, se da uso a las siguientes ecuaciones para realizar lo mencionado.

$$S_T = S_{f1} + S_{f2} + S_{f3} \quad (3.19)$$

Dónde:

S_T = Potencia aparente trifásica en un sistema no balanceado

S_{fa} = Potencia aparente en la fase a

$$P_T = P_{f1} + P_{f2} + P_{f3} \quad (3.20)$$

Dónde:

P_T : Potencia activa trifásica en un sistema no balanceado

P_{fa} : Potencia activa en la fase a

$$S_{f1} = P + Qi \quad (3.21)$$

Dónde:

S_{f1} : Potencia aparente compleja monofásica

Se desarrolla la ecuación (3.21) para obtener una ecuación que permita calcular el valor del vector de potencia reactiva para cumplir con las condiciones de compensación, se tiene:

$$S_m = V_f * I_f * \cos(\theta) + V_f I_f \text{sen}(\phi)i$$

$$P_m = V_f * I_f * \cos(\phi)$$

$$V_f * I_f = \frac{P_m}{\cos(\phi)}$$

$$S_m = P_m + \frac{P_m}{\cos(\phi)} \text{sen}(\phi)i$$

$$S_m = P_m + P_m \tan(\phi)i \quad (3.22)$$

Dónde:

P_m : potencia activa compleja monofásica

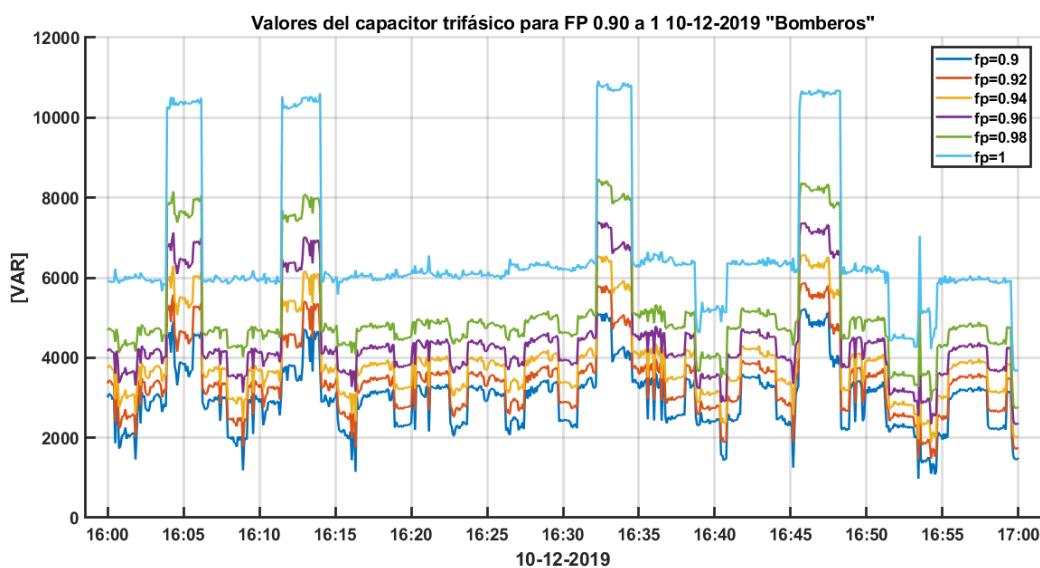
Con este procedimiento se logra obtener la potencia aparente monofásica, con la ecuación (3.19) la potencia aparente trifásica en un sistema no equilibrado. Con la ayuda de software matemático MATLAB se logra obtener el vector de potencia reactiva

necesaria para la compensación mediante el uso de la función *angle* (ángulo) para obtener el factor de potencia trifásica en un sistema no balanceado y la función *abs* (módulo) para obtener el módulo del vector que para la potencia reactiva del capacitor vendría a ser el valor exacto para la compensación según el valor requerido.

Como primer paso se obtiene los vectores en Plena Carga de la potencia compleja monofásica, se continua con la aplicación de la ecuación (3.19), se usa la función *angle* y *mod* para obtener factor de potencia y módulo de la potencia aparente compleja trifásica. Se aplica la ecuación (3.22) para un factor de potencia de 0,90 a 1 y se realiza de forma final la sustracción de la potencia objetivo de la potencia aparente compleja calculada para obtener los valores de compensación para cada valor de factor de potencia calculado. En la Figura 63 se visualiza las variaciones en cada uno de los valores de factor de potencia calculados en un sistema no equilibrado.

Figura 63

Valores de compensación de Potencia Reactiva en un sistema no equilibrado 10-12-2019 "Sangolquí"



Los parámetros clave para análisis de la gráfica se tabulan en la Tabla 53 en donde se da énfasis al factor de potencia de 0,96, ya que tiene los valores comerciales

para una correcta compensación con un máximo aproximado de 7500 [VAR] (3 pasos de 2.5 [kVAR]) y un valor mínimo aproximado de 2500 [VAR] (1 paso de 2.5 [kVAR]).

Tabla 53

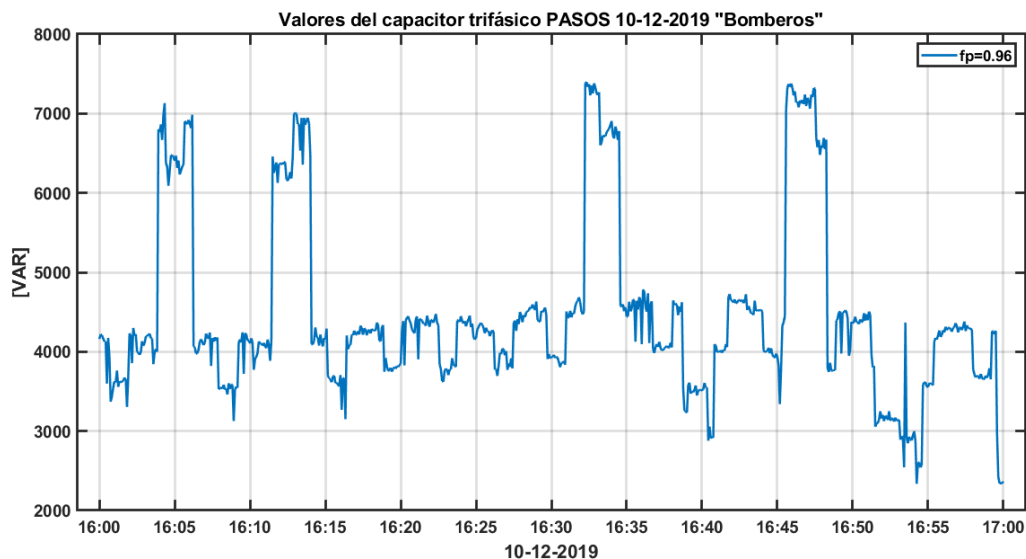
Parámetros de Compensación de Potencia Reactiva en un sistema no equilibrado 10-12-20129 “Sangolquí”

FP	POTENCIA DE CAPACITORES TRIFÁSICOS					
	0,9	0,92	0,94	0,96	0,98	1
Máximo	2999,05	5877,494	6581,23	7398,52	8468,738	10921,305
Mínimo	816,572	1449,164	1877,82	2336,52	2745,34	3667,709
Media	5226,47	3447,89	3933,08	4481,66	5163,56	6726,24
Sigma	974,224	895,874	999,024	1131,35	1311,66	1726,54

Para la identificación de pasos se realiza el análisis con un factor de potencia de 0,96, en la Figura 64 se visualiza de manera clara los pasos necesarios para la compensación, se observa que tiene 3 pasos en un aproximado de los valores de 3000 – 4200 y 7000 [VAR], los bancos de capacitores comerciales pueden dar pasos de 2500 [VAR].

Figura 64

Identificación de pasos para el controlador de Potencia Reactiva en un sistema no equilibrado 10-12-2019 "Sangolquí"



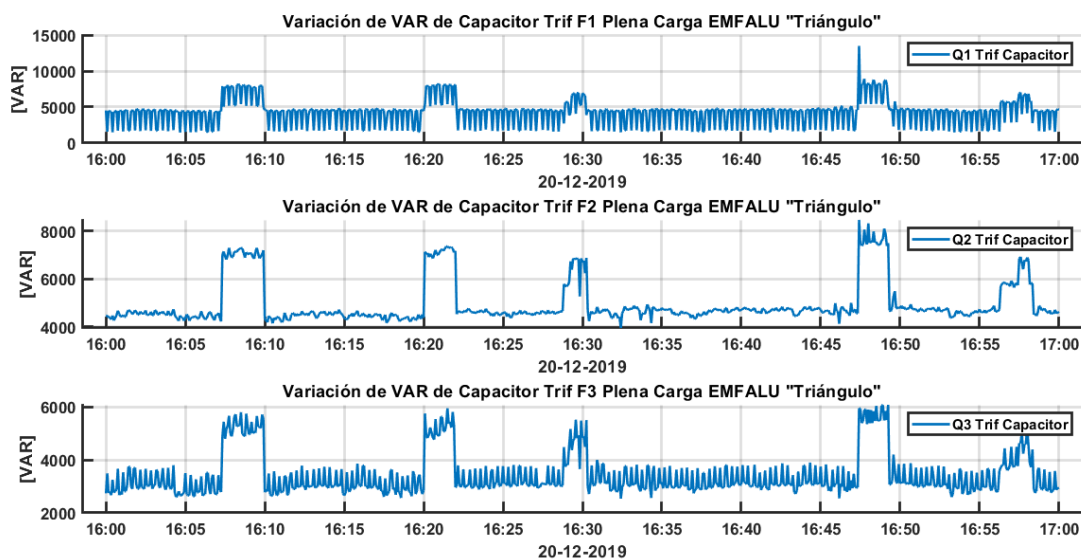
Local "San Rafael"

Referencia a sistema equilibrado

Siendo un análisis parecido en los dos locales se procede a mostrar solo los resultados establecidos, basados en el análisis del local "Sangolquí". En la Figura 65 se visualiza los valores de compensación de un sistema trifásico compensado como referencia a cada una de las fases, tiene un valor máximo aproximado de 15000 [VAR] en la fase 1, y un mínimo próximo a 1500 [VAR], para los casos de 0,90 a 1 se realizó el mismo cálculo y se obtuvo la Tabla 54 en donde se pueden observar las medias de un sistema equilibrado en su valor máximo y mínimo para tener una compensación del sistema en los valores de 0,92 a 1.

Figura 65

Potencia Reactiva trifásica de Capacitor $f_p=0,96$ 20-12-2019 "San Rafael"

**Tabla 54**

Valores máximos y mínimos para la compensación de potencia reactiva en un sistema equilibrado 20-12-2019 "San Rafael"

Fp	MAX [VAR]	MIN [VAR]
0,9	5615,55	674,69
0,92	6709,26	1275,09
0,94	7920,24	1922,82
0,96	9349,76	2647,708
0,98	11157,33	3482,209
1	15338,487	5221,487

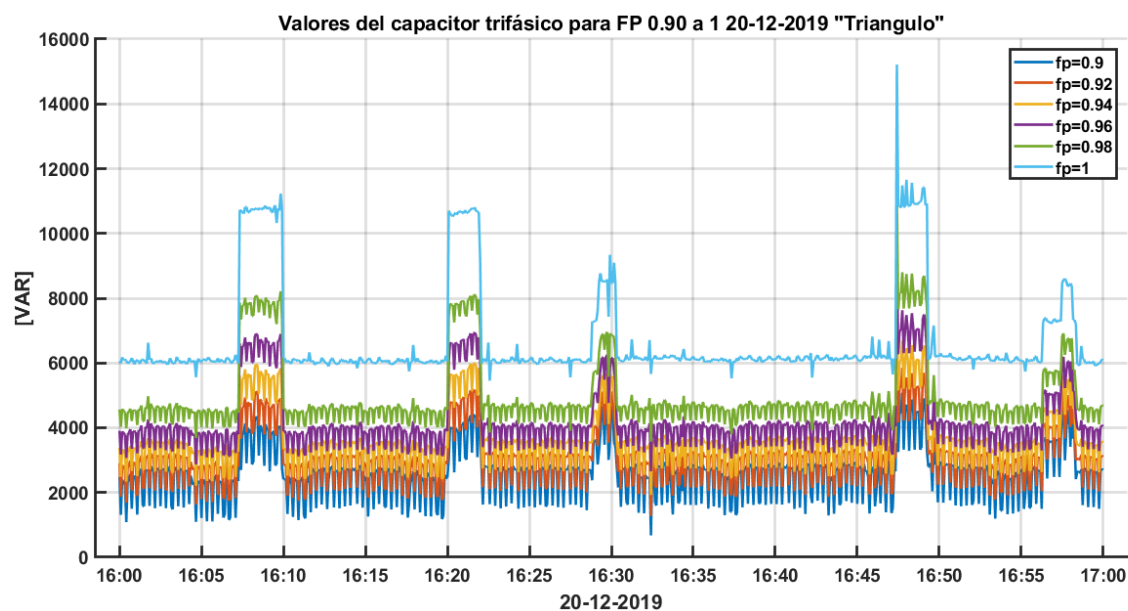
Nota: los valores presentados son la media de la potencia reactiva

Referencia a un sistema no equilibrado

Se realiza el mismo cálculo que en el local "Sangolquí", y se obtiene los valores de compensación para un factor de potencia de 0,9 a 1, como se puede observar en la Figura 66.

Figura 66

Valores de compensación de Potencia Reactiva en un sistema no equilibrado 20-12-2019 "San Rafael"



Los parámetros para el análisis y comprensión de la Figura 66 se tabulan en la Tabla 55 en donde se toma como referencia el factor de potencia de 0,96 ya que da un máximo de 9307,15 [VAR] dando una compensación aproximada de 4 pasos de 2.5 [kVAR] en el banco de compensadores, y un mínimo de 2657,94 [VAR] para una compensación aproximada de 1 paso de 2.5 [kVAR].

Para la identificación de pasos se realiza el análisis con un factor de potencia de 0,96, la Figura 67 muestra los pasos necesarios para la compensación, se observa que tiene 4 pasos en un aproximado de los valores de 3000 – 4200 – 5000 y 7200 [VAR], los bancos de capacitores comerciales pueden dar pasos de 2500 [VAR].

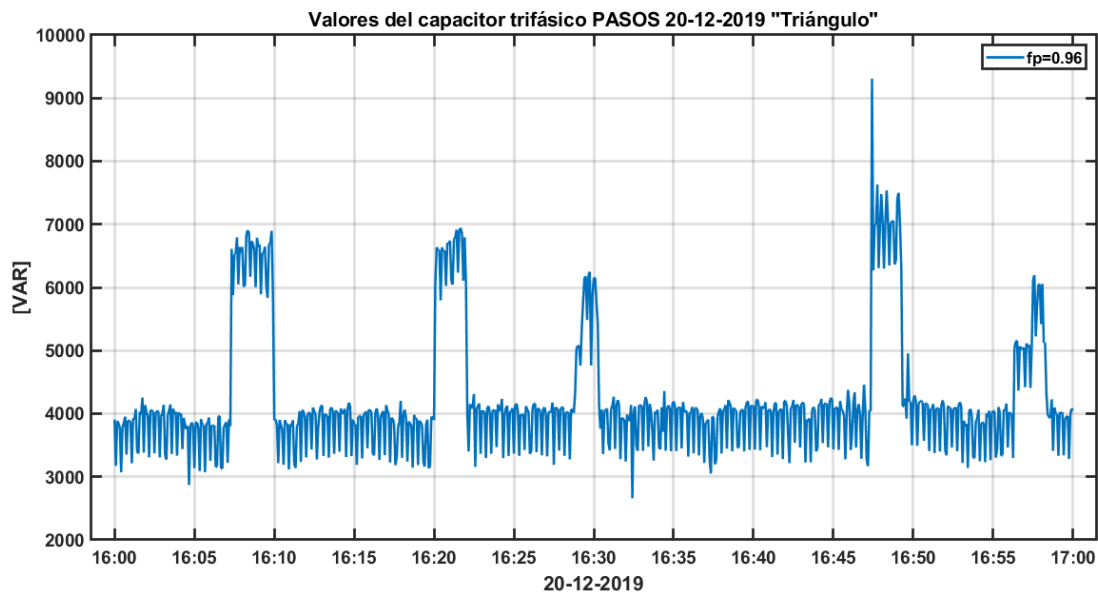
Tabla 55

Parámetros de Compensación de Potencia Reactiva en un sistema no equilibrado 20-12-2019 "San Rafael"

FP	POTENCIA DE CAPACITORES TRIFÁSICOS					
	0,9	0,92	0,94	0,96	0,98	1
Máximo	5404,529	6585,996	7863,13	9307,15	11102,082	15215,44
Mínimo	674,689	1275,094	1924,117	2657,94	3570,105	5452,59
Media	2593,38	3090,98	3628,87	4237,05	4993,02	6725,45
Sigma	785,159	826,877	894,231	992,38	1137,99	1529,87

Figura 67

Identificación de pasos para el controlador de Potencia Reactiva en un sistema no equilibrado 20-12-2019 "San Rafael"



Análisis de Facturación

Se realiza el análisis con el objetivo de encontrar un valor máximo de potencia reactiva que los compensadores deben generar en el sistema eléctrico en diferentes periodos (diario, mensual), se muestran datos desde el 26 de junio del 2018 al 24 de diciembre del 2019, para realizar un promedio estimado, este análisis es realizado para

el local “Sangolquí”, debido a que este tiene un medidor trifásico tipo industrial, que brinda los datos como factor de potencia, consumos del transformador en [kW], demanda máxima, potencia activa, reactiva y valor económico de la multa.

Tabla 56

Resumen de consumo de Potencia Activa desde 26-06-2018 a 24-12-2019 “Sangolquí”

[kW]							
DESDE	HASTA	ANTERIOR	ACTUAL	CONSUMO SUB	CONSUMO TRANSFORMADOR	CONSUMO TOTAL	DEMANDA MAX.
26/6/2018	25/7/2018	42447,8	43602,0	1154,20	23,08	1177,28	11,33
26/7/2018	27/8/2018	43602,0	44769,3	1167,30	23,35	1190,65	11,19
28/8/2018	25/9/2018	44769,3	45883,4	1114,10	22,28	1136,38	10,39
26/9/2018	26/10/2018	45883,4	46928,5	1045,10	20,90	1066,00	10,45
27/10/2018	26/11/2018	46928,5	47849,4	920,90	18,42	939,32	10,73
27/11/2018	26/12/2018	47849,4	48820,1	970,70	19,41	990,11	10,89
27/12/2018	25/1/2019	48820,1	49537,2	717,10	14,34	731,44	10,18
26/1/2019	23/2/2019	49537,2	50700,3	1163,10	23,26	1186,36	10,18
24/2/2019	25/3/2019	50700,3	51607,3	907,00	18,14	925,14	10,81
26/3/2019	25/4/2019	51607,3	52608,1	1000,80	20,02	1020,82	11,68
26/4/2019	25/5/2019	52608,1	53575,3	967,20	19,34	986,54	10,57
26/5/2019	25/6/2019	53575,30	54561,8	986,50	19,73	1006,23	10,88
26/6/2019	25/7/2019	54561,80	56,30	388,28	7,77	396,05	1,16
26/7/2019	26/8/2019	56,30	150,40	94,10	1,88	95,98	0,44
27/8/2019	25/9/2019	150,40	242,40	92,00	1,84	93,84	0,74
26/9/2019	25/10/2019	242,40	332,30	89,90	1,80	91,70	0,49
26/10/2019	26/11/2019	332,30	425,90	93,60	1,87	95,47	0,62
27/11/2019	24/12/2019	425,90	523,20	97,30	1,95	99,25	0,62

Nota: Estos valores fueron tomados en la franja horaria de: 7:00-18:00

Los medidores trifásicos tipo industrial (Landisgyr, 2012) realizan mediciones en tres franjas de horario en las 24 horas del día, siendo la franja A de 7 a 18 horas, la franja B de 18 a 22 horas y la franja C de 22 a 7 horas. En la Tabla 56 se muestra el consumo mensual, además de la demanda máxima, se tiene en cuenta que el horario en donde existe el periodo de Plena Carga se da en esta franja.

El dato de mayor relevancia es el consumo de potencia reactiva mensual, y el valor de factor de potencia promedio que registró el medidor, el compensador a diseñar debe tener la capacidad de generar la potencia reactiva suficiente para que el factor de potencia mejore.

