

CIATEQ, A. C. Centro de Tecnología Avanzada
Gerencia de Posgrado



Diseño de un sistema de control para mejorar la calidad de la energía en tarifas (GDMTH) con base en un analizador de redes y software de simulación de sistemas eléctricos

TESIS QUE PRESENTA

M. C. Virgilio Alfonso Murillo Rodríguez
Asesor: Dr. Noé Villa Villaseñor

Para obtener el grado de

Doctor en
Manufactura Avanzada

Aguascalientes, Ags.
noviembre, 2023

CARTA DE LIBERACIÓN DE LOS ASESORES



GOBIERNO DE
MÉXICO



CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS



CIATEQ

Zapopan, Jalisco, 27 de septiembre de 2023.

Mtro. Geovany González Carlos
Gerencia de Posgrado
CIATEQ, A.C.

Los abajo firmantes, miembros del Comité Tutorial del M. C. Virgilio Alfonso Murillo Rodríguez, una vez revisado su Proyecto Terminal de tesis, titulado "Diseño de un sistema de control para mejorar la calidad de la energía en tarifas (GDMTH) en base a un analizador de redes y software de simulación de sistemas eléctricos" **autorizamos** que el citado trabajo sea presentado por el alumno para su revisión, con el fin de alcanzar el grado de Doctor en Manufactura Avanzada.

Sin otro particular por el momento, agradecemos la atención prestada.

Dr. Noé Villa Villaseñor
Asesor Académico

Dr. José Manuel Robles Solís
Asesor en Planta



CARTA DE LIBERACIÓN DEL REVISOR



**GOBIERNO DE
MÉXICO**



CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS



CIATEQ

Zapopan, Jalisco, 30 de octubre del 2023.

Mtro. Geovany González Carlos
Coordinador Académico
CIATEQ, A.C.

Por medio de la presente me dirijo a usted en calidad de Revisor del proyecto terminal del alumno Virgilio Alfonso Murillo Rodríguez, cuyo título es:

"Diseño de un sistema de control para mejorar la calidad de la energía en tarifas (GDMTH) con base en un analizador de redes y software de simulación de sistemas eléctricos"

Después de haberlo leído, corregido e intercambiado información con el alumno, y realizado los cambios que le fueron sugeridos, puede ser autorizada su impresión, a fin de que se inicien los trámites correspondientes para su defensa.

Sin otro particular por el momento, y en espera de que mis sugerencias sean tomadas en cuenta en beneficio del estudiante y la Institución, agradezco la atención prestada.

Atentamente,

Dr. Omar Humberto Cruz Silva

31b Revisión: 01-Mar-2021

CARTA DE LIBERACIÓN DEL REVISOR



Santiago de Querétaro, Qro, 10 de octubre del 2023.

MTRO. GEOVANY GONZÁLEZ CARLOS
Coordinador Académico
CIATEQ, A.C.

Por medio de la presente me dirijo a usted en calidad de Revisor del proyecto terminal del alumno Virgilio Alfonso Murillo Rodríguez, cuyo título es:

"Diseño de un sistema de control para mejorar la calidad de la energía en tarifas (GDMTH) en base a un analizador de redes y software de simulación de sistemas eléctricos".

Después de haberlo leído, corregido e intercambiado información con el alumno, y realizado los cambios que le fueron sugeridos, puede ser autorizada su impresión, a fin de que se inicien los trámites correspondientes para su defensa.

Sin otro particular por el momento, y en espera de que mis sugerencias sean tomadas en cuenta en beneficio del estudiante y la Institución, agradezco la atención prestada.

ATENTAMENTE,

DR. AGUSTÍN-ESCAMILLA MARTÍNEZ
DIRECCIÓN DE SISTEMAS MECÁNICOS

DEDICATORIA

A mis padres, dos ángeles en el cielo que fueron mis primeros maestros que con su ejemplo de vida incansable me han podido dar la educación centrada en valores por lo que he seguido sus pasos.

Sobre todo, a mi **Padre** que por sus carencias no pudo continuar estudiando.

¡Gracias por tanto amor y apoyo en educación, así como sus consejos de vida!

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a **Dios** por ser la luz de mi camino en momentos de debilidad e inseguridad abriendo mis capacidades y conocimientos.
¡Gracias Dios por guiarme en mi camino!