Tabla 57

Datos de facturación medidos y calculados desde 06-2018 a 12-2019 "Sangolquí"

FECHA	HORARIO			POTENCIAS			FACTORES			
	A	B	C	REAC T.	ACT.	APAR.	FP CALC.	FP MEDIDO	BFP CALC	BFP MEDIDO
	7h a 18h [kW]	18h a 22h [kW]	22h a 7h [kW]	24h [kVA R]	24h [kW]	24h [kVA]	24h COS PHI	24h COS PHI	24h FACTO R	24h FACTOR
25/7/2018	1177,2	72,620	86,19	846,6	1336,0	1581,7	0,845	0,845	0,089	0,089
27/8/2018	1190,6	74,560	97,41	926,0	1362,6	1647,4	0,827	0,827	0,112	0,112
25/9/2018	1136,3	57,940	84,56	877,2	1278,8	1550,8	0,825	0,825	0,116	0,116
26/10/2018	1066,0	81,090	97,82	828,2	1244,9	1495,2	0,833	0,833	0,105	0,105
26/11/2018	939,32	76,910	95,78	745,6	1112,0	1338,8	0,831	0,831	0,108	0,108
26/12/2018	990,11	77,420	87,11	774,9	1154,6	1390,5	0,830	0,830	0,108	0,108
25/1/2019	731,44	57,220	88,33	575,4	876,99	1048,9	0,836	0,836	0,100	0,100
23/2/2019	1186,3	76,090	96,19	931,7	1358,6	1647,4	0,825	0,825	0,116	0,116
25/3/2019	925,14	54,570	93,74	695,7	1073,4	1279,1	0,839	0,839	0,096	0,096
25/4/2019	1020,8	76,190	84,05	783,4	1181,0	1417,2	0,833	0,833	0,104	0,104
25/5/2019	986,54	66,810	83,54	718,4	1136,8	1344,8	0,845	0,845	0,088	0,088
25/6/2019	1006,2	64,160	85,78	789,4	1156,1	1399,9	0,826	0,826	0,114	0,114
25/7/2019	396,05	126,09	547,3	697,6	1069,4	1276,8	0,838	0,838	0,098	0,098
26/8/2019	95,980	186,76	981,4	871,0	1264,1	1535,1	0,823	0,824	0,117	0,117
25/9/2019	93,840	238,58	998,7	956,3	1331,2	1639,0	0,812	0,812	0,133	0,137

FECHA	HORARIO			POTENCIAS				FACTORES		
	A	B	C	REAC T.	ACT.	APAR.	FP CALC.	FP MEDIDO	BFP CALC	BFP MEDIDO
	7h a 18h	18h a 22h	22h a 7h	24h	24h	24h	24h	24h	24h	24h
	[kW]	[kW]	[kW]	[kVA R]	[kW]	[kVA]	COS PHI	COS PHI	FACTO R	FACTOR
25/10/2019	91,700	252,45	906,8	876,1	1251,0	1527,2	0,819	0,819	0,123	0,123
26/11/2019	95,470	215,83	913,0	873,1	1224,3	1503,7	0,814	0,814	0,130	0,130
24/12/2019	99,250	228,17	970,5	942,3	1297,9	1603,9	0,809	0,809	0,137	0,137
					50	34				

Para obtener los datos de facturación tomados por el medidor de la empresa pública de distribución de energía (EEQ), se aplica las siguientes expresiones:

$$S_3 = \sqrt{P_3^2 + Q_3^2} \quad (3.23)$$

Dónde:

P_3 = potencia activa trifásica

Q_3 = potencia reactiva trifásica

S_3 = potencia aparente trifásica

$$\cos(\phi) = \frac{P_3}{S_3} \quad (3.24)$$

Dónde:

$\cos(\phi)$ = factor de potencia

$$\cos(\phi) B_{fp} = \frac{0,92}{\cos(\rho)} \quad (3.25)$$

Dónde:

B_{fp} = bajo factor de potencia

$$P = P_A + P_B + P_C \quad (3.26)$$

Dónde:

$P_{\#}$ = potencia en la franja #

A continuación, se detallan una serie de tablas (Tabla 58, Tabla 59, Tabla 60, Tabla 61)

las cuales concluyen en la potencia reactiva diaria y mensual que el sistema de

compensación debe generar para obtener un valor de factor de potencia de 0,92 (mínimo permitido) a un máximo de uno.

Tabla 58

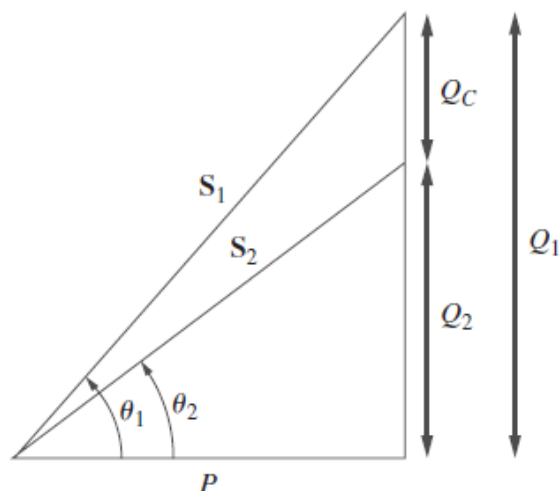
Resumen de consumo mensual desde 06-2018 a 12-2019 "Sangolquí"

FECHA	REACTIVA 0 a 24 [kVAR]	ACTIVA 0 a 24 [kW]	APARENTE 0 a 24 [kVA]	FP MEDIDO	ÁNGULO 1
25/7/2018	846,600	1336,090	1581,729	0,845	32,360
27/8/2018	926,000	1362,620	1647,486	0,827	34,198
25/9/2018	877,200	1278,880	1550,811	0,825	34,442
26/10/2018	828,200	1244,910	1495,231	0,833	33,633
26/11/2018	745,600	1112,010	1338,837	0,831	33,839
26/12/2018	774,900	1154,640	1390,562	0,830	33,870
25/1/2019	575,400	876,990	1048,903	0,836	33,269
23/2/2019	931,700	1358,640	1647,412	0,825	34,442
25/3/2019	695,700	1073,450	1279,177	0,839	32,944
25/4/2019	783,400	1181,060	1417,257	0,833	33,561
25/5/2019	718,400	1136,890	1344,848	0,845	32,285
25/6/2019	789,400	1156,170	1399,958	0,826	34,320
25/7/2019	697,600	1069,490	1276,893	0,838	33,112
26/8/2019	871,000	1264,180	1535,185	0,824	34,563
25/9/2019	956,300	1331,2	1639,08607	0,8122	35,688
25/10/2019	876,100	1251,03	1527,2941	0,8191	35,005
25/11/2019	873,100	1224,3	1503,73339	0,8142	35,492
24/12/2019	942,300	1297,95	1603,93376	0,8092	35,982

El análisis realizado se basa en la Figura 68, en donde se parte de un ángulo inicial que da valores específicos de potencia activa, reactiva y aparente además del factor de potencia que es el coseno de dicho ángulo según la ecuación (3.24).

Figura 68

Triángulo de potencia con ángulo θ_1 y θ_2



Para obtener el ángulo en grados teniendo como dato el factor de potencia se usa:

$$ANGULO = \frac{\text{acos}(fp) * 180}{\pi} \quad (3.27)$$

Dónde:

$ANGULO$ = es el valor en grados del ángulo que forman las potencias activa y aparente

$\text{acos}(fp)$ = al arco coseno del valor de factor de potencia

Para obtener el valor de potencia reactiva se usa:

$$Q = P * \tan (ANGULO) \quad (3.28)$$

Dónde:

$\tan (ANGULO)$ = la tangente del ángulo que forman las potencias activa y aparente

Para obtener el valor de la potencia aparente se usa la ecuación (3.23), y para obtener el valor de la potencia reactiva que necesita generar el sistema de compensación a diseñar se usa:

$$Q_{C1} = Q - Q_{ANGULO} \quad (3.29)$$

Dónde:

Q_C = Potencia reactiva que debe generar el sistema de compensación

Q_{ANGULO} = Potencia reactiva calculada necesaria para específico valor de factor de potencia

Tabla 59

Potencia reactiva necesaria para valor de factor de potencia de 0,9 a 1 desde 06-2018 a 12-2019 "Sangolqui"

FP 1	φ 1	FP 2	φ 2	FP 3	φ 3	FP 4	φ 4	FP 5	φ 5
0,92	23,073	0,94	19,948	0,96	16,260	0,98	11,478	1	0
Q	S	Q	S	Q	S	Q	S	Q	S
[kVAR]	[kVA]	[kVAR]	[kVA]	[kVAR]	[kVA]	[kVAR]	[kVA]	[kVAR]	[kVA]
569,17	1452,27	484,93	1421,37	389,69	1391,76	271,30	1363,35	0	1336,09
2	2	6	2	3	0	5	7	0	0
580,47	1481,10	494,56	1449,59	397,43	1419,39	276,69	1390,42	0	1362,62
4	9	5	6	1	6	2	9	0	0
544,80	1390,08	464,17	1360,51	373,00	1332,16	259,68	1304,98	0	1278,88
1	7	1	1	7	7	8	0	0	0
530,32	1353,16	451,84	1324,37	363,09	1296,78	252,79	1270,31	0	1244,91
9	3	2	2	9	1	0	6	0	0
473,71	1208,70	403,60	1182,98	324,33	1158,34	225,80	1134,70	0	1112,01
4	7	6	9	6	4	3	4	0	0
491,87	1255,04	419,07	1228,34	336,77	1202,75	234,46	1178,20	0	1154,64
5	3	8	0	0	0	0	4	0	0
373,59	953,250	318,30	932,968	255,78	913,531	178,08	894,888	0	876,990
6		5		9		0			
578,77	1476,78	493,12	1445,36	396,27	1415,25	275,88	1386,36	0	1358,64
8	3	0	2	0	0	4	7	0	0
457,28	1166,79	389,61	1141,96	313,09	1118,17	217,97	1095,35	0	1073,45
8	3	0	8	0	7	3	7	0	0
503,12	1283,76	428,66	1256,44	344,47	1230,27	239,82	1205,16	0	1181,06
9	1	8	7	6	1	4	3	0	0
484,31	1235,75	412,63	1209,45	331,59	1184,26	230,85	1160,09	0	1136,89
3	0	6	7	3	0	5	2	0	0
492,52	1256,70	419,63	1229,96	337,21	1204,34	234,77	1179,76	0	1156,17
6	7	4	8	6	4	0	5	0	0
455,60	1162,48	388,17	1137,75	311,93	1114,05	217,16	1091,31	0	1069,49
1	9	3	5	5	2	9	6	0	0
538,53	1374,10	458,83	1344,87	368,71	1316,85	256,70	1289,98	0	1264,18
8	9	6	2	9	4	3	0	0	0
567,08	1446,95	483,16	1416,17	388,26	1386,66	270,31	1358,36	0	1331,20
9	7	1	0	7	7	2	7	0	0
532,93	1359,81	454,06	1330,88	364,88	1303,15	254,03	1276,56	0	1251,03
7	5	3	3	4	6	2	1	0	0
521,55	1330,76	444,36	1302,44	357,08	1275,31	248,60	1249,28	0	1224,30
0	1	2	7	8	3	5	6	0	0
552,92	1410,81	471,09	1380,79	378,56	1352,03	263,56	1324,43	0	1297,95
4	5	3	8	9	1	0	9	0	0

Tabla 60

Potencia reactiva que debe generar mensualmente el sistema de compensación desde 06-2018 a 12-2019 "Sangolquí"

Fecha	[kVAR]				
	0,92	0,94	0,96	0,98	1
25/7/2018	277,428	361,664	456,907	575,295	846,600
27/8/2018	345,526	431,435	528,569	649,308	926,000
25/9/2018	332,399	413,029	504,193	617,512	877,200
26/10/2018	297,871	376,358	465,101	575,410	828,200
26/11/2018	271,886	341,994	421,264	519,797	745,600
26/12/2018	283,025	355,822	438,130	540,440	774,900
25/1/2019	201,804	257,095	319,611	397,320	575,400
23/2/2019	352,922	438,580	535,430	655,816	931,700
25/3/2019	238,412	306,090	382,610	477,727	695,700
25/4/2019	280,271	354,732	438,924	543,576	783,400
25/5/2019	234,087	305,764	386,807	487,545	718,400
25/6/2019	296,874	369,766	452,184	554,630	789,400
25/7/2019	241,999	309,427	385,665	480,431	697,600
26/8/2019	332,462	412,164	502,281	614,297	871,000
25/9/2019	389,211	473,139	568,033	685,988	956,300
25/10/2019	343,163	422,037	511,216	622,068	876,100
25/11/2019	351,550	428,738	516,013	624,495	873,100
24/12/2019	389,376	471,207	563,731	678,740	942,300

Nota: Esta tabla representa los reactivos mensuales

Para calcular el valor de potencia reactiva que debe generar el sistema de compensación se divide el valor mensual para 20, ya que la empresa trabaja en horario de lunes a viernes en su máxima capacidad.

$$Q_{Cdia} = \frac{Q_{Cmes}}{20} \quad (3.30)$$

Dónde:

Q_{Cdia} = Potencia reactiva trifásica del compensador en un día.

Q_{Cmes} = Potencia reactiva trifásica del compensador en un mes.

Tabla 61

Potencia reactiva que debe generar diariamente el sistema de compensación desde 06-2018 a 12-2019 “Sangolquí”

Fecha	[kVAR]				
	0,92	0,94	0,96	0,98	1
25/7/2018	13,871	18,083	22,845	28,765	42,330
27/8/2018	17,276	21,572	26,428	32,465	46,300
25/9/2018	16,620	20,651	25,210	30,876	43,860
26/10/2018	14,894	18,818	23,255	28,771	41,410
26/11/2018	13,594	17,100	21,063	25,990	37,280
26/12/2018	14,151	17,791	21,907	27,022	38,745
25/1/2019	10,090	12,855	15,981	19,866	28,770
23/2/2019	17,646	21,929	26,771	32,791	46,585
25/3/2019	11,921	15,304	19,131	23,886	34,785
25/4/2019	14,014	17,737	21,946	27,179	39,170
25/5/2019	11,704	15,288	19,340	24,377	35,920
25/6/2019	14,844	18,488	22,609	27,731	39,470
25/7/2019	12,100	15,471	19,283	24,022	34,880
26/8/2019	16,623	20,608	25,114	30,715	43,550
25/9/2019	19,461	23,657	28,402	34,299	47,815
25/10/2019	17,158	21,102	25,561	31,103	43,805
25/11/2019	17,578	21,437	25,801	31,225	43,655
24/12/2019	19,469	23,560	28,187	33,937	47,115

Nota: Esta tabla representa los reactivos día para los 20 días laborados

Capítulo IV

Diseño e implementación del sistema de control automático y supervisión

Análisis de datos obtenidos en el estudio de carga

La obtención de datos de la red eléctrica de la empresa EMFALU Cía. Ltda. En sus dos locales: “Sangolquí” y “San Rafael” fueron analizados para su comprensión de manera gráfica y tabulada, dispuestos en tres tipos de análisis:

- monofásico
- trifásico a un sistema equilibrado
- trifásico a un sistema no equilibrado

Análisis monofásico

El objetivo de este análisis fue identificar el consumo de potencia de cada fase en el sistema trifásico, teniendo como principales observaciones:

- El sistema no es equilibrado, tanto el consumo de potencia activa y reactiva no son proporcionales en las tres fases, sino que cada una de ellas presenta un factor de potencia y consumo de corriente diferente, las figuras están referenciadas en la Tabla 62, los datos de variación se resumen en la Tabla 63
- La tensión en valores admisibles es igual en las tres fases, esto se puede observar en la Figura 33 para el local de “Sangolquí” y en la Figura 48 para el local “San Rafael”.

Tabla 62*Figuras de Variación de corriente y factor de potencia*

	Sangolquí		San Rafael	
	FP	Corriente [A]	FP	Corriente [A]
Baja Carga	Figura 36	Figura 32	Figura 51	Figura 49
Plena Carga	Figura 43	Figura 41	Figura 57	Figura 55

Tabla 63*Valores medios de variación de corriente y FP para análisis monofásico*

		Sangolquí			San Rafael		
		F1	F2	F3	F1	F2	F3
Baja carga	Corriente [A]	4,88	6,96	16,44	5,5	4,83	3,2
	FP	0,58	0,656	0,686	0,9	0,79	0,789
Plena carga	Corriente [A]	21,66	24,27	35,63	28,49	32,57	25,76
	FP	0,734	0,701	0,777	0,75	0,77	0,8

- El propósito es observar la variación máxima y mínima de potencia reactiva que necesita cada fase para que el factor de potencia varíe entre 0,92 y 1. Se puede observar estos datos de mejor manera en la Tabla 23, Tabla 24, y Tabla 25 para el local “Sangolquí” y la Tabla 38, Tabla 39, Tabla 40 para el local “San Rafael”. El resumen de los valores de potencia reactiva generada por fase se muestra en la Tabla 64

Tabla 64*Potencia reactiva generada por fase, análisis monofásico*

	Q CAP [VAR]		
	F1	F2	F3
0,92	602,36	921,709	779,433
0,94	1345,82	1720,698	1849,816

	Q CAP [VAR]		
	F1	F2	F3
0,96	2714,89	3084,745	5792,9

Análisis trifásico a un sistema equilibrado

El objetivo de este análisis se da en razón de que los bancos de capacitores para la corrección de factor de potencia en un sistema trifásico, generan potencia reactiva equilibrada para las 3 fases del sistema, es decir su objetivo es actuar para mejorar el factor de potencia en cargas equilibradas, pero como se observó en el apartado Análisis monofásico, la carga del sistema no es equilibrada, debido a:

- Los circuitos monofásicos de iluminación para oficinas, bodega y galpón
- Los circuitos monofásicos de fuerza para oficinas, bodega y galpón.

Esto causa que exista un desequilibrio en el consumo de corriente de las tres fases y generen un factor de potencia diferente.

Realizando este análisis se tiene las siguientes observaciones:

- Teniendo en cuenta que los bancos de capacitores generar potencia reactiva equilibrada en las 3 fases, se necesita saber el valor mínimo y máximo de compensación si se hace referencia a un sistema equilibrado en cada fase para de esta manera tener un valor medio de compensación que permita que el factor de potencia trifásico este entre 0,92 y 1, ver la Figura 62 para el local de “Sangolquí” y en la Figura 65 para el local de “San Rafael”
- Los valores máximos y mínimos para un factor de potencia de 0,92 a 1 se pueden observar en la Tabla 52, para el local de “Sangolquí” y en la Tabla 54 para el local de “San Rafael”, el resumen de datos se puede observar en la Tabla 65, en donde para un factor de potencia de 0.98 se establece la potencia reactiva promedio de 10 [kVAR].

Tabla 65

Potencia reactiva trifásica generada en un sistema equilibrado

FP	Q Capacitor			
	Sangolquí		San Rafael	
	Máximo [VAR]	Mínimo [VAR]	Máximo [VAR]	Mínimo [VAR]
0,9	6469,4	630,0365	5615,55	674,69
0,92	7394,3	1013,3	6709,26	1275,09
0,94	8395,41	1427,53	7920,24	1922,82
0,96	9257,31	1895,93	9349,76	2647,708
0,98	10936,87	2469,01	11157,33	3482,209
1	14183,55	3544,25	15338,487	5221,487

Análisis trifásico a un sistema no equilibrado

Este análisis es el más cercano a lo real ya que se tiene un sistema no equilibrado, la potencia trifásica es la suma de las potencias monofásicas y se realizó un análisis con números complejos como se observa en el apartado Referencia a sistema no equilibrado para el local de “Sangolquí” y en el apartado Referencia a un sistema no equilibrado para el local de “San Rafael”.

De este análisis se tiene las siguientes observaciones:

- Se calcula un valor de compensación que mejore el factor de potencia trifásico sin depender de la cantidad de potencia reactiva requerida en cada línea.
- La media tiene un parentesco a los valores de un sistema equilibrado, tomando en cuenta que el factor de potencia debe estar entre 0,92 y 1.
- Estos valores se pueden observar de mejor manera en la Figura 63, para el local de “Sangolquí” y en la Figura 66 para el local de “San Rafael”
- Los datos máximos y mínimo se pueden observar en la Tabla 53 para el local de “Sangolquí” y en la Tabla 55 para el local de “San Rafael”, los datos resumidos se muestran en la Tabla 66

Tabla 66*Potencia reactiva generada en un sistema no equilibrado*

Q Capacitores					
Sangolquí					
	0,92	0,94	0,96	0,98	1
Máximo	5877,494	6581,23	7398,52	8468,738	10921,305
Mínimo	1449,164	1877,82	2336,52	2745,34	3667,709
Medio	3447,89	3933,08	4481,66	5163,56	6726,24
San Rafael					
Máximo	6585,996	7863,13	9307,15	11102,082	15215,44
Mínimo	1275,094	1924,117	2657,94	3570,105	5452,59
Medio	3090,98	3628,87	4237,05	4993,02	6725,45

Otro análisis tomado en cuenta es con los datos de facturación, se tiene datos para el medidor tipo Industrial del local de “Sangolquí” ya que en el local de “San Rafael” tiene un medidor comercial que no da los datos necesarios para el análisis.

De este análisis se puede observar que:

- Se tiene un valor de potencia reactiva que el banco de capacitores debe generar en un mes, se puede observar en la Tabla 60.
- La empresa trabaja de lunes a viernes en horario de 8 de la mañana a 6 de la tarde, los sábados se trabaja cuando es necesario, por lo que el cálculo de potencia reactiva necesario de manera diaria se hace para 20 días laborables estos datos se pueden ver en la Tabla 61.

Con estos datos se procede a realizar una simulación con datos comerciales de bancos de capacitores.

Parametrización e identificación de variables que intervienen en el diseño automático

Selección de componentes del sistema automático

El sistema automático para mejorar el factor de potencia en la empresa EMFALU Cía. Ltda., debe cumplir las siguientes características:

- Los parámetros eléctricos de entrada deben ser medidos con transformadores de corriente y tensión, dimensionados de acuerdo a los valores medidos en la toma de datos.
- Las señales enviadas por los sensores ingresan a un controlador dedicado de energía reactiva, el cual controla la activación sincronizada de relés que a su vez conectan a los actuadores.
- Los actuadores para el sistema son bancos de capacitores trifásicos dimensionados en valores de 2.5" [kVAR]. Por el análisis de la Figura 64, se muestra las variaciones de potencia reactiva generada por los actuadores, se observa que existen 4 niveles en donde se establece un factor de potencia de 0.96 según la generación de potencia reactiva, se pueden observar los valores medios en la Tabla 67.