A mi esposa e hijos por su amor y darme la oportunidad de continuar con mi superación profesional sacrificando el tiempo que debería estar en su grata compañía "Gracias por su comprensión, amor y aliento en todo momento".

A mis maestros, que han compartido sus conocimientos y experiencias aun cuando se presentaron los problemas de comunicación derivado de la pandemia que me han permitido alcanzar el objetivo primordial: formación como profesional y humano.

Al trabajo académico que conforma el Posgrado de CIATEQ A.C. y a la Universidad Politécnica de Zacatecas (UPZ), en especial al **Dr. José Manuel Robles Solís** y al **Dr. Omar Alejandro Gurette Barbosa** por tiempo disponible en sus atenciones y consejos, por sus recomendaciones en la publicación del artículo, a **Teresa Novales Hernández**, encaminado y atendiendo el proceso de la investigación a **Angélica Melaine Guerrero Castorena** por su dedicado compromiso en los trámites para el término de la tesis.

Al **Ing. Yosef de la Torre** Gerente General de la empresa Mallas y Armes de Aguascalientes S.A. de C.V. por otorgar las facilidades en la disposición de llevar a cabo el monitoreo y análisis del sistema eléctrico de la planta con el fin de generar una propuesta del tema de investigación.

Agradezco al **Dr. Noé Villa Villaseñor** asesor académico por guiar a cada paso el desarrollo de la investigación generando conocimiento especializado con orientación y profesionalismo en guiar la estructura de la tesis para cumplir con los objetivos principales.

RESUMEN

El presente trabajo, desarrolla la selección de los elementos de regulación de la calidad de la energía y un sistema de control. Con el cálculo y selección de los elementos de regulación del Banco de Capacitores, Filtro de Tensión-Corriente e integrando un sistema fotovoltaico se realizó un esquema de control en Software de Simulación de Sistemas de Control Eléctrico (CADE Simu Versión 4.0) (CADE-Simu, 2020), mediante la simulación en sistemas de energía Software de Modelado Análisis y Optimización de Sistemas Eléctricos y Energía (etap) (Etap Operation Technology, 2023), para emular las variaciones de tensión, corriente, factor de potencia y forma de onda.

Esta investigación examina las características de las variaciones eléctricas en los equipos de una empresa del sector industrial, analiza el impacto generado en el sistema eléctrico en función de la necesidad de operación en los sistemas de fabricación, y propone una nueva solución mediante la automatización de los elementos de regulación para mantener una calidad óptima del sistema.

La solución propuesta se evalúa mediante una simulación fiable en el software etap (Etap Operation Technology, 2023), que emula la interacción de los elementos de regulación y simula el diseño del funcionamiento de los equipos de flujo eléctrico. Los resultados demuestran una mejora del rendimiento del sistema en presencia de perturbaciones cuando se aplican dos esquemas de automatización y el funcionamiento exclusivo de la batería de condensadores, lo que mejora las fluctuaciones de corriente totales del sistema y mejora el factor de potencia del 85,83% al 93,42%. Este esquema también mejora la forma de onda en la red eléctrica principal; otro resultado de mejora se produce al operar simultáneamente el filtro de tensión y corriente junto con el sistema fotovoltaico, lo que mejora aún más las fluctuaciones de corriente, mejora el factor de potencia del 85,83% al 94,81%, logra una mayor estabilidad y mejora la calidad de la forma de onda en la red eléctrica principal.

Palabras clave: Calidad de la energía; Banco de capacitores; Filtro de tensión y corriente; Sistema fotovoltaico.

ABSTRACT

The present work develops the selection of the power quality regulation elements and a control system. With the calculation and selection of the regulation elements of the Capacitor Bank, Voltage-Current Filter and integrating a photovoltaic system, a control scheme was made in CADE Simu Version 4.0 (CADE-Simu, 2020), through simulation in etap (Etap Operation Technology, 2023), energy systems, to emulate the variations of voltage, current, power factor and waveform.

This research examines the characteristics of electrical variations in equipment within a company in the industrial sector, analyzes the impact generated within the electrical system according to the need for operation in manufacturing systems, and proposes a new solution through automation of the regulation elements to maintain an optimal system quality and prevent damage and equipment failures while offering a cost-effective model. The proposed solution is evaluated through a reliable simulation in etap (Etap Operation Technology, 2023), software, which emulates the interaction of control elements and simulates the design of electric flow equipment operation. The results demonstrate an improvement in system performance in the presence of disturbances when two automation schemes are applied as well as the exclusive operation of the capacitor bank, which improves the total system current fluctuations and improves the power factor from 85.83% to 93.42%. Such a scheme also improves the waveform in the main power system; another improvement result is when simultaneously operating the voltage and current filter together with the PV system, further improving the current fluctuations, improving the power factor from 85.83% to 94.81%, achieving better stability and improving the quality of the waveform in the main power grid.

Keywords: Power quality; Capacitor bank; Voltage and current filter; Photovoltaic system.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CONTENIDO.....	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS	X
ÍNDICE DE TABLAS.....	XV
ABREVIATURAS	XVI
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. GENERALIDADES	1
1.2. ANTECEDENTES.....	1
1.3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	2
1.4. JUSTIFICACIÓN	7
1.5. OBJETIVOS	9
1.5.1. Objetivo general	9
1.5.2. Objetivos específicos.....	9
1.6. HIPÓTESIS.....	9
1.7. ALCANCES Y LIMITACIONES.....	10
1.8. ESTRUCTURA DE LA TESIS	11
2. MARCO TEÓRICO	12
2.1. CALIDAD DE LA ENERGÍA (FUNDAMENTOS)	13
2.1.1. Importancia de la calidad de la energía	15
2.2. POTENCIAS ELÉCTRICAS Y EL FACTOR DE POTENCIA.....	16
2.2.1. Potencia activa.....	17
2.2.2. Potencia aparente	18
2.2.3. Potencia reactiva	19
2.2.4. Factor de potencia	20
2.3. PERTURBACIONES DE VOLTAJE Y CORRIENTE (ARMÓNICOS).....	22
2.4. EL USO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	25
2.4.1. Arreglo de sistemas fotovoltaicos.....	26
2.5. AUTOMATIZACIÓN DE SISTEMAS ELÉCTRICOS.....	28
2.6. REVISIÓN ACTUAL DE LA LITERATURA ACERCA DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA	33
3. PROCEDIMIENTO	37
3.1. CARACTERÍSTICAS DE LA EMPRESA.....	37

3.2.	TIPO DE INVESTIGACIÓN	43
3.3.	MUESTRA DE LA INVESTIGACIÓN	45
3.3.1.	Recolección de datos.....	46
3.3.2.	Características de la subestación y equipos eléctricos.....	46
3.3.3.	Análisis del consumo de energía eléctrica	50
3.3.4.	Instalación del equipo de medición en centro de carga.....	52
3.4.	CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DE TENSIÓN.....	54
3.5.	CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DE CORRIENTE	56
3.6.	CARACTERÍSTICAS DE LAS POTENCIAS Y FACTOR DE POTENCIA (P, Q, S)	58
3.7.	SIMULACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO.....	61
3.7.1.	Flujo de carga del sistema eléctrico	62
3.7.2.	Análisis de corto circuito	68
3.7.3.	Coordinación de protecciones	69
3.8.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL SISTEMA ELÉCTRICO	75
3.9.	SISTEMA DE CONTROL DEL CONSUMO Y MONITOREO DE ENERGÍA ELÉCTRICA	83
3.10.	SELECCIÓN DE LOS SISTEMAS DE REGULACIÓN	86
3.10.1.	Cálculo para la selección del banco de capacitores	86
3.10.2.	Selección del filtro de tensión y corriente	87
3.10.3.	Diseño del sistema fotovoltaico.....	91
3.11.	DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL	93
3.12.	ESTRATEGIA METODOLÓGICA DE LA INVESTIGACIÓN	103
3.12.1.	Diagrama de flujo de la estrategia metodológica de la investigación.. ..	105
4.	RESULTADOS.....	109
4.1.	SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL.....	109
4.2.	GENERACIÓN DE LA FORMA DE ONDA	120
	CONCLUSIONES.....	130
	RECOMENDACIONES.....	132
	APORTACIÓN DE LA TESIS.....	133
	APORTACIÓN SOCIAL DE LA TESIS	134
	REFERENCIAS.....	135