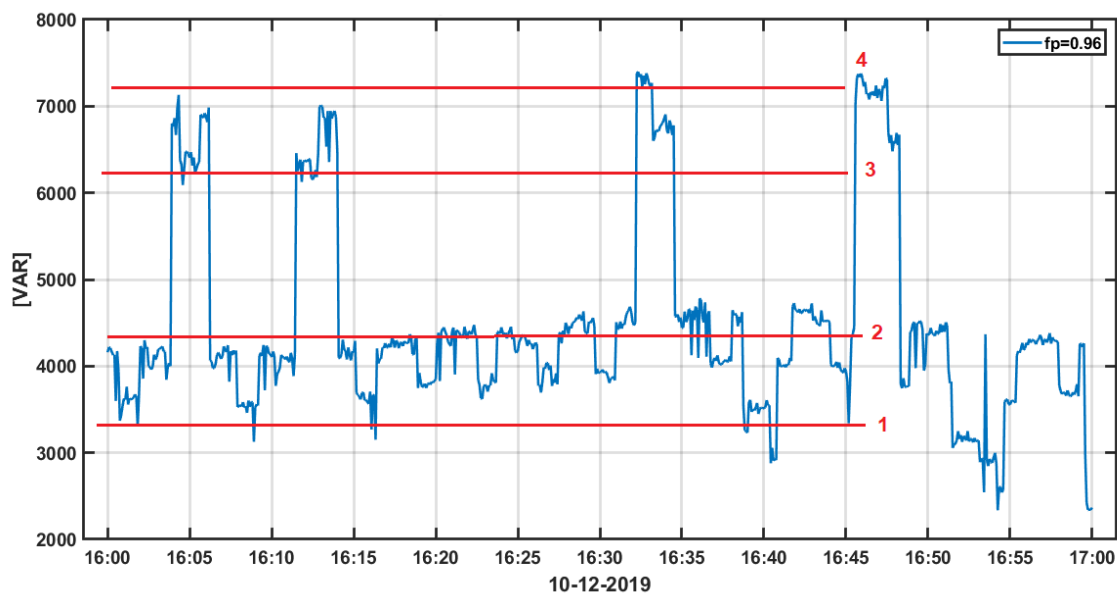
Tabla 67

Valores de potencia reactiva a generar, valores calculados y comerciales

PASOS ACTIVOS	PASOS DE Q CAP.	
	CALCULADO [VAR]	COMERCIAL [VAR]
1	3000	2500
2	4500	5000
3	6500	7500
4	7500	10000

Figura 69

Identificación de pasos según la generación de potencia reactiva

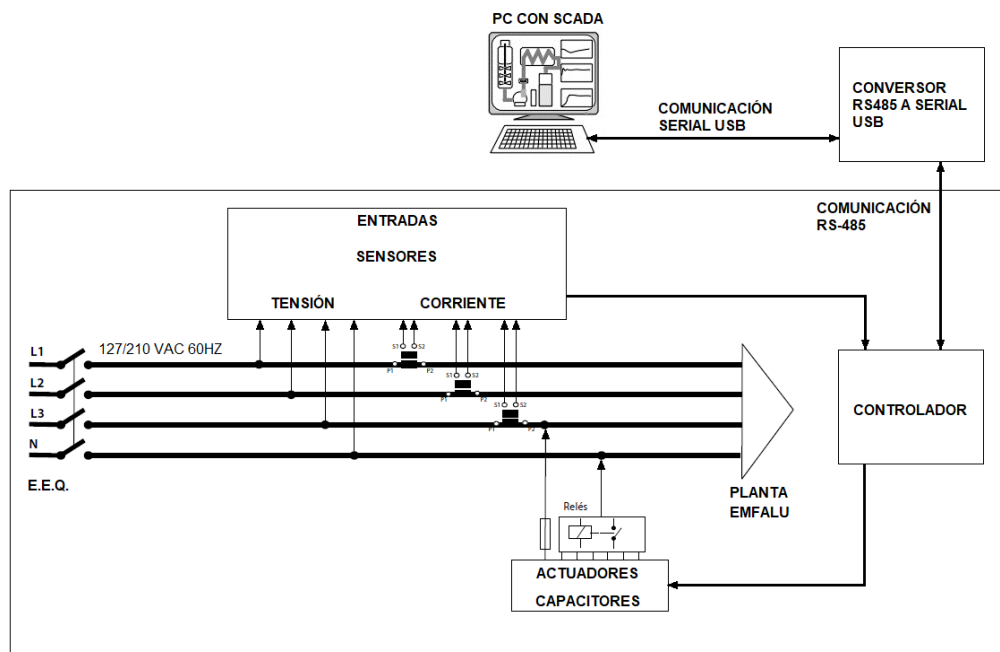


- El sistema debe establecer una comunicación entre el controlador y la administración de la empresa, por lo que es indispensable diseñar el sistema con un controlador que disponga de esa ventaja.
- Los actuadores deben ser protegidos calculando la corriente de arranque de los bancos de capacitores y su corriente de cortocircuito.
- Los elementos que componen el sistema deben estar implementado cumpliendo con la normativa específica para instalaciones de bancos de capacitores. (IEC 61000, 2018)

Teniendo en cuenta estas especificaciones se establece un diagrama general en donde se identifica cada parte del sistema el cual se puede observar en la Figura 70, el cálculo de diseño de cada elemento se especifica en los siguientes items.

Figura 70

Diagrama general del sistema automático a implementar en la empresa EMFALU Cía. Ltda.



Selección de los sensores

Para el local de “Sangolquí” se establece un consumo máximo de 83.137 [A], según la Tabla 20, los sensores son transformadores que reducen las señales de tensión y corriente a valores estandarizados con el objetivo de poder conectarlas a instrumentos de medida o a controladores. Se requiere:

- Lectura de señales de tensión y corriente de las 3 fases y el neutro
- Señales estandarizadas hacia el controlador de hasta 240 [VCA] para tensión, y de 5[A] para corriente.
- La relación de transformación mínima comercial para este sistema es de 100 [A] a 5 [A]

- En base a la relación de transformación se debe disponer de tres transformadores de corriente con una relación mínima de:

$$n = \frac{100}{5} = 20$$

Figura 71

Transformador de corriente 100:5 [A]



El sensor seleccionado es:

- Transformador de corriente CAMSCO 100:5 [A], tipo anillo

Selección del controlador

Para seleccionar el controlador a emplear se indagó sobre las marcas presentes en el mercado, y las prestaciones que cada uno ofrecía, se buscó controladores que posean las siguientes características primordiales como: conexión de tipo trifásica, puerto de comunicación y número de salidas mayor que cuatro esto dado al estudio realizado en Local “Sangolquí” donde se determinó que los reactivos necesarios para realizar la compensación es de 10Kvar y esto se logra con cuatro pasos de 2.5kVAR, la Tabla 68 resumen las características principales de los equipos que cumplen con las características mencionadas.

Tabla 68

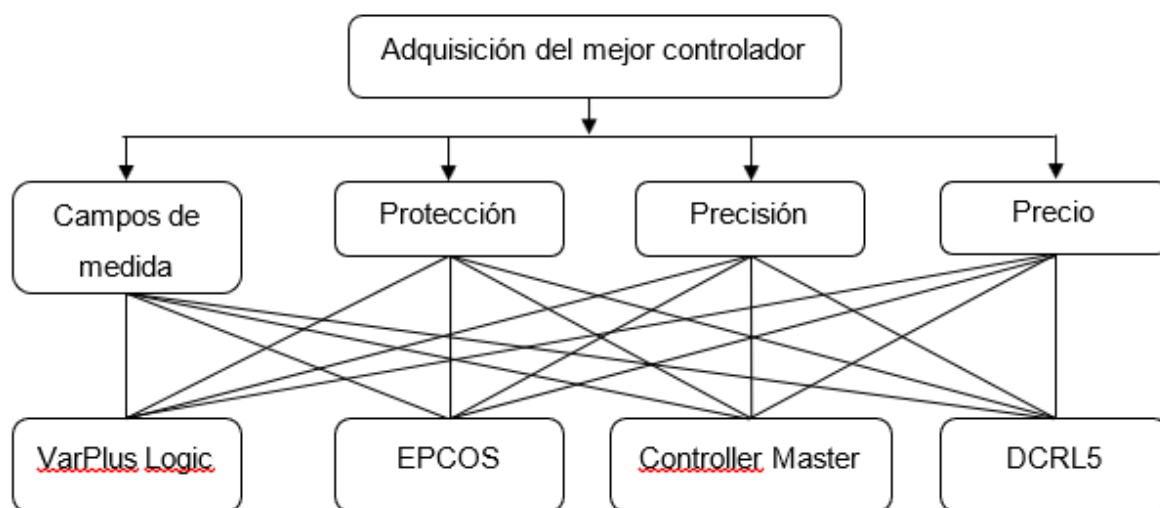
Características de los controladores de potencia reactiva

	Marca Características	VarPlus Logic	EPCOS	Controller MASTER (LIFASA)	DCRL5 (LOVATO)
Alimentación	Tensión	90-550 Vac	110- 550 Vac	110-520 Vac	100-440 Vac
	Frecuencia	50-60Hz	50-60Hz	50-60Hz	45-66Hz
	Consumo	6 VA	5 VA	10-16 VA	9,5 VA
Campo de medida	Tensión	90-550 Vac, 1 fase	30-550 Vac, (L-L/L-N)	20-300 Vac (F-N) 35-520 Vac (F-F)	50-720 Vac (L-L) 415 Vac (L-N)
	Corriente	15mA-6A	2mA-6A	5mA-5A	0.025-6 A
	Tensión, Corriente	1%	0.5%	0.5%	0.5%, 1%
Precisión de las medias	PF, Cos phi	2%	---	% (L1 L2 L3, N)	FP medio semanal
	THD de tensión	2%	4%	1%	1%
	Energía(activa, aparente, reactiva)	----	1%, 1%, 2%	Clase 1, Clase 2	----
Salida	Relés	6 NA	6 NA	6, 1 ventilador, 1 alarma (8)	4 NA+ contacto común (5)
Condiciones ambientales	Categoría de sobre tensión	III	III	III	III
Características mecánicas	Dimensiones	144x144x59 mm	96x96x51 mm	144x144x78 mm	96x96x65 mm
	Grado de protección	Frontal: IP41 Posterior: IP20	Frontal: IP54 Posterior: IP20	Frontal: IP51 Posterior: IP31	Frontal IP54 Posterior IP20
Comunicación	Interfaz	RS485	RS485	RS485	Módulo Rs485
	Protocolo	Modbus-RTU	Modbus-RTU, KTR	Modbus-RTU	Modbus RTU, ASCII
Precio	\$	407,67	419,40	409,69	281,6

Se han seleccionado cuatro equipos que cumplen con las características iniciales propuestas, además se presenta a detalle las prestaciones que poseen. Con esta información se procederá a aplicar el Proceso Analítico de Jerarquización (PAJ), este método nos ayudará en la selección del controlador a implementar dado que permite realizar una cuantificación de los elementos y evaluarlas con las alternativas de solución.

Figura 72

Definición de la estructura PAJ



La Figura 72 representa la estructura realizada para aplicar la metodología, como se aprecia existen 3 niveles:

- Nivel 0: Representa el objetivo del análisis
- Nivel 1: Criterios de evaluación
- Nivel 2: Alternativas de solución

Las diferentes alternativas serán evaluadas bajo los criterios propuestos como campo de medida, protección (IP), precisión y precio, apoyados en la Tabla 68 se procederá a definir qué equipo es mejor en determinado aspecto, para facilitar el proceso se apoyará en un software Analytic Hierarchy Process, el cual permite construir un análisis PAJ, el mismo que se encuentra en el Anexo 5.

Tabla 69

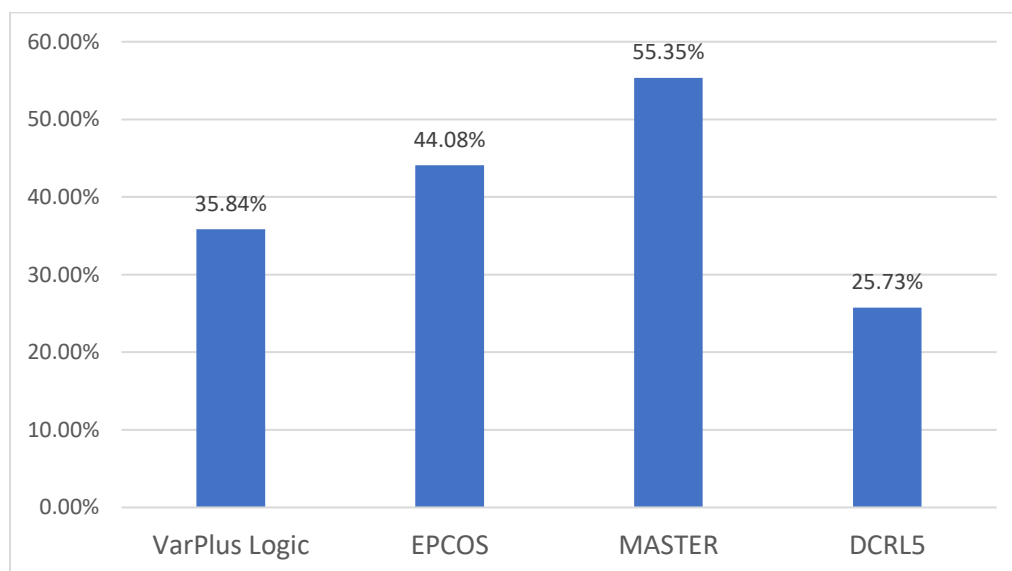
Resultado de la comparación de funciones

	VarPlus Logic	EPCOS	MASTER	DCRL5
Campos de medida	8	33	47	12
Protección	16	24	47	24
Precisión	23	10	34	34
Precio	16	7	11	66

Nota: Esta tabla resumen los datos obtenidos del análisis PAJ el mismo que se encuentra en el Anexo 5.

Figura 73

Resultados del método PAJ



En la Tabla 69 se puede observar los resultados obtenidos de la cuantificación y comparación entre los criterios y las alternativas de solución donde se priorizo las características más relevantes acorde al modelo del controlador. El resultado del análisis se evidencia en la Figura 73 producto de esto se determino que el mejor controlador para implementar en la pyme es CONTROL MASTER, este destaca de los demás debido a su flexibilidad dado que puede implementar hasta tres sensores de corriente para realizar un monitoreo de cada linea, siendo adcaudo en sistemas desbalanceados como en el caso de Sangolqui, por otro lado es capaz de presentar

mayor cantidad de parámetros eléctricos a diferencia de los demás controladores analizados, finalmente el modelo estándar del CONTROL MASTER (Figura 74) incorpora seis salidas, esto permite tener una reserva en caso de que la pyme aumente su carga.

Figura 74

Master control var 6 lifasa



Tipo: Master Control VAR 6 | 240 VAC Lifasa

Selección del Actuador

El sistema automático para la corrección del factor de potencia, controla la relación de la potencia reactiva con la potencia aparente, los reactivos necesarios son generados por un banco de capacitores trifásico, cuyos valores calculados se encuentran en el apartado Referencia a sistema no equilibrado para el local de “Sangolquí” y en el apartado Referencia a un sistema no equilibrado en el local de “San Rafael”, los datos comerciales se visualizan en la Tabla 67 y se establecen los siguientes parámetros:

- Banco de capacitores trifásico
- 4 pasos de 2.5kVAR o menor (comercial de 2.5kVAR)
- Conexión a 240 VAC (voltios de corriente alterna)

Figura 75

Capacitor Trifásico 2.5kVAR 240 VAC 60 Hz



El capacitor trifásico seleccionado tiene las siguientes características técnicas:

Tabla 70

Características técnicas del actuador seleccionado

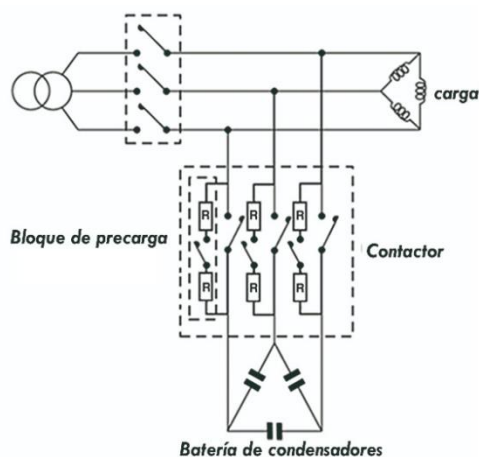
Características	Especificación
Tensión Nominal	240VAC
Frecuencia	60Hz
Dieléctrico	Polipropileno
Resistencias descarga	Integradas (75V/3m)
Pérdidas dieléctricas	≤0,2W/kVAR
Pérdidas totales	≤0,4W/kVAR
Sobretensión máxima	1,1 Un
Sobreintensidad máxima	2 In
Sobreintensidad transitoria	400 In
Nivel de aislamiento	3/8 kV
Tolerancia de potencia	-5 / +10%
Gama climática	-40 / D(60°C)
Expectativa de vida	>150000 horas
Borne de conexión	Tipo A 16mm ²
Fijación	M12
Grado de protección	IP 54
Normas	IEC 60831

Selección de los contactores para banco de capacitores

Por la conexión y desconexión del sistema de compensación se producen sobrecorrientes, las cuales pueden afectar a los dispositivos del sistema automático de control, por lo que para un sistema de compensación que se basa en banco de capacitores se usa este tipo de contactores que se caracterizan por disponer de contactos auxiliares que se cierran antes que los contactos de potencia y evitan los picos de corrientes que ocasionan bajas de tensión y disparo de protecciones, además de afectar al sistema general de la instalación eléctrica.

Figura 76

Esquemático Contactor con Precarga para Banco de Capacitores LIFASA



Nota: (Lifasa, Contactor para condensador KML, 2020)

Las características técnicas de los contactores se muestran a continuación:

Característica	Especificación
Tensión Nominal	220/230 [VAC]
Corriente Nominal	10,2 [A]
Contactos auxiliares	1NA + 1NC
Tiempo preconexión	50ms

Selección de las Protecciones

Según (Lifasa, Condensador Cilíndrico Trifásico, 2020) el valor de sobrecorriente máxima es:

$$S_C I_{pico} = 2 * I_N \quad (4. 1)$$

Dónde:

I_{pico} = sobrecorriente máxima

I_N = corriente nominal del banco de capacitores trifásico

Además, se da el dato de sobrecorriente transitoria que tiene un valor de:

$$I_T = 400 * I_N \quad (4. 2)$$

Dónde:

I_T = sobrecorriente transitoria

Para el cálculo de la protección se debe tener el valor de corriente nominal mediante la siguiente expresión:

$$I_T Q_{BC} = 3 * V_F * I_N * \text{sen}(\theta) \quad (4. 3)$$

Dónde:

Q_{BC} = Potencia reactiva trifásica nominal del banco de capacitores

V_F = voltaje nominal de fase

Se calcula el módulo de la potencia reactiva compleja ya que es conocido que el ángulo es de 90 grados en adelante con respecto al voltaje.

$$I_N = \frac{Q_{BC}}{3 * V_F} = \frac{2500[VAR]}{3 * 127[V]} = 6.56[A]$$

$$I_P = 2 * 6.56 = 13.12[A]$$

$$I_N = 400 * 6.56 = 2624.67[A]$$

Con estos valores se realiza la selección de la protección:

Tipo: Breaker CHINT C60n $I_n=16[A]$, $I_{Rupt}=6[kA]$

El controlador dispone de 6 salidas tipo relé, de las cuales se ocupan 4, la protección general se da en la suma de las corrientes nominales de sus protecciones individuales, por lo que se elige una protección:

$$I_G = I_N * 4$$

Dónde:

I_G : corriente nominal de la protección general

$$I_G = 16 * 4 = 64[A]$$

Figura 77

Breaker CHINT 16 [A] 3 polos



Tipo: Breaker CHINT C60n $I_n=16[A]$, $I_{Rupt}=6[kA]$,

Característica	Especificación
Tipo	3 polos
Tensión nominal	240[VAC]
Corriente nominal	16[A]
Sobrecorriente Cortocircuito	6[kA]

Fuente: (CHINT, 2016)

Figura 78

Breaker CHINT 80 [A] 3 polos



Característica	Especificación
Tipo	3 polos
Tensión nominal	240[VAC]
Corriente nominal	80[A]
Sobrecorriente Cortocircuito	20[kA]

Fuente: (CHINT, 2016)

Programación de controlador

El controlador LIFASA MASTER 6 CONTROL VAR es un regulador de energía reactiva que mide el desfase entre la señal de voltaje y corriente y controla la conexión y desconexión de banco de capacitores para llegar un punto de control o setpoint, midiendo las tres entradas de tensión y corriente (Lifasa, 2018).