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Perturbaciones de corta y larga duración de los parámetros de la energía eléctrica.	15
Figura 2. Fasores de una carga resistiva.....	18
Figura 3. Fasores de una carga inductiva.....	19
Figura 4. Fasores de una carga capacitiva.....	20
Figura 5. Forma de Onda Original y sus componentes armónicos 1 ^o , 5 ^o y 11 ^o	22
Figura 6. Mapa del recurso solar en la República Mexicana.....	26
Figura 7. Sistema de control de Lazo abierto	29
Figura 8. Sistema de control de Lazo cerrado.....	30
Figura 9. Esquema de control de fuerza.....	31
Figura 10. Esquema de control de mando	32
Figura 11. Ubicación de la planta MACEP Aceros.	38
Figura 12. Materiales fabricados en la empresa.	38
Figura 13. Estirado en frio.	39
Figura 14. Trefilado de acero.	40
Figura 15. Límites de fluencia y alargamiento a la ruptura.	40
Figura 16. Corrugaciones y coeficiente de corrugado.	41
Figura 17. Proceso de mallas electrosoldadas.	43
Figura 18. Transformadores de la empresa MACEP Aceros con una potencia de: 150 kVA (a) y 500 kVA (b) respectivamente.....	47
Figura 19. Representación gráfica de la conexión de los equipos descritos en la Tabla 2	49
Figura 20. Consumo de energía mensual en kWh.	52
Figura 21. Diagrama de conexión del analizador de redes.....	53
Figura 22. Conexión del analizador de redes en centro de carga de 440 Vca. Vista del tablero general (a), Vista del interruptor general (b).	53
Figura 23. Conexión del analizador de redes en centro de carga de 220 Vca.	54
Figura 24. Características de tensión (440 Vca) en tablero principal.....	55
Figura 25. Fluctuaciones de tensión en fases 1 y 2.	55
Figura 26. Periodo de fluctuación máximo y mínimo de tensión.....	56
Figura 27. Fluctuaciones de corriente en alimentación principal.	56

Figura 28. Fluctuaciones de corriente en la fase 1.	57
Figura 29. Fluctuaciones de corriente en la fase 2.	57
Figura 30. Fluctuaciones de corriente en la fase 3.	58
Figura 31. Variación de potencias, real, aparente y reactiva.....	60
Figura 32. Variaciones del factor de potencia.....	60
Figura 33. Diagrama unifilar de simulación en etap (parte 1).	61
Figura 34. Diagrama unifilar en simulación en etap (parte 2).....	61
Figura 35. Principio del método de Newton-Raphson.....	63
Figura 36. Configuración del flujo de carga en el software etap.	64
Figura 37. Flujo de carga en acometida (kW + jkVAr).	65
Figura 38. Flujo de carga en acometida (corriente y factor de potencia).....	66
Figura 39. Flujo de carga en bus 9 (kW + jkVAr).	67
Figura 40. Flujo de carga en bus 9 (Corriente y factor de potencia).	68
Figura 41. Estudio de corto circuito en acometida y bus 9: a. Flujo de carga en bus 4, b. Flujo de carga en bus 9.....	69
Figura 42. Coordinación de protecciones en el lado de acometida.	70
Figura 43. Corriente y tiempo de arranque de motores M12 al M17: a. Gráfica de Velocidad-Corriente Motor M12, b. Gráfica de Velocidad-Corriente Motor M13, c. Gráfica de Velocidad-Corriente Motor M14, d. Gráfica de Velocidad-Corriente Motor M15, e. Gráfica de Velocidad-corriente motor M16. f. Gráfica de velocidad-corriente motor M17.....	71
Figura 44. Sección de Interruptores para el análisis de coordinación de protecciones.....	73
Figura 45 Coordinación de protecciones en motores M12(a) y M13 (b).....	74
Figura 46. Coordinación de protecciones en motores M14(a) y M15(b).....	74
Figura 47. Coordinación de protecciones en motores M16 (a) y M17(b).....	75
Figura 48. Histograma de Comportamiento de corriente.	78
Figura 49. Histogramas de comportamiento de Potencias Aparente (a), Real (b) Reactiva (c).	79
Figura 50. Comportamiento de las variaciones de corriente. Gráfica de ajuste (a), Gráfica de Orden (b), Prueba de Normalidad (c).....	80

Figura 51. Histogramas de comportamiento de corriente. Histograma de Potencia Aparente (a), Histograma de Corriente (b), Histograma de Potencia Reactiva (c).	82
Figura 52. Análisis de probabilidades de corriente y potencia. Potencia reactiva (a), potencia aparente (b), Corriente (c), potencia real (d).....	83
Figura 53. Propuesta del diagrama unifilar de conexión de los sistemas de regulación de control.....	85
Figura 54. Representación gráfica de la propuesta de conexión del sistema de control.....	85
Figura 55. Selección del banco de capacitores.....	87
Figura 56. Datos del panel fotovoltaico seleccionado.....	91
Figura 57. Datos del inversor seleccionado.	92
Figura 58. Diagrama unifilar del sistema fotovoltaico.	93
Figura 59. Diagrama unifilar integrando los elementos de control al bus principal (Bus 4).....	94
Figura 60. Control de arranque en cada una de las máquinas.	96
Figura 61. Control de arranque del banco de capacitores.	97
Figura 62. Control de arranque del filtro de tensión y corriente.	98
Figura 63. Control de arranque del sistema fotovoltaico.	99
Figura 64. Control de arranque del banco de capacitores junto con el filtro de tensión y corriente.....	100
Figura 65. Control de arranque del banco de capacitores junto con el sistema fotovoltaico.....	101
Figura 66. Control de arranque del filtro de tensión y corriente junto con el sistema fotovoltaico.....	102
Figura 67. Control de arranque de los tres sistemas de regulación.	103
Figura 68. Simulación de control del banco de capacitores (CAP3) en el bus 4..	109
Figura 69. Simulación de control del banco de capacitores (CAP3).....	110
Figura 70. Simulación de potencias real y reactiva en bus 4.....	110
Figura 71. Simulación de control del filtro de tensión y control (HF3).	111
Figura 72. Simulación de control del filtro de tensión y corriente (HF3).	111
Figura 73. Simulación del sistema fotovoltaico (PVA3).	112

Figura 74. Simulación de control del sistema fotovoltaico (PVA3).....	113
Figura 75. Potencias real y reactiva del sistema fotovoltaico (PVA3).....	113
Figura 76. Simulación del sistema de control del banco de capacitores y el filtro de tensión y corriente.....	114
Figura 77. Simulación del banco de capacitores (CAP3) y el filtro de tensión y corriente (HF3).	114
Figura 78. Simulación del capacitor (CAP3) y el filtro de tensión y corriente (HF3).	115
Figura 79. Simulación del banco de capacitores (CAP3) junto con el sistema fotovoltaico (PVA3), lado de alta del transformador.	115
Figura 80. Simulación del banco de capacitores (CAP3) junto con el sistema fotovoltaico (PVA3), lado de baja del transformador.	116
Figura 81. Simulación de control del banco de capacitores (CAP3) junto con el sistema fotovoltaico (PVA3).	116
Figura 82. Simulación del filtro de tensión y corriente (HF3) junto con el sistema fotovoltaico (PVA3) en el lado de alta del transformador.....	117
Figura 83. Simulación de control del filtro de tensión y corriente (HF3) y el sistema fotovoltaico (PVA3) tomando los valores de corriente y factor de potencia.	118
Figura 84. Simulación del filtro de tensión y corriente (HF3) y el sistema fotovoltaico (PVA3).....	118
Figura 85. Simulación de los tres elementos, el filtro de tensión y corriente (HF3), sistema fotovoltaico (PVA3) y el banco de capacitores (CAP3).....	119
Figura 86. Simulación de los tres elementos, el filtro de tensión y corriente (HF3), el sistema fotovoltaico (PVA3) y el banco de capacitores (CAP3) en el lado de alta del transformador T1.....	119
Figura 87. Simulación de los tres elementos de regulación.....	120
Figura 88. Forma de onda del banco de capacitores en el bus 4.	121
Figura 89. Forma de onda del filtro de tensión y corriente en el bus 4.....	121
Figura 90. Forma de onda del sistema fotovoltaico en el bus 4.	122
Figura 91. Forma de onda del banco de capacitores (CAP3) junto con el filtro de tensión y corriente (HF3) en el bus 4.	122

Figura 92. Forma de onda del banco de capacitores (CAP3) junto con el sistema fotovoltaico (PVA3) en el bus 4. 123