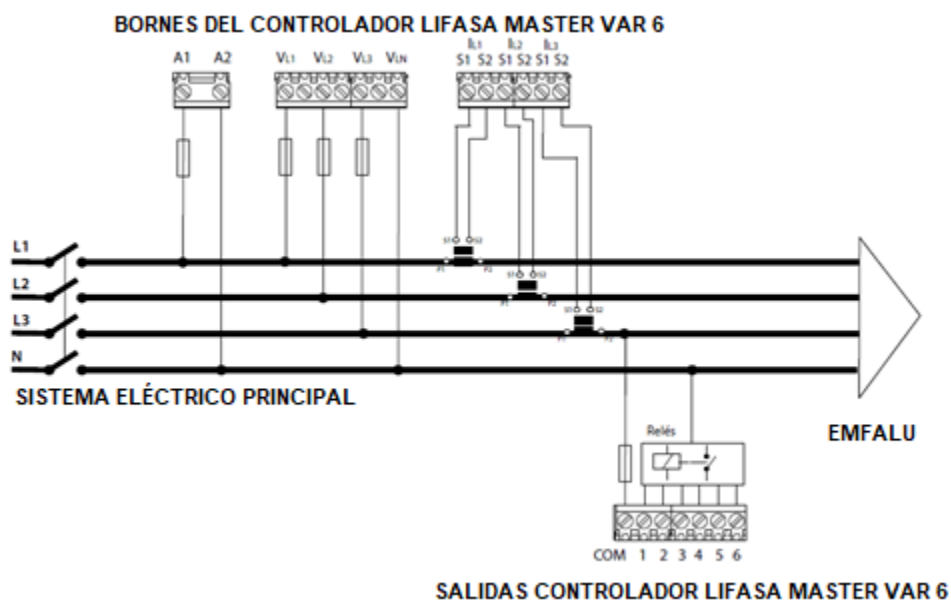
El controlador dispone de las siguientes prestaciones:

- 5 teclas, para manejar los parámetros por teclado
- 4 luces indicadoras: CPU, ALARMA, VENTILADOR, TECLA PULSADA
- Pantalla LCD en donde se visualiza los datos eléctricos del sistema
- 2 entradas digitales, para selección del factor de potencia objetivo
- 2 salidas digitales y 1 salida de relé, se las puede programar como alarmas
- 1 salida de relé, para ventilador
- 6 relés de salida, para la conexión y desconexión del banco de capacitores

- Comunicación RS-485 MODBUS RTU

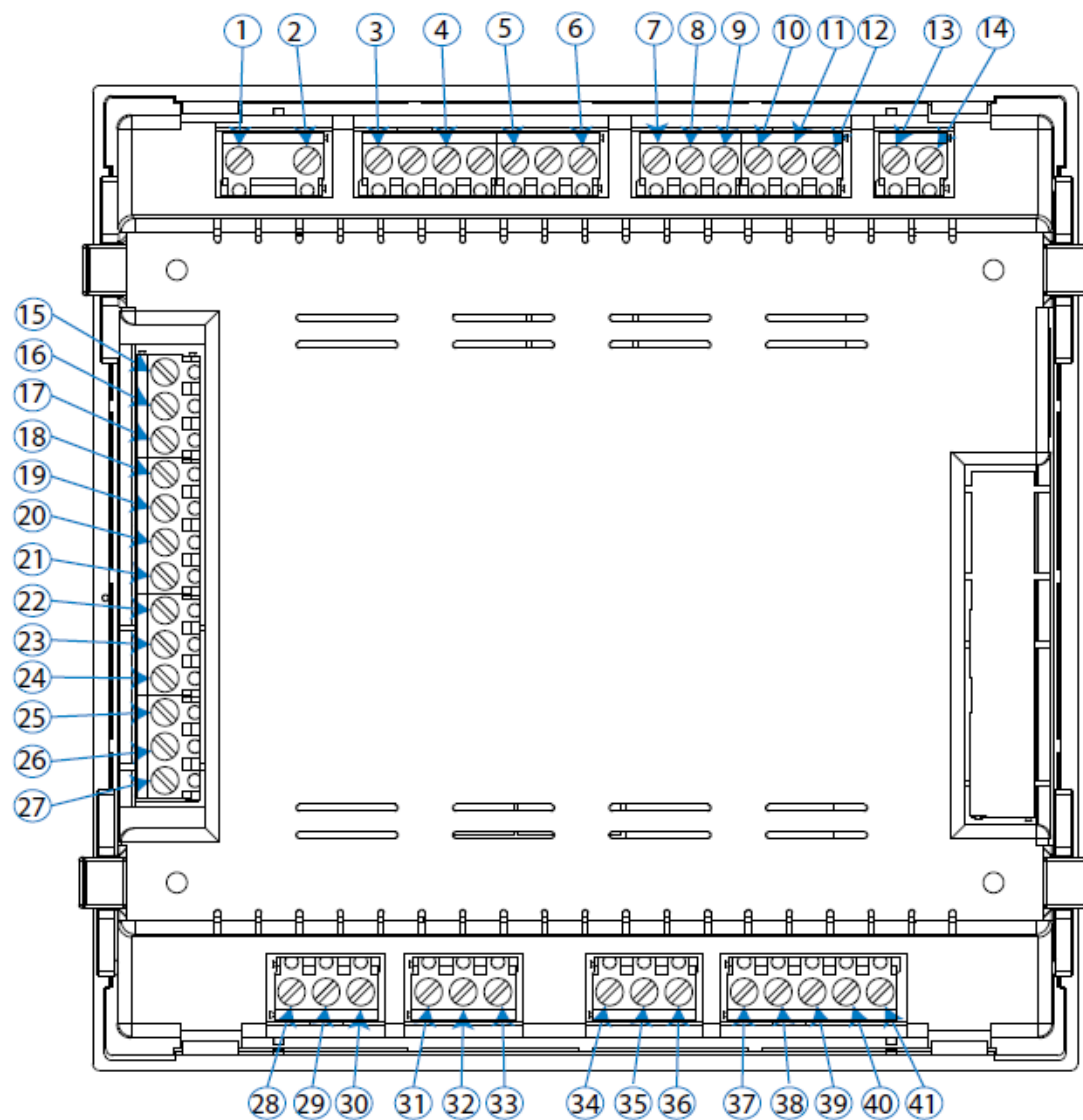
Figura 79

Conexión 3 tensiones + neutro y 3 corrientes



Fuente: (Lifasa, 2018)

Se debe tener en cuenta el tipo de conexión que tiene el sistema eléctrico, en este caso es un sistema eléctrico trifásico conectado en estrella, es decir tiene tensiones de fase de 127[V] y tensiones de línea de 210[V], consta de 3 líneas más una línea de neutro, se analiza cada una de las fases con 3 transformadores de corriente (ver Figura 79).

Figura 80*Bornes de controlador CONTROL MASTER 6*

Fuente: (Lifasa, 2018)

Tabla 71*Identificación de bornes del controlador MASTER 6*

Item	Borne	Descripción
1	A1	Alimentación Auxiliar
2	A2	Alimentación Auxiliar
3	VL1	Entrada de tensión L1
4	VL2	Entrada de tensión L2
5	VL3	Entrada de tensión L3
6	VLN	Entrada de tensión de neutro
7	S1	Entrada de Corriente L1
8	S2	Entrada de Corriente L1
9	S1	Entrada de Corriente L2
10	S2	Entrada de Corriente L2
11	S1	Entrada de Corriente L3
12	S2	Entrada de Corriente L3
13	S1	Entrada de Corriente de fuga
14	S2	Entrada de Corriente de fuga
15	COM	Común relés
16	R1	Salida Relé 1
17	R2	Salida Relé 2
18	R3	Salida Relé 3
19	R4	Salida Relé 4
20	R5	Salida Relé 5
21	R6	Salida Relé 6
22	R7	Salida Relé 7
23	R8	Salida Relé 8
24	R9	Salida Relé 9
25	R10	Salida Relé 10
26	R11	Salida Relé 11
27	R12	Salida Relé 12
28	A+	RS485
29	B-	RS485
30	S	GND para rs485
31	1	Entrada digital 1
32	1	Entrada digital 2
33	C	Común de las entradas digitales
34	1	Salida digital 1
35	2	Salida digital 2
36	C	Común de las salidas digitales
37		Salida relé ventilador
38		Salida relé ventilador

Ítem	Borne	Descripción
39	NC	Salida relé de alarma
40	C	Salida relé de alarma
41	NO	Salida relé de alarma

El controlador MASTER 6 de LIFASA tiene las siguientes funciones básicas:

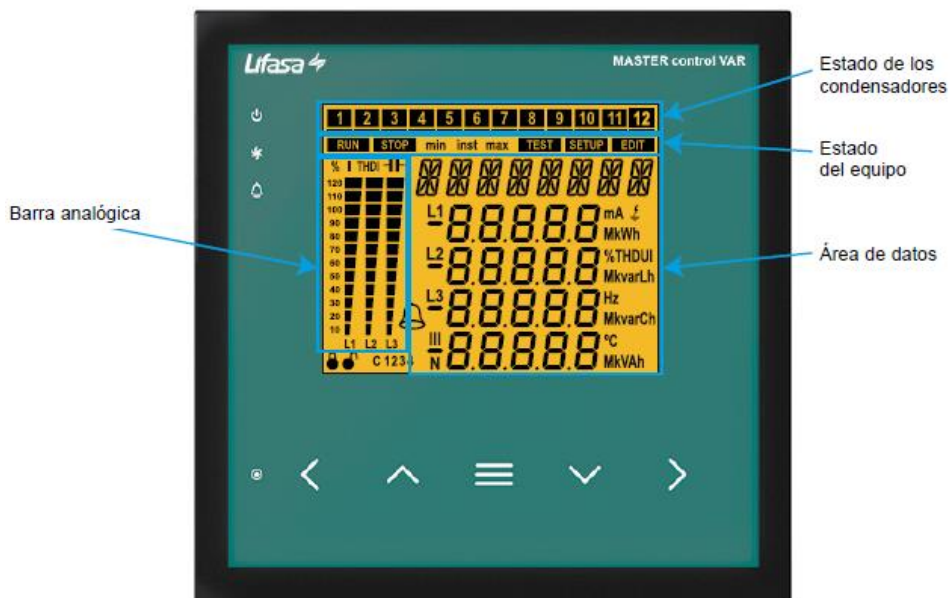
- Función de analizador de red con medida y visualización de varios parámetros.
- Función Plug&Play, configura de manera automática el equipo
- Función AutoTest y Test Manual para testear el estado de los capacitores
- Sistema FCP, que minimiza el número de conexiones y desconexiones de los relés
- Posibilidad de forzar los pasos
- Funcionamiento para diferentes tipos de conexión
- Medida de corriente de fugas
- Disponibilidad de alarmas por fallos en la instalación

La pantalla LCD muestra la siguiente información:

- Área de datos: se visualizan los valores instantáneos, máximos y mínimos de cada una de las fases
- Estado de los capacitores: se muestra el estado de los relés
- Estado del equipo: se muestra si el equipo está en modo RUN, EDIT o TEST
- Barra analógica: donde se muestra el porcentaje de corriente, THD o potencia conectada a los capacitores

Figura 81

Área de display del controlador MASTER 6



Fuente: (Lifasa, 2018)






Para realizar la programación del controlador es necesario seguir los pasos detallados en el Anexo 7 (Manual de usuario) ahí se especifica a detalle que significa cada parámetro de configuración, para que el sistema funcione adecuadamente, es importante recordar que para entrar al modo de programa se debe presionar por 3 segundos la tecla  y digitar la contraseña    

Tabla 72

Configuración del sistema

Opción de configuración	Detalle
Plug & Play	Al activar esta opción el sistema se configurar de manera automática, es importante realizar este proceso para

Opción de configuración	Detalle
Tipo de conexión	configurar automáticamente los valores del retardo en función de los capacitores instalados
N° Escalones	La conexión que se implemento es del tipo 3U, 3C: que significa 3 tensiones + neutro y 3 corrientes
Programa	Ahí se especifica el número de capacitores instalados el cual es de: 4
Comunicación	Especifica como el controlador va a activar cada capacitor, en este caso todos son de la misma potencia por lo tanto el programa es 1.1.1.1 En este apartado se establece los valores para la comunicación Modbus: Numero de periférico: 1 Velocidad de transmisión 19200 Paridad: none Bit de parada: 1

Diseño HMI

Para el desarrollo de HMI se va a tomar como base el estándar ANSI-ISA 101 y los pasos que sugiere seguir para el desarrollo, esto detallado en la sección HMI (Interfaz Humano Maquina).

Fase 1: Estándar del sistema

Filosofía: La interfaz a desarrollar va dirigida hacia a la empresa EMFALU, esta empresa es una pyme dedicada promover servicios para la construcción, las características más relevantes se encuentran detalladas en la sección Características generales de la empresa. El problema existente en esta pyme es la presencia de un bajo factor de potencia.

Guía de estilo: Al ser una pyme no existe procesos complejos como tal, por tal razón el diseño de la interfaz se radica exclusivamente en un sistema de monitoreo de parámetros eléctricos, que permiten al usuario poder tener al alcance las variables esenciales que desea supervisar, entre las solicitadas se encuentran:

- Factor de potencia
- Consumo energético
- Potencias trifásicas
- Voltaje
- Corriente

Kit de herramientas:



El software a utilizar será el sistema SCADA IGSS de Schneider, es una herramienta potente para automatizar procesos y sistemas de supervisión de plantas, entre las características que ofrece el software se tiene:

- Visión general del proceso

- Soporta OPC UA
- Versión gratuita (Free 50)
- Escalable al sustituir la licencia a sistema superior
- Panel de instrumentos

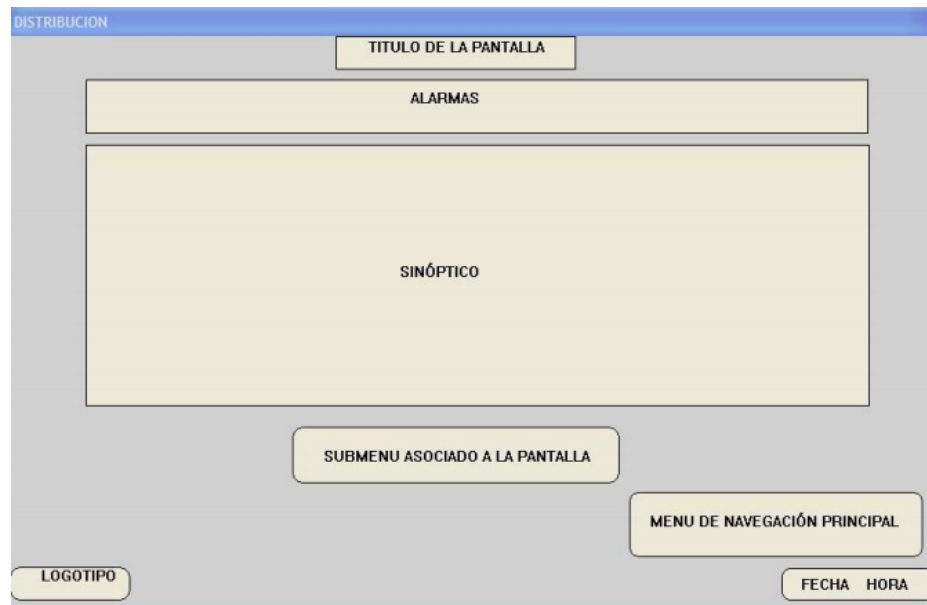
Se va a emplear la versión gratuita que ofrece una implementación de hasta 50 objetos, esto quiere decir que es posible agregar 50 diferentes variables de monitoreo o control a la interfaz. La funcionalidad de este software permitirá incluso en esta versión gratuita contar con la mayoría de sus herramientas para poder realizar el diseño, será posible realizar: (Schneider, 2018)

- Recopilación de datos de PLC sin límite de tiempo
- Utilizar un controlador de PLC + 70
- Actualizar a la versión de paga cuando se requiera sistema más grande.

Fase 2 Diseño del entorno gráfico

Figura 82

Plantilla general de una HMI



Fuente: (Pere, 2013)

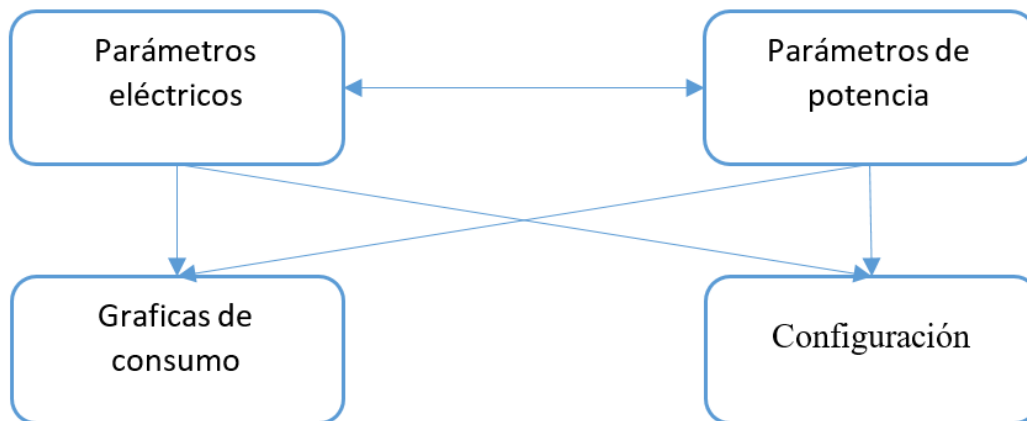
Para el diseño del entorno gráfico se va partir de una plantilla general como se observa en la Figura 82, esta plantilla servirá como base, donde se van a considerar los siguientes elementos

- Título de la pantalla
- Alarmas
- Sinóptico
- Menú de navegación
- Logotipo

El sinóptico hace referencia a una representación gráfica del proceso en donde se resaltarían los elementos de control o sensores de campo, para este caso, en esta sección se implementarán una serie de indicadores que presenten las variables requeridas por el usuario (EMFALU).

Figura 83

Esquema de navegación



La arquitectura de navegación, en este caso se desarrollarán cuatro pantallas las cuales dos serán principales estas serán y las otras dos serán emergentes, las pantallas a diseñar serán: parámetros eléctricos, parámetros de potencia, gráficas de consumo y una pantalla de información general, el usuario podrá interactuar entre ellas como se representa en la Figura 83. Gráficas de consumo, así como información

general son pantallas emergentes, esto significa que podrá ser accedida desde ambas pantallas sin la necesidad de que la pantalla principal se cierre.

La Figura 84 representa la ventana creada de parámetros eléctricos, esta fue diseñada con una serie de medidores de barra y circulares con el fin de representar visualmente la información recibida del controlador, en el área de visualización de parámetros se implementó dos botones de navegación los cuales permiten rotar la información visualizada entre armónicos y corrientes o tensiones de línea según se escoja, esta pantalla consta con los siguientes elementos:

1. Título
2. Alarmas
3. Visualización de parámetros medidos
4. Logotipo de la empresa
5. Menú de navegación

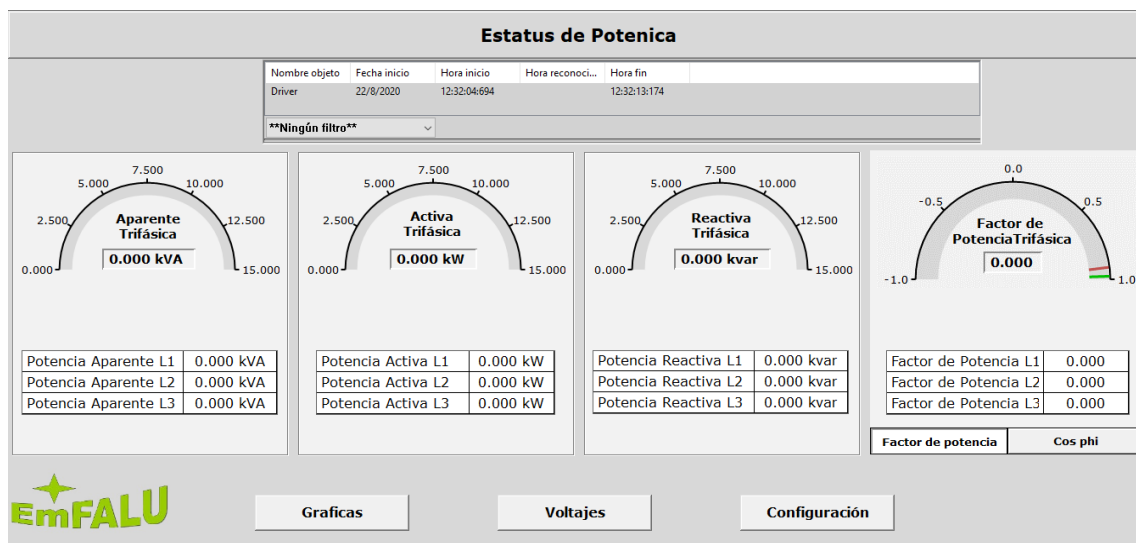
Figura 84

Pantalla de parámetros eléctricos



Figura 85

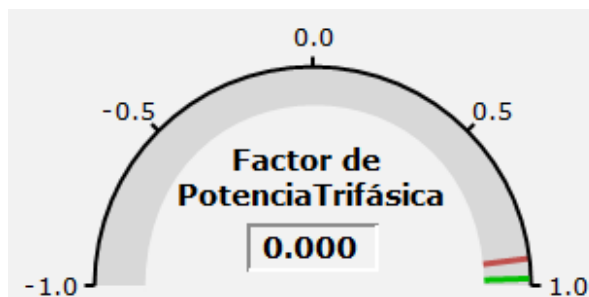
Parámetros de potencia



En Figura 85 se observa la representación de los parámetros de potencia, al igual que en la pantalla anterior se empleó medidores circulares para visualizar los datos de las potencias trifásicas, mientras se empleó el formato tabla para resumir las demás variables correspondientes a: potencia aparente, activa, reactiva y factor de potencia de cada línea medida, dado que el analizador permite extraer valores del cos phi se adiciono un botón que permita observar tanto el FP como el cos phi dentro del mismo espacio.

Figura 86

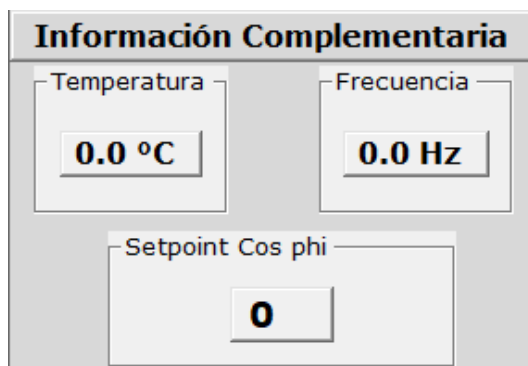
Medidor de FP trifásico



En esta pantalla se puede observar además la configuración del límite recomendable de operación (Figura 86), este se asignó en 0.92 dado que es el valor mínimo requerido por EEQ (color rojo), además se asignó un indicador para el setpoint visualizado de color verde, este valor será configurable por medio de la pantalla emergente “Configuración” (Figura 87), en caso de que el factor de potencia se encuentre por debajo de 0.92 se generara una notificación que será visualizada en la sección de alarmas.

Figura 87

Información General

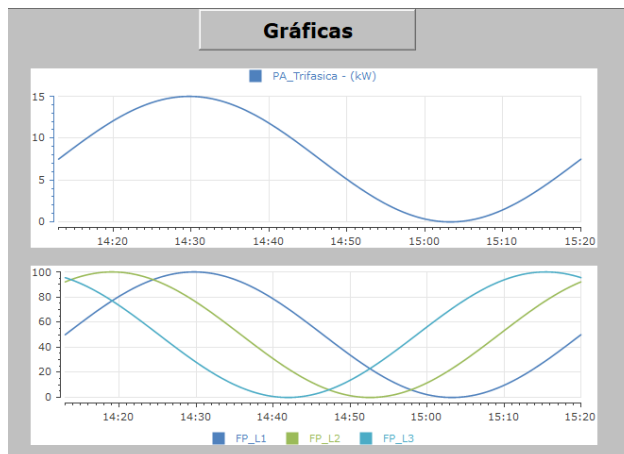


La Figura 87 es una pantalla emergente la cual brinda información adicional, en donde se pueden observar variables como: temperatura del controlador y frecuencia además de poder configurar el setpoint del Cos phi en donde será posible variarlo el rango de 92 a 100 (0.92 a 1), el valor que se configurara será de 98 (0.98) dado que es el valor que se empleó para el diseño.