Figura 93. Forma de onda del filtro de tensión y corriente junto con el sistema fotovoltaico (PVA3) en el bus 4. 123

Figura 94. Forma de onda del filtro de tensión y corriente (HF3), banco de capacitores (CAP3) y sistema fotovoltaico (PVA3) en el bus 4. 124

Figura 95. Forma de onda en el transformador general (T1, 13.2 kV) cuando se conecta el sistema fotovoltaico (PVA3). 124

Figura 96. Forma de onda en el transformador general (t1, 13.2 kV) cuando se conectan los tres dispositivos, filtro de tensión y corriente (HF3), banco de capacitores (CAP3), y el sistema fotovoltaico (PVA3). 125

Figura 97. Forma de onda en el transformador general (T1, 13.2 kV) cuando se conecta el banco de capacitores (CAP3). 126

Figura 98. Forma de onda en el transformador general (T1, 13.2 kV) en el filtro de tensión y corriente (HF3). 126

Figura 99. Forma de onda en el transformador general (T1, 13.2 kV) en el filtro de tensión y corriente HF3) junto con el banco de capacitores (CAP3). 127

Figura 100. Forma de onda en el transformador general (T1, 13.2 kV) en el banco de capacitores (CAP3) y el sistema fotovoltaico (PVA3). 127

Figura 101. Forma de onda en el transformador general (T1, 13.2 kV) en el filtro de tensión y corriente (HF3) junto con el sistema fotovoltaico (PVA3). 128

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Partes de un Sistema Fotovoltaico Interconectado a Red	27
Tabla 2. Dato de los equipos y maquinaria conectada al sistema eléctrico.....	48
Tabla 3. Datos de potencia en la máquina de malla.....	49
Tabla 4. Datos de potencia máquina trefilador.....	50
Tabla 5. Recibo de luz de la empresa MACEP	51
Tabla 6. Análisis del consumo de energía eléctrica en la empresa MACEP	52
Tabla 7. Análisis de las potencias y el factor de potencia	59
Tabla 8. Capacidad de corriente en interruptores M12 al M17	72
Tabla 9. Datos calculados para f.p. de acuerdo con el análisis calculado.....	77
Tabla 10. Modelo lineal general de potencias.....	77
Tabla 11. Análisis de Varianza (ANOVA)	77
Tabla 12. Observaciones inusuales de corriente.....	78
Tabla 13. Datos calculados para f.p. de acuerdo con el análisis de medición	81
Tabla 14. Análisis de Varianza (ANOVA)	81
Tabla 15. Análisis de varianza de corriente (ANOVA)	81
Tabla 16. Esquema de condiciones de funcionamiento de la planta.....	95
Tabla 17. Resultados de acuerdo con la interacción de los dispositivos de control.	129

ABREVIATURAS

θ	Ángulo de desfaseamiento entre onda de voltaje y corriente	V	Tensión Eléctrica (V).
θ_h	Angulo de fase del armónico	Vh	Tensión Pico del Armónico
H	Armónico	Wm	Velocidad Angular del motor
C	Capacitancia	Vm	Voltaje de Línea
Im	Corriente de Línea	Vt	Voltaje en el dominio del tiempo
I	Corriente eléctrica (A).		
I(h)	Corriente pico del armónico		
di(t)	Diferencial de corriente en el tiempo		
dt	Diferencial del tiempo		
Hz	Frecuencia		
W	Frecuencia Angular		
Wot	Frecuencia Angular Fundamental $2\pi 60$		
Z	Impedancia		
L	Inductor		
Wt	Periodo de Tiempo		
P	Potencia eléctrica (W).		
Xc	Reactancia Capacitiva		
Xl	Reactancia Inductiva		
R	Resistencia Eléctrica (Ω).		
Vs	Sobretensión		

1. INTRODUCCIÓN

1.1. GENERALIDADES

Este trabajo de tesis, fue desarrollado en colaboración con el Consejo Nacional de Humanidades Ciencia y Tecnología (CONAHCYT), en coordinación con el Posgrado de CIATEQ A. C., por la Universidad Politécnica de Zacatecas, y por la empresa Mallas y Armex de Aguascalientes S. A. de C.V.