En la pantalla emergente (Figura 88) se puede visualizar las gráficas realizadas a las variables de potencia activa y factor de potencia, esto como requerimiento de la empresa para poder llevar un registro del trabajado realizado, la energía que se ha consumido en el día y poder verificar en que horarios de trabajo son donde más consumo energético se tiene.

Figura 88

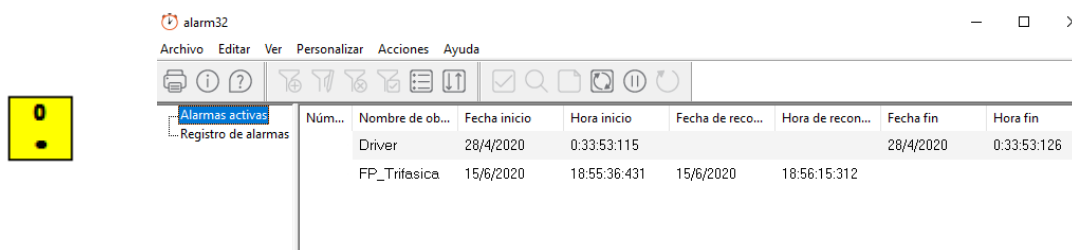
Gráficas de consumo



Nota: Las gráficas mostradas son exclusivas del modo de diseño por tal razón se evidencian ondas senoidales, más adelante se presentarán los valores reales.

Alarmas

El software incorpora su propio recuadro de alarmas (Figura 89.b), esta ventana provee información detallada sobre los eventos generados por el controlador, estos son: bajo factor de potencia y falta de corriente, este último hay que destacar que se produce debido a que la corriente censada en la línea uno llega a cero, esto ocurre debido a que el transformador de corriente no logra medir corrientes muy bajas, por tal motivo el controlador lo interpreta como cero, sin embargo es un evento momentáneo ya que al momento que comienzan con las órdenes de trabajo dicho evento se anula ya que existe un consumo considerable que el controlador logra interpretar adecuadamente. Para acceder al recuadro de alarmas se debe dar doble clic en el icono representado por la Figura 89.a.

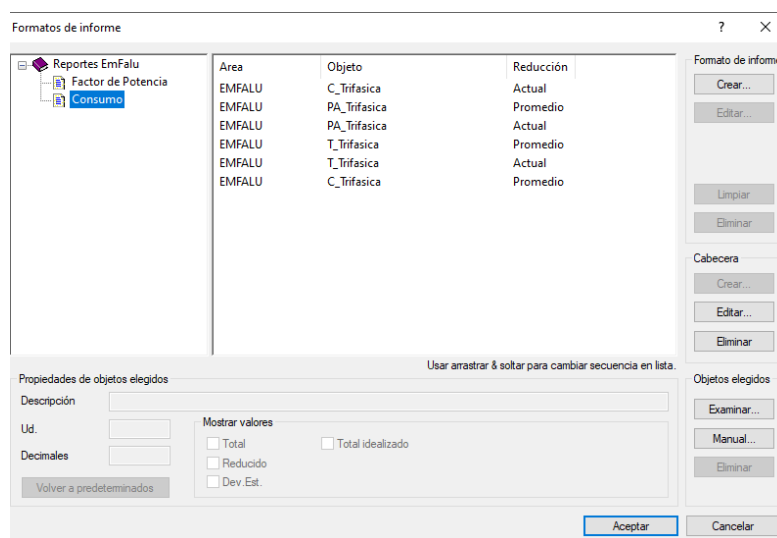
Figura 89*Alarmas del sistema*

a) Indicador de alarmas

b) Ventana de alarmas

Documentación

El software permite crear informes de las variables que se consideren oportunas, estas registrarán información de los valores máximos, mínimos, promedios y actuales, de las variables eléctricas más importantes, en la Figura 90 se observa la creación de dos informes uno será el encargado de registrar la información correspondiente al factor de potencia mientras que el informe de consumo se encargará de registrar los parámetros eléctricos de tensiones, corrientes y potencia activa consumida.

Figura 90*Informes generados*

La información generada se puede exportar a Excel, y el usuario podrá generar los reportes de manera diaria, semanal, mensual, trimestral o anual (Figura 91.a), un ejemplo del informe generado se puede apreciar en la Figura 91.b, como se aprecia los dos reportes son generados de manera consecutiva tanto el de Factor de potencia como el de Consumo, hay que resaltar que este informe es solo un ejemplo los valores que se visualizan no representa el valor real de las variables, ya que fueron generados a manera de prueba.

Figura 91

Creación del informe

Crear informe estándar

Fomato informe: Repotes de planta

Crear: Diseñar

Fecha inf.: 6/ 5/2020

Vista gral. (seleccionado) / Detalle

Tipo informe:

- Día
- Semana: Primer día semana: Lunes
- Mes
- Trimestre
- Año

Salida:

- Vista prel.
- Imprimir: Imprimir pág. 1 a 1
- Vertical / Horizontal
- A Excel
- Mail a: []
- Suprimir encabezados en todo menos primera pág.

Crear

a) Parámetros de generación

EMFALU **Informe diario**

Reporte de consumo

Periodo: 06-05-2020 18:00 - 07-05-2020 18:00

Descripción	Objeto	Reducción	unidad	Contar	Total	Reducido	Diferencia
Factor de Potencia							
	FP_L1	Promedio		9		89	
	FP_L1	Máximo		9		100	
	FP_L1	Mínimo		9		-15	
	FP_L2	Promedio		9		87	
	FP_L2	Máximo		9		100	
	FP_L2	Mínimo		9		-100	
	FP_L3	Promedio		9		89	
	FP_L3	Máximo		9		100	
	FP_L3	Mínimo		9		-50	
	FP_Trifasica	Actual		9		81	
	FP_Trifasica	Promedio		9		89	
	FP_Trifasica	Máximo		9		100	
Consumo							
	E_Activa	Actual	kWh	0			
	E_Activa	Máximo	kWh	0			
	P_Activa_Trifasica	Actual	W	0			
	P_Activa_Trifasica	Máximo	W	0			

b) Ejemplo del informe generado

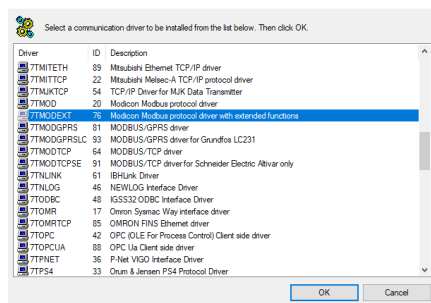
Interfaz de comunicación

Para la comunicación con el controlador Master Logic se va emplear el protocolo MODBUS RTU para lo cual es necesario tener presente la tabla de comunicación Modbus propia del controlador, así como el driver de comunicación del software. IGSS ofrece algunos drivers de esta característica tanto para equipos generales como para propios de la marca, en la Figura 92 se observa la configuración necesaria para realizar dicha comunicación.

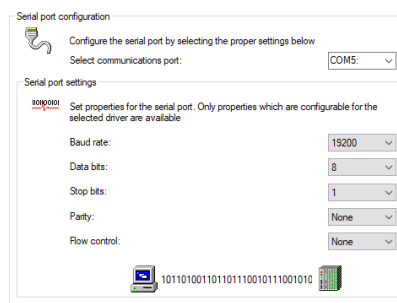
Para lograr esta comunicación es necesario seleccionar el driver MODBUS “with extended functions” y configurar: velocidad de transmisión (baud rate), los bits de datos, el bit de parada y la paridad, estos valores deben ser iguales a la configuración que viene en el controlador para que no exista problemas con la transmisión de datos, hay que tener en cuenta que al ser Modbus RTU necesitara de un puerto serial (COM) esto se puede verificar en administrador de dispositivos y consultar el puerto al cual se debe hacer referencia, esto se visualiza en la Figura 93.a.

Figura 92

Configuración del driver Modbus



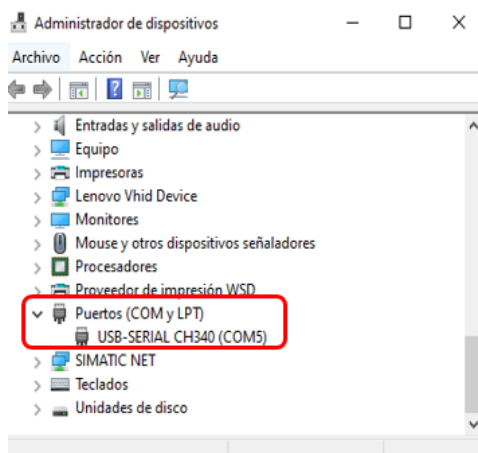
a) Selección del driver



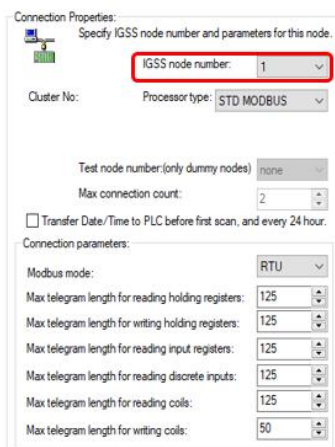
b) Configuración de la conexión

Figura 93

Configuración adicional



a) Puerto COM



b) Nodo de comunicación

Se debe especificar el nodo de comunicación, este nodo representa el número del dispositivo con el cual se quiere comunicar, dado que el controlador está configurado como el dispositivo uno, se le va a asignar al nodo uno, esto se visualiza en la Figura 93 b. Es necesario realizar el mapeo de las variables, esto se consigue revisando la tabla de direcciones MODBUS, la cual está disponible en el Anexo 6.

Como se detalla en la sección Comunicación con protocolo Modbus, es necesario definir el tipo de registro al que se va a dirigir para extraer la información, en la Figura 94 se observa que se direcciona al registro 3 donde se ubican todas las variables requeridas, en el Offset se asigna registro correspondiente a la variable requerida, finalmente es necesario definir si la variable creada será de entrada o de salida, en este caso se requiere recibir información del maestro por lo que serán del tipo entrada.

Figura 94

Mapeo de variables

The screenshot displays the 'Mapeo de atoms' configuration window. On the left, a list of variables is shown, with 'Valor actual' selected. Below the list, 'Modo E/S' is set to 'entrada'. On the right, the configuration for the selected variable is shown: 'Nodo PLC para objeto C_L1' with 'Driver: 7TMODEXT (Control)' and 'Nodo: 1'. The 'Dirección PLC para atom Valor actual:' section shows 'Data type: Holding Register 3/16', 'Offset Dec: 3', and 'Hex: 3'. The 'Bit Offset' is set to 0, and the 'External type' is 'FP16S'. At the bottom, there are buttons for 'Nuevo', 'Editar', and 'Eliminar'.

Implementación del sistema automático

Analizado los elementos a usar en el sistema automático se realiza los planos eléctricos: esquemático (ver Anexo 1) y sinóptico de cableado (ver Anexo 2). Con esta

referencia se diseña el gabinete en donde se realiza la instalación de los elementos de control y de potencia del sistema automático para mejorar el factor de potencia, obteniendo así la lista de materiales a usar:

Tabla 73

Lista de materiales para implementación del sistema de compensación

ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD
1	Controlador energía reactiva Lifasa master 6	1	unid.
2	Contactador para banco de capacitores 12 a	4	unid.
3	Banco de capacitores trifásico 2.5kvar 240 v	4	unid.
4	Tablero con doble fondo 60x60x25	1	unid
5	Transformador de corriente de 150/5a o 200/5a	3	unid.
6	Caja dexion	1	unid.
7	Toma corriente doble 120vac 15a con tapa	1	unid.
8	Riel din 35mm	3	metro
9	Manguera bx 1"	1	metro
10	Manguera bx 3/4"	1	metro
11	Conector bx 1"	2	unid.
12	Conector bx 3/4"	2	unid.
13	Cable thhn #8 awg	12	metro
14	Cable thhn #12 awg	30	metro
15	Cable thhn #16 awg	40	metro
16	Cable thhn #12 awg verde (tierra)	5	metro
17	Terminal tipo pin cable #8 awg	1	caja
18	Terminal tipo pin cable #12-14 awg	1	caja
19	Terminal tipo pin cable #16-18 awg	1	caja

ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD
20	Terminal faston hembra cable #12-14 awg	1	caja
21	Breaker 3 polos 80 a	1	unid.
22	Breaker 3 polo 25 a	4	unid.
23	Breaker 2 polo 20 a	1	unid.
24	Pulsador no color verde	1	unid.
25	Pulsador nc color rojo	1	unid.
26	Pulsador nc tipo hongo emergencia	1	unid.
27	Relé auxiliar bobina 120 vac	1	unid.
28	Base relé auxiliar	1	unid
29	Luz indicadora led verde 120 vac	1	unid.
30	Luz indicadora led rojo 120 vac	1	unid.
31	Bornera cable #8 awg	6	unid.
32	Bornera cable #10 awg	12	unid.
33	Bornera cable #12awg	30	unid.
34	Bornera tierra (verde) #8 awg	1	unid.
35	Bornera tierra (verde) #12 awg	5	unid.
36	Canaleta ranurada 1"	2	unid.
37	Canaleta ranurada 1 1/2"	1	unid.
38	Amarra plástica 2.5x150mm	1	paq.
39	Barra de tierra 6 orificios	1	unid.

Nota: La cotización realizada de estos elementos se encuentra dentro del Anexo 8

Adquiridos los materiales se procede al armado del gabinete, se inicia con la instalación de la canaleta y del riel DIN en el doble fondo, para colocar los dispositivos dimensionados de la siguiente manera:

En el tablero principal según Anexo 2:

- Parte superior: protecciones termomagnéticas
- Parte central: Contactores, relé auxiliar
- Parte inferior: Borneras, actuadores

En el panel del operador según Anexo 2:

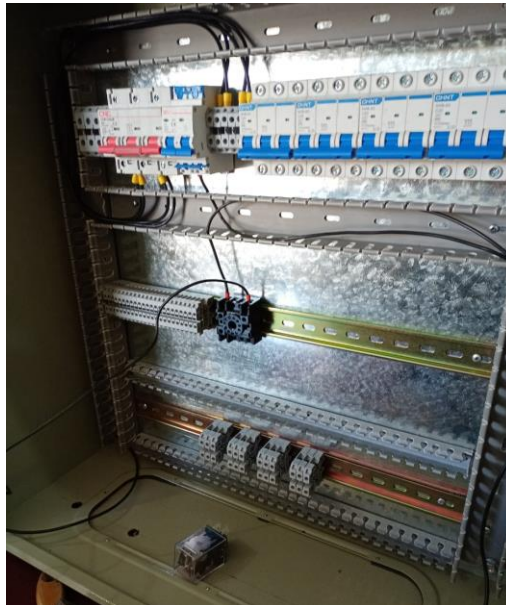
- Puerta: Controlador, dispositivos de mando

Comunicación:

- HMI: supervisión, administración

Figura 95

Ubicación de canaleta y riel DIN



Se procede a colocar los elementos de la puerta del gabinete:

- Controlador MASTER 6 LIFASA
- Botonera verde ON
- Botonera roja OFF
- Botonera de emergencia

Se denomina a esta parte del gabinete como Armario del Operador, tiene las siguientes funcionalidades:

- Inicio del sistema
- Paro del sistema
- Paro de emergencia por falla del sistema.
- HMI, pantalla de acceso a los datos eléctricos del sistema como: tensiones de fase y de línea, corriente en las 3 líneas, factor de potencia, potencia activa, reactiva y aparente, activación de pasos de los capacitores, nivel de armónicos, etc.
- Mediante la pantalla HMI se puede acceder a la configuración del sistema para ingresar los datos eléctricos en el controlador.

Figura 96

Elementos colocados en el Armario del Operador



Se realiza el cableado de los elementos basados en el plano esquemático (ver Anexo 1), se coloca el cableado de control para el Armario del operador hacia los elementos de control del Armario Principal, cada paso de cable se comprueba continuidad y prensado de los terminales mediante el multímetro, para no tener inconvenientes de cables obstruidos, cada cable debe tener su identificación de donde sale y hacia dónde llega según la regla de Bornera que se utilice, de esta manera se

realiza una ubicación ordenada y facilita para la corrección de daños y el mantenimiento de los armarios, además de que cualquier persona calificada pueda modificar el sistema con nuevos diseños de compensación siguiendo los pasos del Manual de Usuario (ver Anexo 7).

Figura 97

Cableado del Armario Principal



Figura 98

Cableado del Armario del Operador



Figura 99

Instalación del tablero de banco de capacitores



Normativa para la implementación de nuevos equipos en la planta industrial

Para el diseño del tablero de control se basó en la norma ecuatoriana de construcción NEC capítulo 15 instalaciones electromecánicas, este documento especifica cómo se debe implementar cada uno de los diferentes elementos que se van hacer uso para el control automático del factor de potencia, a continuación, se realiza un listado de las normas seguidas para la construcción del tablero.

Tabla 74

Normativa para la instalación del Sistema Automático de Corrección de Potencia

Elementos	Normativa
Tablero	Dado que el ambiente en que se va a instalar genera mucho polvo es necesario que el tablero brinde la protección adecuada a cada elemento el tablero a instalar es un SBox el cual posee una protección IP 65 y cumple con las normativas CE, RoHS

Elementos	Normativa
Capacitores	<p>Para la selección e instalación de los Capacitores se basó en la normativa IEC 831 la cual habla específicamente de la instalación de Capacitores en paralelo en redes de corriente alterna cuya tensión nominal es inferior o igual a 1000 V</p> <p>Esta normativa además explica los picos de corriente que se generan al momento de la conexión y desconexión y establece las medidas de seguridad que se deben tomar en esos casos, con respecto a la normativa nacional según (Gobierno Nacional de la República de Ecuador, 2013) en la sección 15.1.12.2.5 explica las consideraciones que se deben tener en cuenta para el uso de banco de capacitores.</p>
Contactores	<p>Dado que el pico corriente puede alcanzar valores de $100 I_N$ es necesario tomar medidas para reducirlo por tal razón se empleó contactores con resistencia de precarga estos cumplen con la normativa IEC 60947-1 para equipos de conmutación y control de baja tensión.</p>
Conductores	<p>La selección de los conductores para el tablero es 8 AWG para la alimentación trifásica esto debido a que el consumo promedio de la empresa llega a ser de 30 A para lo cual correspondería un calibre 10AWG sin embargo llega a tener picos de corriente debido a esto se escogió el calibre 8 que soporta hasta 55 A, 12 AWG para potencia dado que se determinó un consumo de 6 A por fase,</p>

Elementos	Normativa
	<p>en las tres fases se tendría 18 A y este cable soporta hasta 20 A finalmente se empleó cable 16 AWG para control un consumo de 2 A por fase y este cable soporta hasta 10 A, para la disposición del cableado interior se siguió lo establecido en (Gobierno Nacional de la República de Ecuador, 2013) sección 15.1.8.2.15.20 y 15.1.8.2.15.20</p>
Botonera	<p>Para la disposición de la botonera se acogió lo establecido en (Gobierno Nacional de la República de Ecuador, 2013) sección 15.3.24 La cual establece la altura máxima de ubicación.</p>
Controlador	<p>Este dispositivo cuenta con una protección IP 51 frontal la cual permite asegurar con correcto funcionamiento en entornos con polvo además que cuenta con la aprobación de las normas UNE-EN 61010:2010, UNE-EN 61000-6-2 y UNE-EN 61000-6-4 correspondientes a los requisitos de seguridad, compatibilidad electromagnética y norma de emisión en entornos industriales.</p>
HMI	<p>En el desarrollo de la HMI se basó en la norma ANSI 101 la cual establece todos los parámetros para el diseño y como protocolo de comunicación se tiene MODBUS RTU.</p>

Pruebas de funcionamiento

Con el fin de constatar que la instalación realizada no presenta ninguna falla se procedió a verificar el funcionamiento del controlador, para lo cual se realizaron varias visitas hacia la pyme en donde se observó a detalle si existía un comportamiento anómalo en el sistema.

Se realizó la conexión del Analizador de Red 127/210[V], 100[A], y se tomó datos para comprobar que el factor de potencia esté en los valores programados, es decir de 0,92 a 1, además se debe comprobar que los valores de tensión y de corriente no se vean afectados por la conexión y desconexión del banco de capacitores.

Figura 100

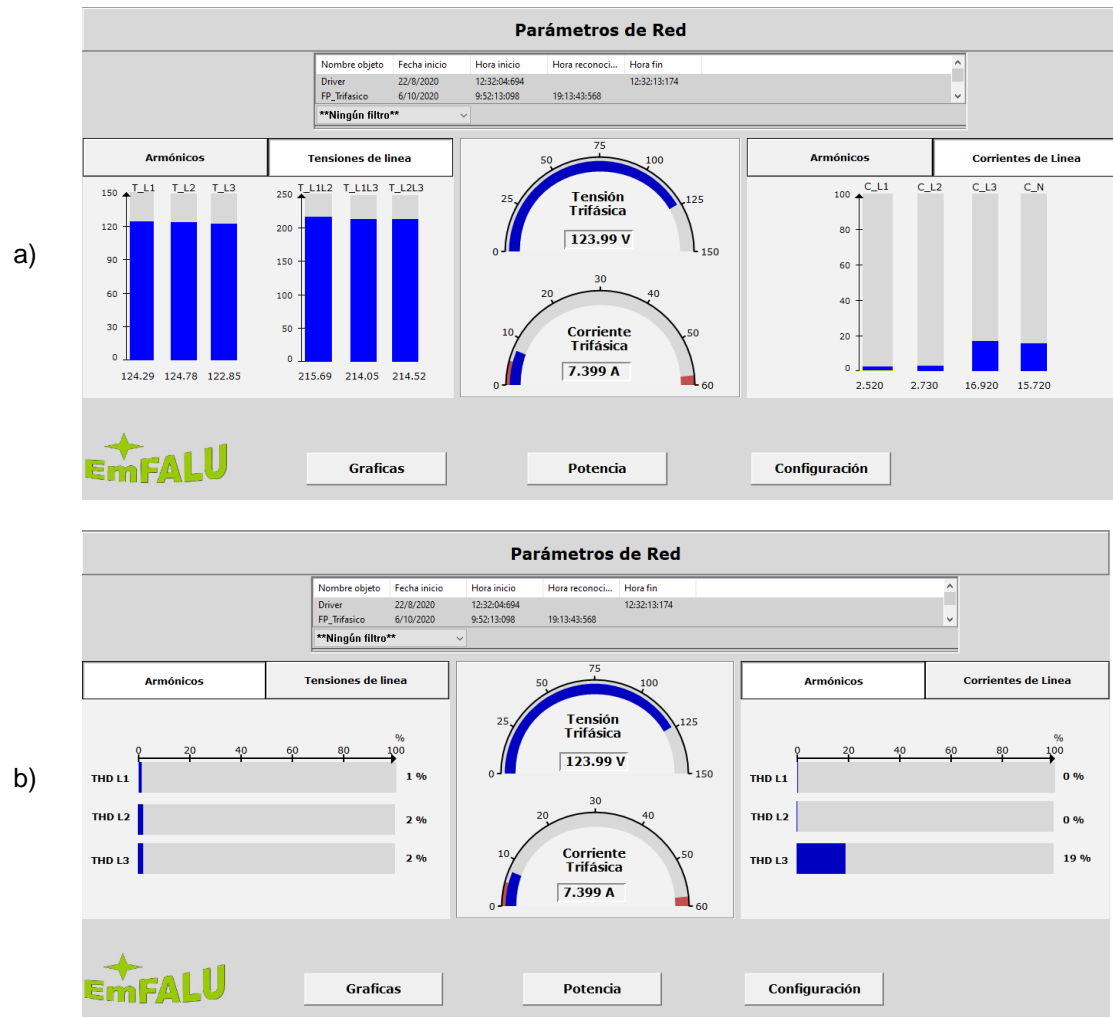
Verificación del comportamiento del controlador



Resultado de las visitas se pudo constatar que el sistema se mantuvo operativo sin presentar ningún inconveniente, es decir no se observaron arcos eléctricos, los valores medidos son los correctos, tanto los contactores como capacitores funcionaron adecuadamente y en el momento que el controlador lo solicitaba, además en estas pruebas de funcionamiento se verificó el comportamiento de la interfaz HMI.

Figura 101

Operación de la Pantalla Principa



En la Figura 101 a se constató que no exista ninguna anomalía al momento de recibir la información de estas variables, sin embargo, se puede constatar el desbalance que existe en la empresa al notar la presencia de 15,72 A en el neutro. Por otro lado se comprobó los niveles de armónicos tanto de voltaje como corriente Figura 101.b siendo evidente que por parte de los THD de tensión no existe ningún problema, ese análisis se lo observa a detalle en la Tabla 75, donde los valores son obtenidos por el controlador cuando la pyme se encontraba trabajando con carga máxima, de esta tabla se puede concluir que el máximo valor de THD presente en el sistema es de 2% y el

promedio de las tres líneas es de 1,53%, este valor se encuentra por debajo en del establecido por (ARCONEL, 2018) que establece un THD 8% (Tabla 4).

Tabla 75

Análisis THD de tensión

	L1(%)	L2(%)	L3(%)
Mínimo	1	1	1
Máximo	2	2	2
Promedio	1,096	1,988	1,506

Sin embargo, para el análisis de THD de corriente los valores registrados son mucho mayores, la Tabla 76 presenta el promedio obtenido en un día de trabajo se observa que la pyme posee problemas de distorsión armónica en corriente, siendo ese el principal elemento de distorsión del FP, sin embargo al sacar el promedio de estos valores se llega a la conclusión que se mantienen dentro del valor establecido por (ARCONEL, 2018) la cual establece que en un periodo de $3 \leq h < 11$ el THD debe ser inferior a 7% (Tabla 5), y el obtenido en promedio es de 6,18%, esto solo analizando en el periodo de 8H si se lo evalúa en el límite de 10H este valor será muy inferior dado que en las dos horas restantes los niveles de THD serán muy bajos lo que producirá que el cálculo del promedio también disminuya.

Tabla 76

Análisis de THD de corriente

Horas	L1(%)	L2(%)	L3(%)
8 a 9	0,85	0,65	0,35
9 a 10	19,78	20,57	12,16
10 a 11	7,39	5,33	7,17
11 a 12	4,2	2,8	4,74
12 a 13	0,45	0,65	0,85
13 a 14	1,55	1,34	2,17
14 a 15	17,28	19,27	13,76
15 a 16	1,45	1,82	1,89
Promedio	6,62	6,55	5,39

Figura 102

Operación de la Pantalla de Potencia

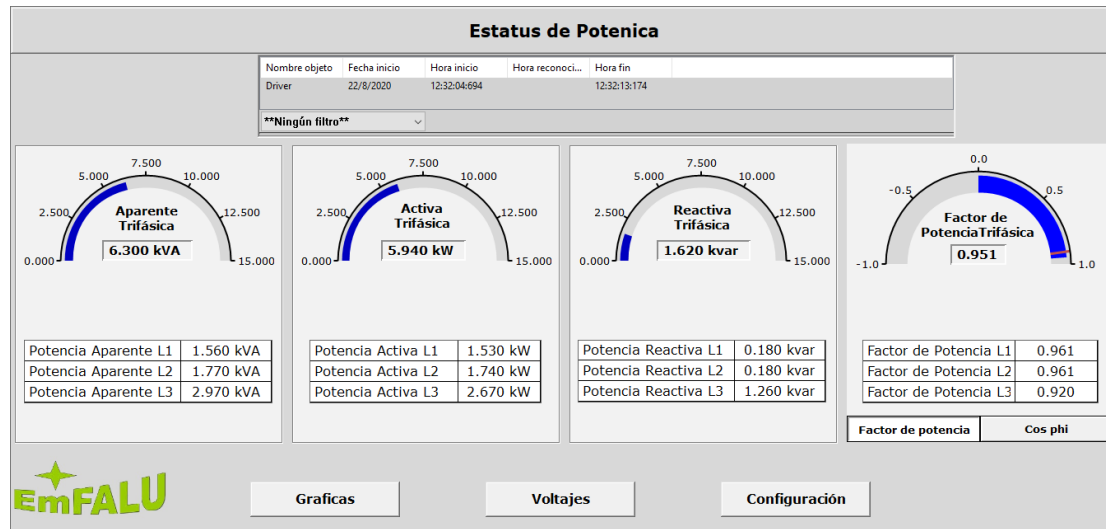
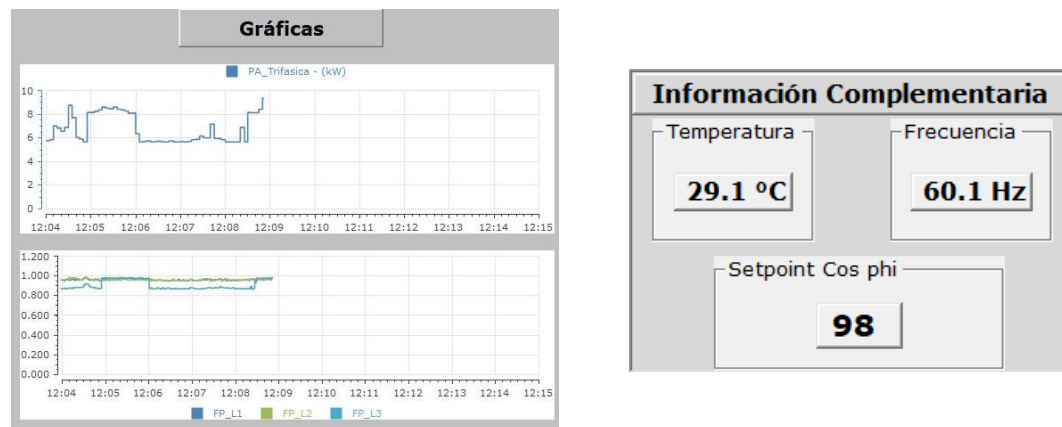


Figura 103

Pantallas adicionales



Con respecto al funcionamiento de la pantalla de potencia (Figura 102) no se evidencio ninguna anomalía, los parámetros medidos se registraron con total normalidad, lo mismo ocurrió con las pantallas emergentes: gráficas y configuración (Figura 103), en este caso se constató que el nivel de temperatura sea el adecuado es decir menor que 40°C con el fin de asegurar el funcionamiento óptimo de un día de trabajo de los capacitores, la Tabla 77 detalla en resumen la temperatura registrada.

Tabla 77

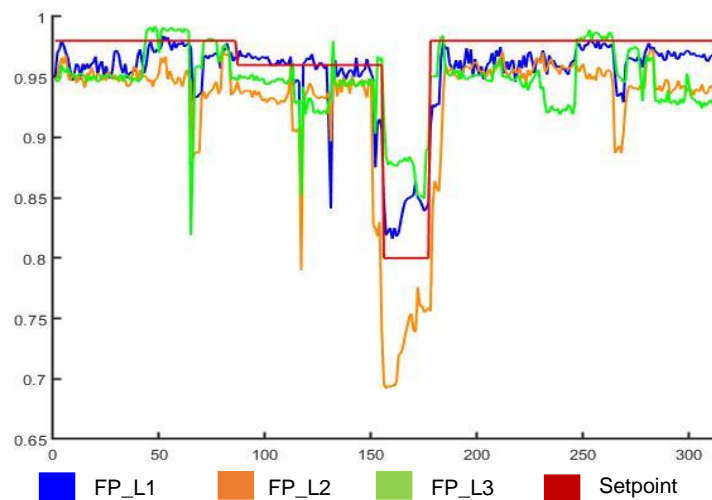
Resultados de la temperatura del controlador

	°C
Máximo	33
Mínimo	25
Promedio	29,63

Como se observa los valores medidos provienen del tablero de banco de capacitores y representa la temperatura interna del mismo el máximo valor registrado fue de 33°C y en promedio se obtuvo 29,63°C esto indica que no existe una temperatura elevada en los elementos internos que afecten el correcto funcionamiento del mismo además se está garantizando la temperatura idónea de trabajo de los capacitores que es 35°C en promedio (Lifasa, Condensador Cilíndrico Trifásico, 2020).

Figura 104

Variación del setpoint del FP



La última prueba que se realizó fue la variación del setpoint del FP en esta se comprobó que el dato enviado por la HMI llegue al controlador y se evidencie que este reacciona ante tal cambio, la Figura 104 representa el comportamiento que tiene el FP cuando cambia el setpoint como se observa, se parte del valor de 0.98 luego se cambia

a 0.96 y se evidencia que los valores siguen al setpoint, prueba de esto es el cambio a 0.80, ahí es cuando más evidente se ve que los FP de cada línea tratan de seguirlo, los valores registrados en dicho instante demuestran que el controlador dejó de operar y comenzó a registrar los FP propios del sistema sin corregirlos, es por eso que el FP_L2 y FP_L3 no caen debajo del setpoint sin embargo cuando se devuelve a 0.98 el sistema comienza a realizar la corrección y los FP suben haciendo el seguimiento adecuado al setpoint.

Capacitación y entrega del Sistema Automático para mejorar el Factor de Potencia en la empresa EMFALU

Finalizado el periodo de pruebas y toma de datos, el tablero está operativo además se realizó una capacitación sobre el funcionamiento y operación del tablero de banco de capacitores, en la charla se explicó sobre los elementos que lo conforman, la indumentaria necesaria que debe portar el encargado de mantenimiento, los pasos a seguir en caso de una falla, y sobre el mantenimiento preventivo que se debe realizar al tablero la evidencia de la charla es representada en la Figura 105

Figura 105

Capacitación realizada en EMFALU.



Manual de usuario

El manual de usuario junto con el Plan de Mantenimiento se encuentra redactado en el Anexo 7, en donde se encuentra los siguientes temas para el manejo del sistema:

- Introducción del sistema
- Seguridad
- Operación
- Configuración
- Alarmas
- Supervisión
- Mantenimiento
- Plano esquemático

Presupuesto Referencial

Con el fin de garantizar que la solución planteada sea la más adecuada se realizó un análisis económico de las diferentes alternativas de solución, especificadas en la Tabla 78 y se respaldan en el Anexo 8, estas alternativas nacen a raíz de que la empresa paga una multa en promedio de \$171.84 anuales por mantener un FP bajo

Tabla 78

Presupuesto de las alternativas de solución

Alternativa	Descripción	Valor
1) Diseño y construcción del sistema automático para la corrección del factor de potencia	Se propone realizar el estudio, adquisición diseño e implementación para la corrección el factor de potencia dentro de la empresa empleado un banco de capacitores.	\$1200

Alternativa	Descripción	Valor
2) Compra del (static var generation) SVG	Static Var Generator es la solución de compensación de potencia reactiva más precisa, para tanto en sistemas trifásicos desequilibrados como en instalaciones con reactiva inductiva y capacitiva. Se puede utilizar en instalaciones trifásicas industriales, comerciales o de servicios y no se afectado por los armónicos de la instalación.	\$11168

En el caso de la alternativa SVG es una alternativa más de carácter electrónico por los elementos empleados en su fabricación, pero tiende a ser sobredimensionada, ya que, si bien es perfecta para el uso en sistema desbalanceados, las prestaciones que este ofrece son en su mayoría innecesarias para los requerimientos de la empresa, pero se la toma en cuenta debido a que es necesario tener presente cada posible solución y realizar el respectivo análisis.

Con respecto a la alternativa uno se decidió realizar un contraste averiguando el valor de la implementación por parte de una empresa privada, la cual especifica que requiere un valor de \$ 1722,40 para implementar el sistema de corrección de factor de potencia mientras que la respuesta de otra empresa fue que no realizan sistemas de corrección de factor de potencia para las especificaciones enviadas.

Como se evidencia la mejor solución es realizar la implementación del sistema automático del factor de potencia mediante el uso de banco de capacitores garantizando el correcto desempeño y que logre mantener un factor de potencia de 0.96 para así lograr que la empresa EMFALU Cía. Ltda. no siga pagado las multas por bajo factor de potencia

Análisis de Resultados

Se realizó la conexión del Analizador de Red en la línea principal y se obtuvo un archivo de datos, los cuales fueron analizados en MATLAB, y se realiza una comparación con las curvas presentadas antes de la instalación del equipo.

Con respecto a las tensiones de fase se puede observar en la Figura 106 las fases se mantienen estables en el periodo de Plena Carga.

Se puede observar que en la Figura 33 existe una variación de tensión de 5.36%, dato tomado del análisis de la Tabla 12. Utilizando la ecuación (3.5), se puede calcular la variación de tensión, observando que el valor máximo de tensión se da en la fase 2 con 128.96[V], y un mínimo en la fase 1 con un valor de 124.612 (ver Tabla 79).

$$e\% = \left| \frac{127 - 128.96}{127} \right| * 100\%$$

$$e\% = 1.54\%$$

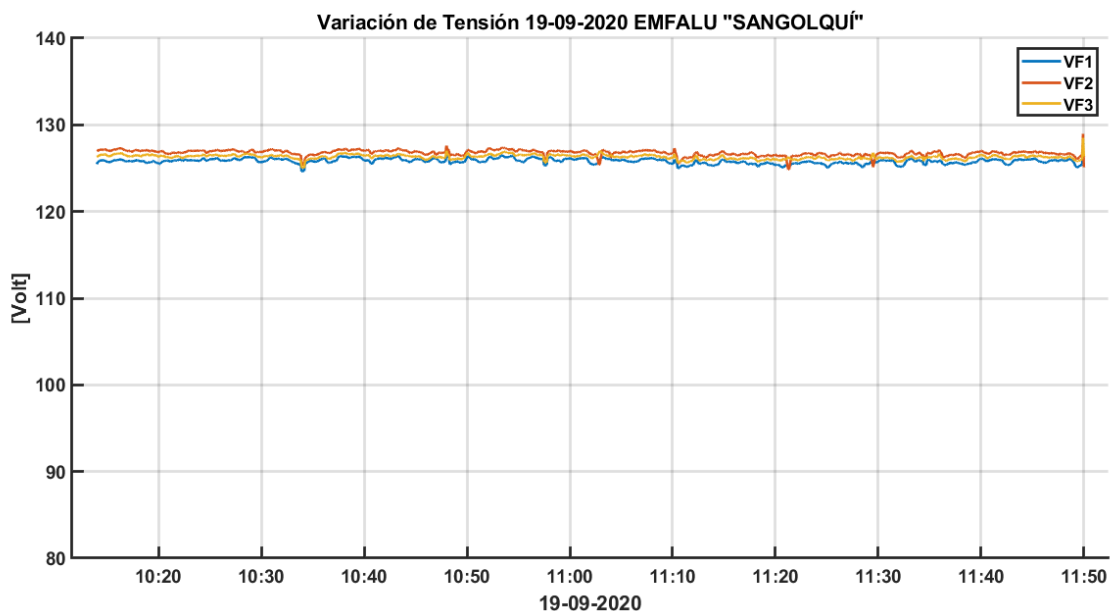
$$e\% = \left| \frac{127 - 124.612}{127} \right| * 100\%$$

$$e\% = 1.88\%$$

Se comprueba que el Sistema Automático para mejorar el Factor de Potencia estabiliza la tensión, dando una variación menor al 5%, garantizando el funcionamiento correcto de las máquinas conectadas en el sistema principal.

Figura 106

Tensiones de fase con el Sistema conectado 19-09-2020 EMFALU "Sangolquí"

**Tabla 79**

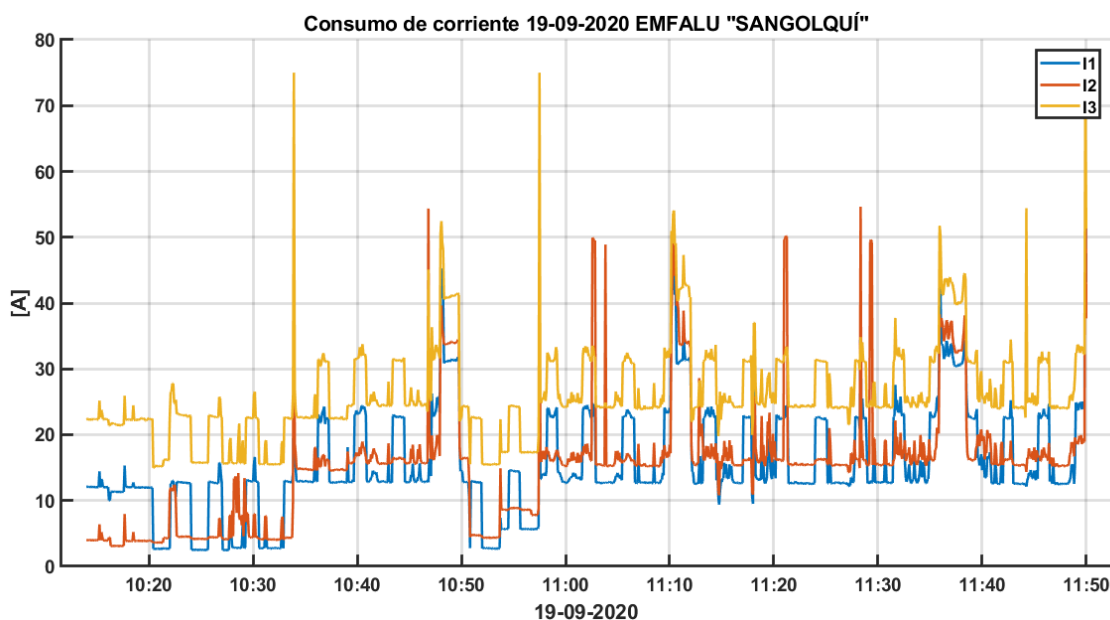
Variación de tensión con el Sistema Conectado 19-09-2020 EMFALU "Sangolquí"

PARAM.	V1 [V]	V2 [V]	V3 [V]
Máximo	127,856	128,961	128,5
Mínimo	124,612	124,848	125,008
Media	125,82	126,768	126,298
Sigma	0,3	0,323	0,256

Con respecto a la corriente se realizó la medición con la carga máxima en periodos de tiempo a lo largo de 1 hora y 30 minutos.

Figura 107

Consumo de corriente con el sistema instalado 19-0-2020 EMFALU "Sangolquí"

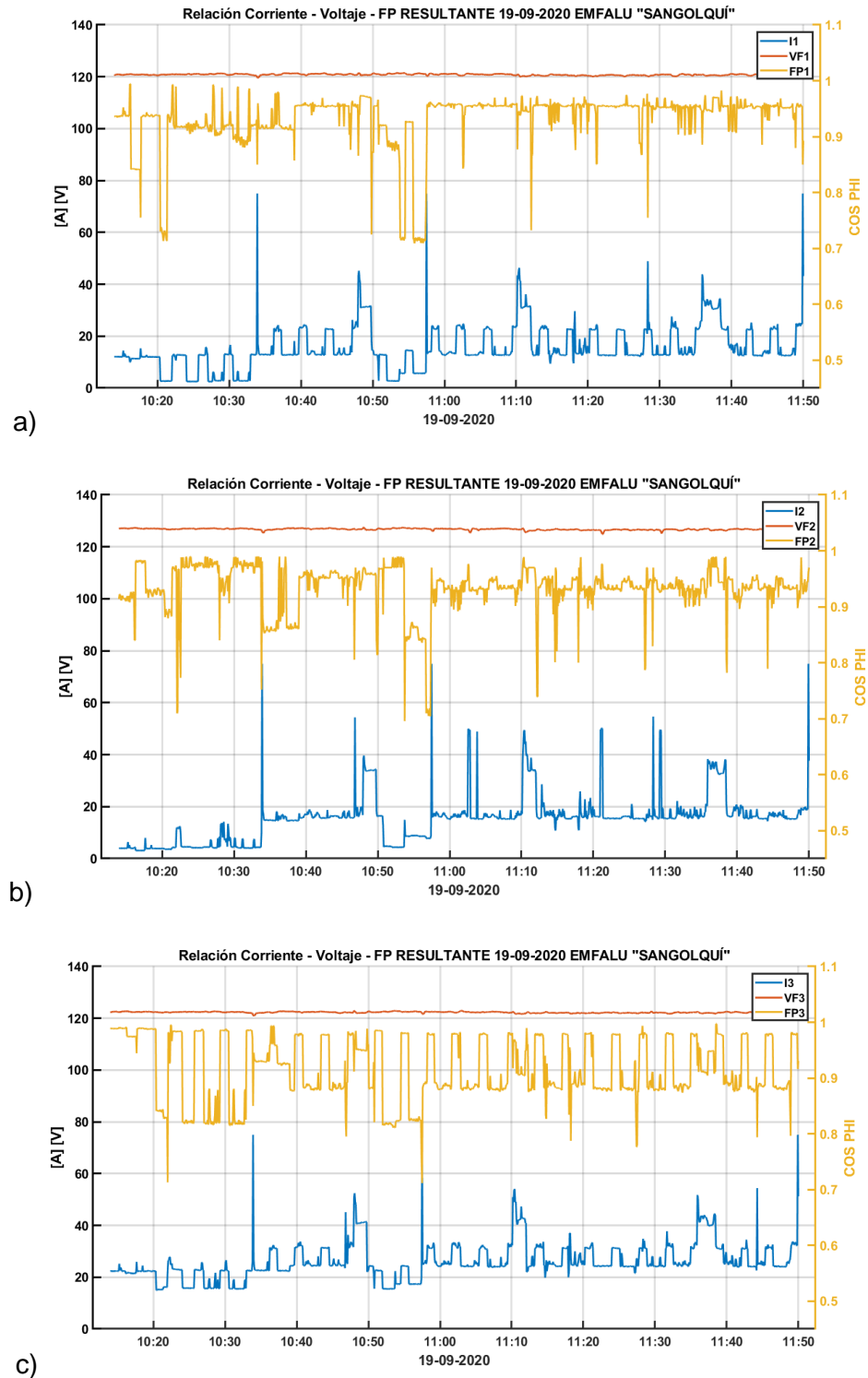


PARAM.	I1 [A]	I2 [A]	I3 [A]
Máximo	74,2	77,2	78,3
Mínimo	2,468	3,091	14,974
Media	15,568	15,228	26,192
Sigma	8,32	9,165	7,164

En la Figura 41 y en la Tabla 20 se pueden observar que los valores de corriente promedio son de 21.66[A] para la fase 1, 24.27[A] para la fase 2, 35.63[A] para la fase 3, las corrientes medias con el sistema automático instalado son menores, 15.568[A] para la fase 1, 15.228[A] para la fase 2 y 26.192[A] para la fase 3, esto es debido a que la potencia reactiva generada por el banco de capacitores disminuye el desfase entre la corriente y voltaje, por lo tanto el triángulo de potencias tiene un valor cercano en potencia activa y aparente (factor de potencia mejorado), ya que la potencia reactiva del sistema eléctrico es requerida en cantidades menores.

Figura 108

Relación entre Tensión, Corriente y Factor de potencia con el sistema instalado 19-09-2020 EMFALU "Sangolquí"



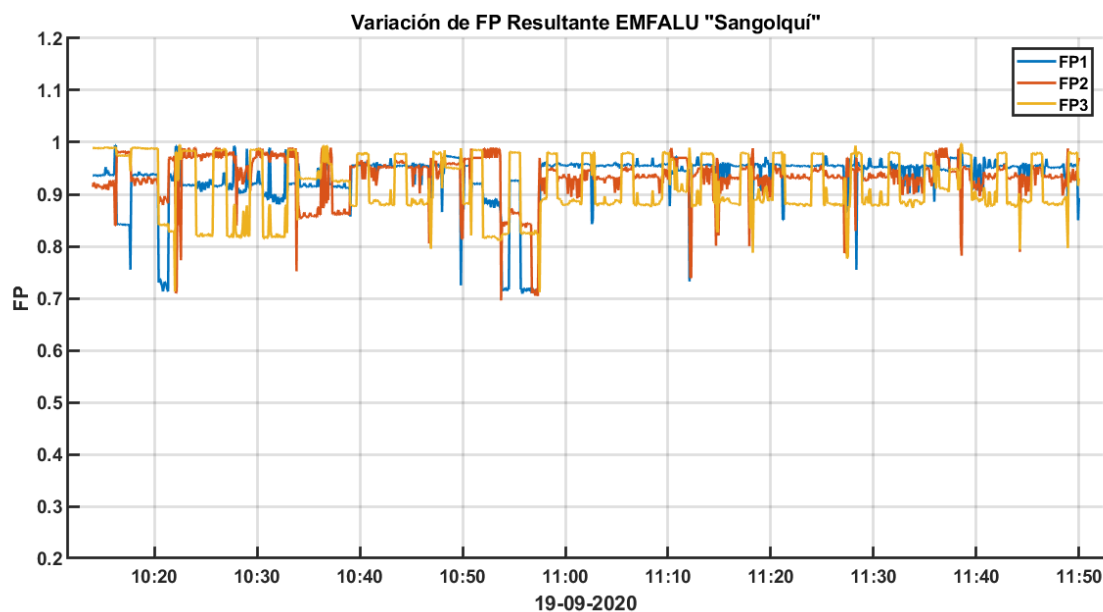
Para observar los resultados de manera más comprensiva se realiza una gráfica que relaciona la tensión, la corriente y el factor de potencia en el mismo instante en cada fase, con esto se logra observar cómo influye los cambios de consumo de corriente en el factor de potencia con el Sistema ya instalado (ver Figura 108)

El parámetro de mayor importancia a analizar es el factor de potencia, el Sistema instalado tiene el objetivo de mejorar este valor de manera automática, según la carga conectada en las líneas principales de la empresa, los datos adquiridos fueron por el Analizador de Red y por el Controlador cuyos datos son comunicados y registrados en la HMI de supervisión.

Figura 109

Variación del factor de potencia con el Sistema instalado 19-09-2020 EMFALU

"Sangolquí"



Se observa que gran parte de los datos registrados se encuentran en la sección de 0,9 a 1, que es el punto objetivo, los valores tabulados se observan en la Tabla 81. El valor de factor de potencia mínimos de 0,695, estos valores se dan cuando no existe la carga suficiente conectada para realizar una compensación, los bancos de

capacitores son de 2.5[kVAR]. Las cargas a compensar en la empresa son motores (sierra, extractor, compresor), las cuales necesitan de potencia reactiva para funcionar, el resto de cargas (computadoras, iluminación), necesitan valores bajos de potencia reactiva de la red, por lo que en ese instante no es adecuado compensar ya que si se conecta un paso del banco de capacitores, se tendría una sobrecompensación, teniendo un consumo no adecuado de corriente y un registro de potencia reactiva capacitiva lo cual causaría un bajo factor de potencia capacitivo, causando perturbaciones en el transformador de distribución instalado en la red de baja tensión.

El controlador en comunicación con una computadora envía los datos por MODBUS RTU, en la pantalla HMI de supervisión se pueden registrar estos datos, la variación del factor de potencia en el mismo periodo se observa en la Figura 110.

Figura 110

Variación del factor de potencia. Datos del controlador 19-09-2020 EMFALU

"Sangolquí"



Al interpretar se observan las mismas variaciones que con los datos mostrados con el Analizador de Red (Figura 109).

Los datos de factor de potencia deben estar en el rango entre 0.92 y 1, con una variación máxima de 0.4 y una media de 0.96 como se observa en la Figura 111.

La Figura 112 muestra la distribución del factor de potencia en las 3 fases, teniendo valores centrales entre 0.92 y 0.95, y su desviación en valores de 0.05 (ver Tabla 81) pero con menor cantidad de datos.

Figura 111

Distribución de FP objetivo

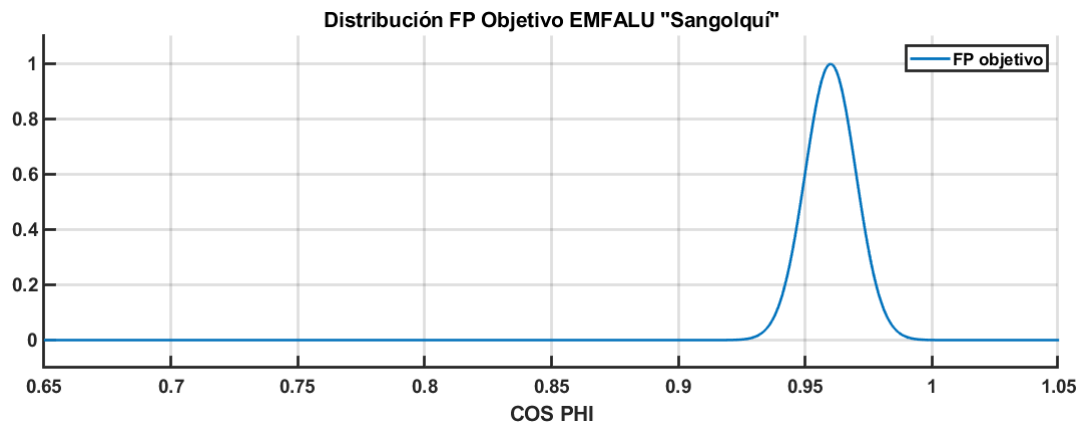
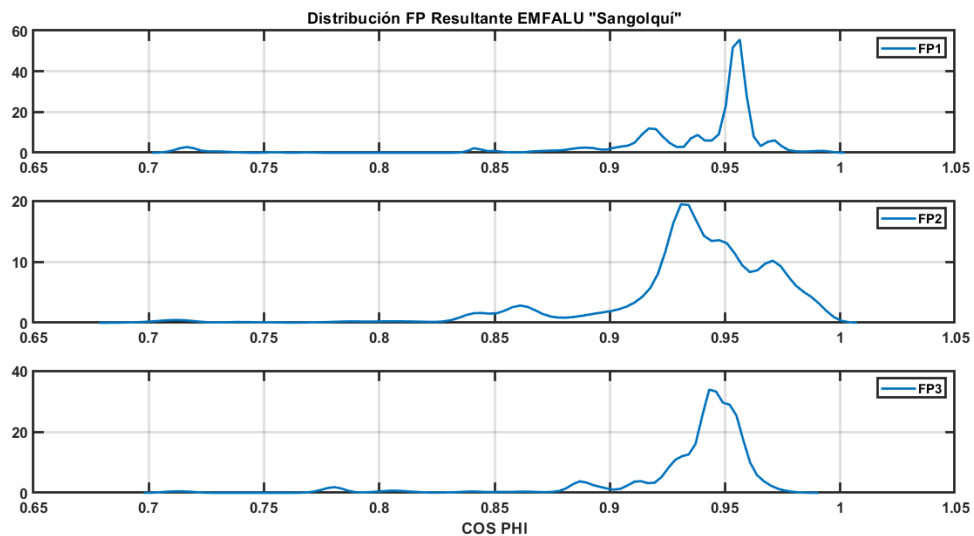


Figura 112

Distribución FP datos reales con el Sistema conectado 19-09-2020 EMFALU

"Sangolquí"



Al comparar los datos de la Tabla 80 y Tabla 81 se tiene las siguientes observaciones:

- El valor medio tiene un error menor al 5% en cada fase, se calcula con la ecuación.

$$e_1\% = \frac{FP_{medioobj} - FP_{medioreal}}{FP_{medioobj}} \times 100\%$$

Dónde:

$FP_{medioobj}$ = Factor de potencia medio objetivo

$FP_{medioreal}$ = Factor de potencia medio real

$$e_1\% = \frac{0.96 - 0.932}{0.96} \times 100 = 2.92\%$$

$$e_2\% = \frac{0.96 - 0.934}{0.96} \times 100 = 2.71\%$$

$$e_3\% = \frac{0.96 - 0.915}{0.96} \times 100 = 4.69\%$$

- Con la misma condición se da los resultados de error en la comparación de valores objetivos y valores reales tomados con el sistema automático instalado y se resumen en la Tabla 82.

Tabla 80

Factor de Potencia objetivo

PARAM.	FP
Máximo	1
Mínimo	0,92
Media	0,96
Sigma	0,04

Tabla 81

Factor de Potencia con el Sistema instalado 19-09-2020 "Sangolquí"

PARAM.	FP1	FP2	FP3
	[]	[]	[]
Máximo	0,994	0,989	0,997
Mínimo	0,708	0,695	0,711
Media	0,932	0,934	0,915
Sigma	0,051	0,042	0,057

Nota: Los valores presentados demuestran la variación de fp resultante

Tabla 82

Porcentaje de error entre valores objetivos y reales con el sistema conectado

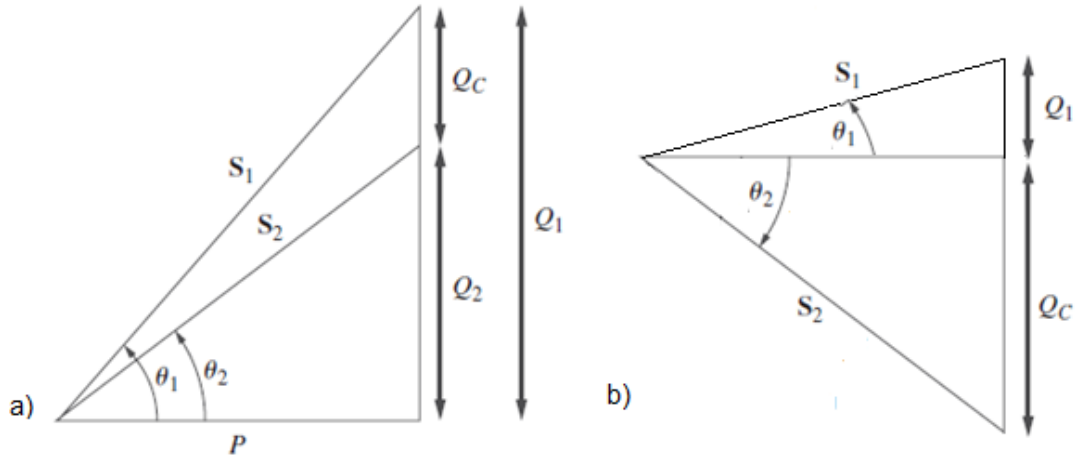
Parám.	FP obj	FP1	Error	FP2	Error	FP3	Error
			%		%		%
Máximo	1	0,994	0,60	0,989	1,10	0,997	0,30
Mínimo	0.92	0,708	23,04	0,695	24,46	0,711	22,72
Media	0.96	0,932	2,92	0,934	2,71	0,915	4,69
Sigma	0.04	0,051	27,50	0,042	5,00	0,057	42,50

Analizando el error en los valores mínimos se observa que se alcanza hasta un 24.46%, si se observa la Figura 109 y Figura 110, en el tramo de 10:52 a 10:58 horas se visualiza que el factor de potencia tiene valores menores al valor mínimo permitido, esto se debe a que en ese tramo del periodo de medida, (observar la Figura 107) los valores de corriente está en baja carga (ver Tabla 13), las cargas inductivas están desconectadas por lo que no es necesaria la generación de potencia reactiva por parte de los capacitores ya que si se accionan causarían un factor de potencia bajo y capacitivo, en la Tabla 18 el valor máximo de potencia reactiva a generar para un factor de potencia de 0.96 es de 1277 [VAR], el valor mínimo de un banco conectado en el sistema es de 2500 [VAR], si se acciona en baja carga, el valor de potencia aparente aumenta dando un resultado no favorable, es por esa causa que el controlador identifica esta etapa y desactiva sus salidas, hasta que exista la carga suficiente para que el sistema automático genere la potencia reactiva necesaria.

La Figura 113.a muestra la reducción del ángulo (θ) que representa al factor de potencia, cuando la potencia reactiva generada es menor a la potencia reactiva inductiva por parte de las cargas, mientras que la Figura 113.b muestra como el ángulo (θ) aumenta si la potencia reactiva generada es mayor a la potencia reactiva inductiva conectada.

Figura 113

Triángulo de potencia a) QC menor a Q1, b) QC mayor a Q1



Los valores de potencia reactiva generada en datos reales están tabulados en la Tabla 85, un dato relevante es el valor de sigma, que muestra la variación estándar en los datos y se observa que la resolución es de 2145.63 [VAR] a 2612.13 [VAR] que coincide con el paso mínimo de un banco que representa un valor promedio de 2500 [VAR], en la Tabla 83, la variación para tener un seguimiento preciso al set point es de 895.874 a 1726.54 [VAR].

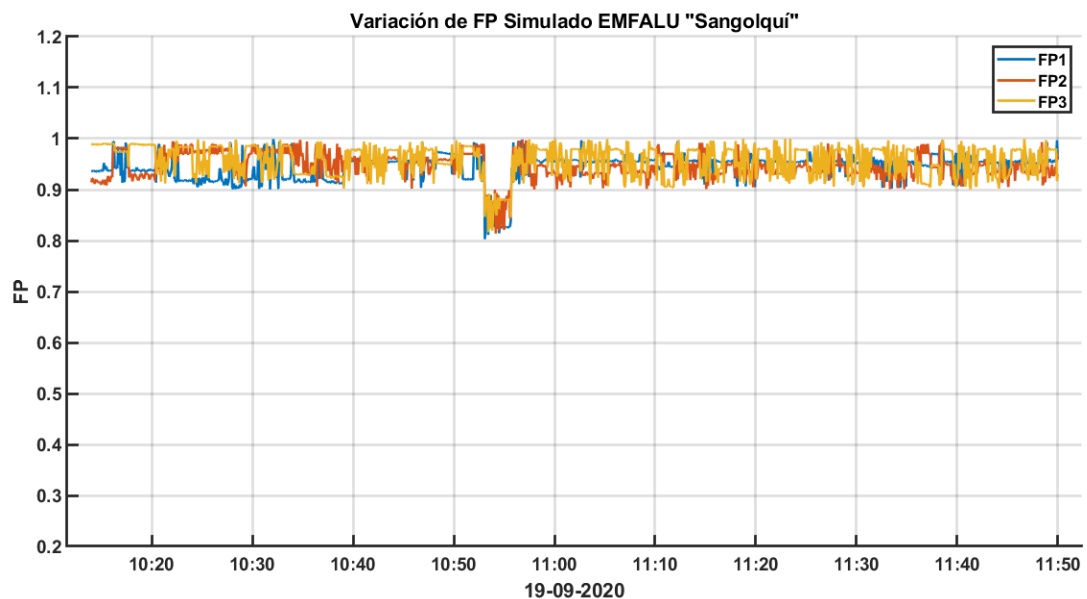
Los valores de bancos de capacitores comerciales en el país para una tensión de 240[V] y 60 [HZ] es de 2500 [VAR] es por este criterio que el diseño se establece en un rango de factor de potencia mas no en un valor fijo, es decir el set point para este sistema automático varía entre 0.92 y 1, si el controlador se configura con el factor de potencia de 0.96, el sistema diseñado en el rango de plena carga controla el factor de potencia en valores de 0.92 a 1. Para tener un valor fijo de factor de potencia se requiere de actuadores que generen potencia reactiva variable o pasos fijos de menor potencia (sigma en la Tabla 83) o el uso de electrónica de potencia para el tratamiento de señales, pero estas soluciones no son viables para este caso ya que no cumple con

el criterio de costo beneficio, ya que el uso de equipos SVG (static var generator), se usan en casos de distorsión armónica considerable y consumos de corrientes grandes, es decir en sistemas centrales de distribución (subestaciones), o en centros de alto consumo (empresas grandes).

Para tener una comparativa de valores reales con calculados se procede a realizar un vector de potencia reactiva generada con un valor medio de 4481.66 [VAR] y 1131.66 [VAR] de desviación (sigma), que es la resolución, es decir simular que se aplican bancos de capacitores con pasos de 1131.66 [VAR].

Figura 114

Simulación con Banco de Capacitor paso de 1131.66[VAR]



La Figura 114 muestra la variación del factor de potencia si se implementa el sistema con capacitores de 1134.66 [VAR], que es la resolución calculada, en comparación con los datos reales (resolución de 2315.2[VAR]), se tiene un seguimiento con mayor precisión, teniendo un valor medio de 0.9451 que da un error de 1.55% del set point.

$$e\% = \frac{0.96 - 0.9451}{0.96} * 100\%$$

$$e\% = 1.552\%$$

Tabla 83

Parámetros de FP en Simulación con banco de capacitor de 1131.66[VAR]

PARAM.	FP1	FP2	FP3
	[]	[]	[]
Máximo	0,999	0,998	0,997
Mínimo	0,8025	0,8138	0,8164
Media	0,9446	0,9451	0,9574
Sigma	0,026	0,025	0,03

Tabla 84

Potencia reactiva generada valores calculados

POTENCIA DE CAPACITORES TRIFÁSICOS OBJETIVO [VAR]					
FP	0,92	0,94	0,96	0,98	1
Máximo	5877,494	6581,23	7398,52	8468,738	10921,305
Mínimo	1449,164	1877,82	2336,52	2745,34	3667,709
Media	3447,89	3933,08	4481,66	5163,56	6726,24
Sigma	895,874	999,024	1131,35	1311,66	1726,54

Tabla 85

Potencia reactiva generada Datos reales

POTENCIA REACTIVA GENERADA DATOS REALES [VAR]					
FP	0,92	0,94	0,96	0,98	1
Máximo	5124,36	6945,32	7294,52	9975,95	10126,32
Mínimo	1124,56	1356,32	1432,52	1652,96	2613,24
Media	2154,32	2564,31	2765,32	5167,97	7195,3
Sigma	2145,63	2245,69	2315,2	2432,61	2612,3

La pantalla del controlador muestra en tiempo real los parámetros eléctricos que influyen en el sistema de compensación en modo RUN (2), en la Figura 115 se muestra los parámetros de Potencia activa (4), Potencia reactiva (5), Factor de potencia (6),

Tensión de línea del sistema (7), y sus 4 pasos de banco de capacitores conectados (1) en máxima carga, el porcentaje de potencia reactiva generada se muestra en las barras analógicas (3).

Figura 115

Pantalla principal del Controlador LIFASA con el sistema conectado 19-09-2020

EMFALU "Sangolquí"



Capítulo V

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

Las empresas públicas de distribución eléctrica cumplen con requisitos de calidad de energía, en donde los valores de tensión deben ser estables y la corriente suficiente para garantizar el funcionamiento de cargas en los consumidores. Cuando existe un uso ineficiente de la energía eléctrica existe penalizaciones, en el caso del factor de potencia registrado (FP_r) se penaliza si su valor es menor a 0.92. Para el caso de la pyme EMFALU Cía. Ltda. al tener un factor de potencia medio registrado en 18 meses de facturación desde 25/07/2018 a 24/12/2019 de 0.82 (ver Tabla 58) se paga un recargo adicional que se calcula con la factura por servicio público de energía eléctrica inicial ($FSPEE_i$) por el factor de penalización (B_{FP}). Se procede a establecer un método de solución para mejorar el valor de factor de potencia de manera automática en base a un análisis eléctrico realizado en las instalaciones de la pyme.

El analizador de red diseñado para este proyecto se basa en mediciones de tensión y corriente realizadas en las instalaciones de la pyme con instrumentos de medida (Pinza amperimétrica CAMSCO CAS 87 400 [A] 450[V]) con el objetivo de registrar la corriente máxima de consumo, para el local de “Sangolquí” se registró un pico de corriente de 120[A], por lo que los sensores deben tener la capacidad de medir el ángulo de desfase entre tensión y corriente hasta esos valores, por lo tanto se diseña un Analizador de Red Trifásico de 127/210 [V] y 150[A], el cual se conectó a las líneas principales de energía y se tomó datos en un periodo de 7 días a las variables que influyen en el sistema de mejora para el factor de potencia.

La cantidad de datos registrada es de 720 por hora, un total de 120960 datos registrados para cada variable tomada en un periodo de 7 días, el tiempo de muestreo se basa en la funcionalidad de la carga instalada, la pyme realiza tratamiento de madera por lo que su maquinaria realiza corte, laminado, perforado, en base al trabajo realizado por motores trifásicos de inducción, la Sierra vertical 1255 tiene su motor conectado en vacío hasta que se realiza el corte que no dura más de 30 segundos para cortes de 1 metro de longitud, es ese instante la corriente de consumo y el FP varían y esas variaciones deben ser registradas para ver los instantes de compensación por parte del sistema automático, el retardo de toma de datos se diseñó en 5 segundos para registrar todas las variaciones que provocan las cargas en su funcionamiento.

En el Análisis monofásico se identificó que la fase 3 en el local “Sangolquí” tiene un desfase de 12 [A] en promedio con la fase 1 y 2, las cargas instaladas no siguen un patrón de accionamiento, es aleatorio, por lo que en cada periodo analizado se necesita de un valor diferente de potencia reactiva generada, se observa tres periodos de carga: plena carga (corriente media de 30[A]), baja carga (corriente media de 10[A]) y nocturno (con una corriente media de 2[A]) ver Tabla 13 y Tabla 20, la potencia generada para un factor de potencia de 0.96 debe ser 1345.82, 1720.69, 1849.816 [VAR] en la fase 1, 2 y 3 respectivamente, los bancos de capacitores generan potencia reactiva trifásica, es decir generan un valor equilibrado para cada fase, y se debe establecer un valor medio que no afecte a las fases que necesitan de mayor o menor compensación de potencia reactiva.

En el análisis trifásico a un sistema equilibrado se determina cual sería el resultado si se realiza el diseño tomando en consideración las características propias de este sistema, el banco de capacitores requerido para un factor de potencia de 0.96 da un valor de 3665.91, 4593.42, y 5185.66 [VAR] con el sistema está equilibrado a la fase 1, 2 y 3 respectivamente (Tabla 49), si se coloca la potencia reactiva con respecto a la

fase 1, la fase 2 y fase 3 se descompensan a valores de 927.51 y 1519.75 [VAR], afectando al factor de potencia a valores menores de 0,92 en la fase 3. Por lo tanto, se establece un análisis para encontrar un valor medio para tener un rango en el punto objetivo del factor de potencia, en este análisis se establece que el set point o punto fijo es un rango de 0.92 a 1 los valores establecidos se observan en la Tabla 52.

En el sistema no equilibrado se realiza un promedio de máxima y mínima compensación, como se puede ver en la Tabla 53, tomando en cuenta que el valor mínimo de generación es de 2.5 [kVAR] en los bancos de capacitores trifásico comerciales en el país, por lo que el análisis se llevó a datos reales. En los datos calculados se establece una variación estándar de 1.31 [kVAR] para un factor de potencia de 0.96, para que el control a un punto fijo sea preciso. Se realizó el cálculo para encontrar los valores límites en los cuales el factor de potencia varíe de 0.92 a 1, y se establece un valor mínimo de 2647.71 [VAR] y máximo de 9349.76 [VAR], en datos reales se establece una medida mínima de 1652.96 [VAR] y máximo de 9975.95 [VAR]. Estableciendo con esto que cada paso del sistema de actuadores es de 2500 [VAR] para el valor mínimo y de 10000 [VAR], en 4 pasos para el máximo. Ver Figura 69

Se logró mejorar el factor de potencia de la pyme EMFALU Cía. Ltda., en el periodo de plena carga el FP mejora de 0.81 que se tenía inicialmente a 0.997 cuando el set point está en 0.98 (Tabla 81) y se mantiene en un valor medio de 0.934 (controlador LIFASA) y 0.94 (medidor industrial público) teniendo en cuenta que el sistema automático no genera potencia reactiva cuando existe baja carga, en ese periodo consume potencia reactiva de la empresa pública de distribución, por lo que los valores del FP bajan hasta 0.695. Este sistema de control automático implementado es en lazo cerrado, siendo los transformadores de corriente conectados en las líneas principales de energía eléctrica de la pyme, los que miden la variación de la señal para

controlar la acción sincronizada del banco de capacitores que tienen el valor de 10 [kVAR] en 4 pasos de 2.5 [kVAR].

Mantener el factor de potencia al mínimo no es recomendable, dado que el sistema presenta armónicos que lo afectan notablemente en especial en condiciones de baja carga, es por esa razón que el sistema se diseña para que los valores de factor de potencia sigan una distribución normal con una media en 0.96 y una desviación de 0.04 (Figura 111), es decir el rango en el cual se diseña es de 0.92 como mínimo a 1 como máximo, la Tabla 82 se muestra que el porcentaje de error en valores máximos y medios es menor al 5%, mientras que para valores mínimos llega hasta el 24.46%, debido a que el sistema automático en baja carga no genera potencia reactiva sino que las cargas instaladas la consumen de las líneas de alimentación eléctrica de la empresa pública.

Los valores de voltaje antes de instalar el sistema tenían una variación del 5.36%, 120.19 [V] (ver Tabla 12), una vez instalado el sistema se tiene una variación del 1.88% 124.612 [V] (Tabla 78), se logra mantener a la tensión estable en los arranques del Compresor Schulz de 10 HP y el sistema de extracción, con la acción de los bancos de capacitores conectados en el periodo de plena carga.

Al realizar un análisis de armónicos se determinó que la pyme no presenta problemas en el THD voltaje dado que el valor promedio es de 1,53% de las tres líneas valor el cual es menor al recomendado por la (ARCONEL, 2018), sin embargo al revisar los THD de corriente es evidente la distorsión que presenta la pyme, llegando a registrar valores máximos superiores al 20%, si bien estos valores se cuentan en el rango de lo permitido (Tabla 76), son el motivo principal por el cual la pyme presenta un bajo FP.

Se logró implementar una red industrial basada en el protocolo Modbus RTU con la finalidad de crear una comunicación con el sistema de monitoreo, este sistema fue diseñado y tiene la capacidad de recolección y visualización de los datos de consumo

de la empresa así como llevar un registro de la variación del FP existente de la misma la cual como se evidencia Figura 102 y Figura 103.

Recomendaciones

La generación de potencia reactiva no debe ser por parte de la empresa de distribución pública, sino que cada empresa (pyme o grande) debe generarla para las cargas inductivas que este instalada en su sistema eléctrico, además de garantizar los parámetros de calidad de energía en valores de tensión y distorsión armónica.

Se debe plantear un proceso de análisis según a que se dedique cada empresa, ya que la carga instalada en la pyme, establece el método para mejorar el bajo factor de potencia que puede ser por cargas inductivas, por distorsión armónica o combinación de las dos. Se debe analizar la red eléctrica en un periodo en el cual se de todos los casos posibles que afecten a la red y obtener los valores para realizar un análisis correcto.

En el transcurso del desarrollo del proyecto se observó que el tema en calidad de energía no es conocido en el país, se notó en la falta de marcas y productos que ayudan a mejorar estos factores, el país está limitado a pocas empresas que distribuyen o realizan estudios o análisis a este tipo de problemática. Es labor de las universidades y docentes impulsar estas investigaciones con el fin de usar la energía eléctrica de manera adecuada en el sector industrial, comercial y residencial.

Existen puntos en los cuales el factor de distorsión armónica THD es considerable, por lo que se debe realizar un análisis para implementar un sistema que disminuya este factor, el sistema implementado en la pyme EMFALU Cía. Ltda. se centró en el principal causante de un bajo factor de potencia que son las cargas inductivas, sin embargo, la distorsión armónica también afecta al sistema eléctrico, pero en valores bajos 6,18%.

El sistema está limitado a funcionar en el periodo de plena carga, cuando existe poca carga conectada el sistema pasa a un estado de espera, en el cual se consume potencia reactiva de la red pero en valores bajos, sin embargo esto afecta al valor de factor de potencia registrado, se recomienda realizar un análisis a profundidad en el periodo de baja carga para evitar consumir Q de la empresa eléctrica pública o para comprobar que en ese periodo el THD es el que afecta a la red eléctrica y mejorarlo con procesos de electrónica de potencia para baja carga. Los procesos de generación de potencia reactiva por electrónica de potencia si existen, pero para grandes consumidores, sobre 30 [A] de distorsión armónica (Static Var Generator LIFASA), se aconseja estudiar este método para aplicarlo en pymes de baja carga.

Previo a la comunicación es necesario revisar el manual del fabricante y verificar la trama de comunicación (ya sean enviadas como recibidos) no se exceda la cantidad de bytes permitidos en este caso MASTER 6 la trama máxima es de 80 bytes, en caso de que no exista comunicación debido a que se excedió la trama, se debe establecer diferentes intervalos de muestreo con el fin de poder crear varias tramas para solicitar la información.

Verificar que los datos provenientes del controlador coincidan con los que llegan a la HMI, ya que pueden existir problemas de interpretación por parte de la interfaz, por ejemplo en las pruebas realizadas se observó que un valor requería de 3 puntos decimales para que el valor coincida con la unidad marcada, ese fue el caso de la potencia activa el valor que llegaba inicialmente era de 5940 kW, sin embargo ese consumo no era el correcto, al adicionar los tres puntos decimales el valor paso a 5.940 KW, este valor si era el correcto y el mismo que se visualizaba en la pantalla del controlador.

Referencias bibliográficas

- Abaurrea, M. D. (2008). Sistema de medición de consumos eléctricos. (*Tesis de ingeniería*). Universidad de Sevilla, Sevilla. Obtenido de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11676/direccion/Volumen+1%252F>
- Arcila, J. D. (2010). Armónicos en Sistemas Eléctricos. *Ingeniería Especializada IEB S.A.*, 1-26. Obtenido de <http://www2.elo.utfsm.cl/~ipd411/archivos/apuntes/>
- ARCONEC. (2018). *Pliego tarifario de las empresas eléctricas de distribución*. Quito.
- ARCONEC. (2018). *Regulación Eléctrica*. Quito. Obtenido de <https://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2019/03/053-18-Proyect-Regulac-Sustitutiva-a-Reg-N-CONELEC-004-01-Calidad-del-servicio-de-dist-y-comercializaci\u00f3n-de-EE.pdf>
- Arcos, E., & Chicaiza, D. (2015). Diseño y construcción de un tablero automático para la corrección del factor de potencia, empleando un módulo DCRA. (*Tesis de tecnología*). Escuela Politécnica Nacional, Quito. Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/10583/1/CD-6261.pdf>
- Barrera, J. (2016). Monitor de energía eléctrica con interface inalámbrica para sistema monofásico. (*Tesis de ingeniería*). Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira.
- Bohórquez, E., Prado, E., & Ramirez, M. (Agosto de 2019). Implementación de la norma ISA 101, sobre las HMI, pertenecientes a los módulos de instrumentación de la Universidad ECCI. *SEMINARIO INTERNACIONAL*.
- Channappanavar, R., & Mishra, S. (2016). Current sensorless power factor correction circuit using FPGA. *2016 IEEE International Conference on Power Electronics, Drivers and Energy Systems (PEDES)*, 1-6.
- CHINT. (2016). Catálogo Técnico Seccionadores y Conmutadores. Madrid, España.

- CIRCUTOR. (2013). *Procedimientos para el estudio y análisis de perturbaciones armónicas*. España. Obtenido de <http://circutor.es/es/documentacion-es/empresa/597-procedimientos-para-el-estudio-y-analisis-de-perturbaciones-armonicas>
- Circutor. (20 de Junio de 2017). Obtenido de Circutor: <http://docs.circutor.com/docs/M98236601-01.pdf>
- CONELEC. (23 de Mayo de 2001). *Calidad del servicio eléctrico de distribución*. Obtenido de conelec.gov.ec: <https://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/02/Regulacion-No.-CONELEC-004-01.pdf>
- Cuevas, P., & Lozano, J. (2017). Medidor inteligente de energia electrica (smart meter). *Jovenes en la Ciencia*, 2603-2607.
- EEQ. (28 de Febrero de 2014). *Sistemas de Gestión de Calidad*. Quito, Pichincha, Ecuador.
- Eltayeb, K., Hamza, M., & Babiker, S. (2018). Displacement power factor correction using firing and extinction angle control. *2018 International Conference on Computer, Control, Electrical, and Electronics Engineering (ICCCEEE)*, 1-5.
- Empresa Eléctrica Quito SA. (2014). *Normas para sistemas de distribución*. Quito.
- Fu, Z., & Wang, Z. (2017). Long Term Effect of Power Factor Correction on The Industrial Load: A Case Study. *2017 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, 1-5.
- Garza Correa, C., Martínez Hernández, R., & Ramón Molina, S. (2008). Análisis de Factibilidad Técnica y Económica de Corrección de Factor de Potencia con Banco de Capacitores Distribuidos en Valeo Sistemas Electrónicos S. DE R.L. de C.V. (*Tesis de Ingeniería*). Centro de Investigación en Materiales Avanzados, México.

- Gobierno Nacional de la República de Ecuador. (2013). *Instalaciones Electromecánicas*. Quito. Obtenido de <https://www.ecp.ec/wp-content/uploads/2017/09/NECINSTALACIONESELECTROMECHANICAS2013.pdf>
- Grainger, J., & Stevenson Jr, W. (1996). *Análisis de sistemas de potencia*. Mexico: MCGRAW-HILL.
- Grupo Elecond. (2018). Corrección del factor de potencia. *Ingeniería Eléctrica*, 12-14. Obtenido de https://www.editores-srl.com.ar/sites/default/files/ingeniera_electrica_330_abril_2018-BAJA.pdf
- Guashco Rubio, M. (2015). Desarrollo de una aplicación informática para la determinación de las pérdidas técnicas en potencia y energía en alimentadores primarios. (*Tesis de ingeniería*). Universidad de Las Fuerzas Armadas ESPE - Latacunga, Latacunga.
- Hurtado, A. (20 de Enero de 2018). Obtenido de Eeymuc: <https://www.eeymuc.co/31-protocolo-modbus/>
- IEC 61000. (28 de Septiembre de 2018). *¿Qué es la norma IEC 61000-4-30?* Obtenido de Schneider Electric.com: <https://www.se.com/es/es/faqs/FA134674/>
- IEEE SA. (11 de Junio de 2014). *Estandar 519*. Obtenido de iee.org: <https://standards.ieee.org/standard/519-2014.html>
- ISO 50001. (20 de Junio de 2018). *¿Qué es la ISO 50001?* Obtenido de isotools.org: <https://www.isotools.org/normas/medio-ambiente/iso-50001>
- Izurieta, H. (2015). Estudio para la implementación de banco de capacitores en el campus de la Universidad Católica de Santiago Guayaquil. (*Tesis de ingeniería*). Universidad Católica de Santiago Guayaquil, Guayaquil. Obtenido de <http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/4724/1/T-UCSG-PRE-TEC-IEM-65.pdf>

- Kabir, Y., Mohsin, M., & Khan, M. (2017). Automated power factor correction and energy monitoring system. *2017 Second International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT)*, 1-5.
- Laketic, N., Radakovic, J., & Majtal, Z. (2017). Power factor correction of electric arc furnace using active and passive compensation. *19th International Symposium Power Electronics (Ee)*, 1-6.
- Landisgyr. (19 de Septiembre de 2012). *www.landisgyr.com*. Obtenido de Medición Comercial e Industrial: https://www.landisgyr.com/webfoo/wp-content/uploads/2012/09/CI_Meter_Brochure-Spanish-1.pdf
- Lifasa. (20 de Febrero de 2018). *Lifasa Controller MASTER*. Obtenido de <https://lifasa.com/producto/master/>
- Lifasa. (2020). Condensador Cilíndrico Trifásico. España.
- Lifasa. (2020). Contactor para condensador KML. España.
- Llumiquinga Loya, F. (2012). Diseño de un banco de condensadores para la corrección del factor de potencia de la empresa BANCHISFOOD S.A. (*Tesis de ingeniería*). Universidad Politécnica Salesiana, Quito.
- Matthew, S., & Charles, A. (2006). *Fundamentos de circuitos eléctricos*. México: McGRAW-HILL.
- Méndez, J. (2014). Corrector de factor de potencia reductor-elevador monofásico. *Tesis de Ingeniería*. Universidad de las Américas Puebla, México. Obtenido de http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lep/mendez_s_j/
- Moya, S. (12 de Diciembre de 2019). <https://www.isamex.org>. Obtenido de InTech: <https://www.isamex.org/intechmx/index.php/2019/02/12/caracteristicas-del-estandar-ansi-isa-101-01-2015-interfaces-humano-maquina-para-sistemas-de-automatizacion-de-procesos/>

- Muñoz, R. (2016-2017). Diseño y montaje de un analizador de redes trifásico mediante un microcontrolador arduino, programación de una HMI y comunicación del sistema mediante modbus - aplicación a una microrred basada en energías renovables. (*Tesis de ingeniería*). Universidad Politécnica de València, Valencia.
- Obregón, D., & Zeas, J. (2018). Simulación y automatización de control de potencias reactivas para mejoramiento del factor de potencias. (*Tesis de ingeniería*). Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/15615/1/UPS-GT002156.pdf>
- Openenergy. (2 de Agosto de 2017). *openenergymonitor*. Obtenido de <https://learn.openenergymonitor.org/electricity-monitoring/ct-sensors/interface-with-arduino>
- Paéz, E. (2006). Estudio de factibilidad para la aplicación de la tecnología broadband over power line BPL usando la infraestructura de la red de distribución de las subestaciones San Rafael y Sangolquí de la Empresa Eléctrica Quiro. (*Tesis de ingeniería*). Escuela Politécnica Nacional (EPN), Quito. Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/47/1/CD-0011.pdf>
- Pere, A. (2013). Diseño de Pantalla HMI. *Diseño Industrial*. Barcelona, España.
- Pérez, M. (2006). Estudio, diseño y construcción de un prototipo, de un sistema difuso para control de banco de capacitores para mejorar el factor de potencia. (*Tesis de Ingeniería*). Universidad de Las Fuerzas Armadas ESPE - Latacunga, Latacunga.
- Quintoarmonico. (17 de Junio de 2017). *quintoarmonico.es*. Obtenido de Diferencias entre $\cos\phi$ y Factor de Potencia: <https://quintoarmonico.es/2008/07/17/diferencias-entre-cosphi-y-factor-de-potencia/>

- Recursos. (29 de Octubre de 2018). *Tecnologiaparalaindustria*. Obtenido de <https://tecnologiaparalaindustria.com/sistema-de-monitoreo-de-consumo-de-energia-de-activos-industriales/>
- Ribas, J. (10 de Junio de 2015). *dissenyproducte*. Obtenido de <https://dissenyproducte.blogspot.com/2015/09/el-factor-de-potencia-en-las.html>
- Roman Loera, L., Flores, L., Rizo Diaz, J., & Arambula Miranda, L. (2008). Current sensorless predictive algorithm control for three-phase power factor correction. *2008 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, 635-658.
- Schneider. (2018). *igss.schneider-electric*. Obtenido de IGSS: <http://igss.schneider-electric.com/products/igss/download/free-scada.aspx>
- Schneider. (23 de Abril de 2019). Obtenido de se.com: https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=User+guide&p_File_Name=RT6+user+manual.pdf&p_Doc_Ref=RT6+user+manual
- Schneider Electric. (2008). Power factor correction and armonic filtering. *Electrical instalation guide*.
- Trujillo, E. (s.f.). Analizador de consumo de potencia eléctrica con arduino. (*Tesis de Ingeniería*). Universidad Carlos III de Madrid, Madrid .
- WEG. (13 de Enero de 2016). *weg: institutional EC*. Obtenido de <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h6d/h2b/WEG-cfw100-manual-modbus-rtu-10002909577-manual-espanol.pdf>
- Yero, W., Ramírez, J., Rosa, L., & García, P. (2018). Monitoreo, control y diagnóstico en bancos de capacitores automáticos en baja tensión. *Ingeniere*, 28-42.

Anexos

- **Anexo 1:** Esquemático
- **Anexo 2:** Sinóptico de cableado
- **Anexo 3:** Código Arduino
- **Anexo 4:** Código Matlab
- **Anexo 5:** Análisis PAJ
- **Anexo 6:** Direcciones Modbus
- **Anexo 7:** Manual de Usuario
- **Anexo 8:** Facturas