La contribución de esta investigación, es el desarrollo de un esquema de control basado en el análisis en el funcionamiento de los equipos que integra la planta conectada a tarifa Gran Demanda Media Tensión Horaria (GDMTH), así mismo se integran elementos de regulación para poder predecir cual interacción del esquema de control contribuye a la mejora en las perturbaciones en los parámetros de la calidad de la energía.

El desarrollo del esquema de control se desarrollará a través del uso de software especializados en sistemas eléctricos y de control CADE- Simu (CADe-Simu, 2020) y etap (Etap Operation Technology, 2023), como herramientas de simulación y elaboración del esquema de control integrando los dispositivos de regulación realizando emulaciones bajo las condiciones de funcionamiento con respecto a las necesidades de trabajo de los equipos de la empresa, para verificación y análisis de resultados.

1.2. ANTECEDENTES

En la actualidad el término de calidad de energía eléctrica ha tenido gran importancia y una de las razones va de la mano con el aumento de productividad y la competencia que existe en las empresas, ya que existe una relación entre productividad, eficiencia y calidad de energía (Erazo Plasencio & Quevedo Moreira, 2018).

Para el crecimiento en productividad existen diversas características, tales como:

- La búsqueda e instalación de equipos que poseen una alta eficiencia, como modernos y sofisticados motores, y bombas, entre otros.

- La necesidad de automatizar procesos con el uso de computadoras y dispositivos electrónicos.
- La reducción de pérdidas eléctricas.
- La reducción de los costos de sistemas sobredimensionados y tarifas.
- El mantenimiento preventivo para reducir el desgaste de equipos.

Cuando se menciona el término calidad de la energía hace referencia a la confiabilidad y continuidad del servicio, con los índices de tensión y corriente en su óptimo nivel, por tal motivo es importante realizar el análisis en las empresas en cuanto a los parámetros de la calidad de la energía principalmente en usuarios conectados en tarifas de Gran Demanda Media Tensión Horaria (GDMTH).

El interés de mejorar el funcionamiento del equipo eléctrico se centra principalmente bajo el criterio de la calidad de energía que seguirá evolucionando a medida que pasen los años, revolucionando el mercado, ayudando al desarrollo de nueva tecnología para dar solución a los diversos fenómenos ya existentes, lo que motiva en el desarrollo de la presente investigación.

1.3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El gasto energético eléctrico a nivel nacional va en aumento, según la Comisión Federal de Electricidad (CFE) la demanda para el año 2025 será de 404.7 TWh, por lo que es preocupante el mal uso de la energía eléctrica, ya que la demanda en el consumo ascendió a 47.4 millones, incrementándose en 1.7% respecto a los 46.7 millones de clientes del año 2022, los sectores de mayor crecimiento fueron el sector empresa mediana y residencial con incrementos de 2.3% y 1.7% respectivamente por lo que se estima un crecimiento en la demanda de consumo de energía eléctrica al 2.5% para el año 2025, las pérdidas de energía eléctrica en las redes de transmisión y distribución es uno de los mayores desafíos al que se enfrentan los suministradores, el programa de reducción de pérdidas pone un mayor énfasis en las zonas que presentan una fuerte problemática en este aspecto, a través de una mayor inversión en la infraestructura, la detección y eliminación de usos ilícitos y la

modernización de sistemas de medición, las pérdidas de transmisión y distribución representan el 12% de la energía eléctrica neta del sistema, se prevé que las pérdidas sean del 8.0% de la energía eléctrica neta del SEN (Gobierno de México. Secretaría de Energía, 2021).

Las emisiones de Energía en 2019 alcanzaron 467,892.37 Gg CO₂e cantidad que representó 63.52% de las emisiones totales que incluyen las derivadas del consumo energético de los combustibles fósiles y de las emisiones fugitivas. Dentro de este sector el consumo de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica y para el transporte han marcado el comportamiento histórico, la evolución de las emisiones del sector de energía en actividades de quema de combustibles representa un 93% así como las emisiones fugitivas provenientes de la fabricación de combustibles representa un 7%, la evolución de las emisiones en las actividades de quema de combustibles para la industria de la energía representa un 46%, transporte 34%, industrias manufacturera y de la construcción 12% y otros sectores un 8%. Las emisiones de GEI por el aprovechamiento energético de los combustibles para la generación de energía eléctrica, para la refinación, la fabricación de combustibles sólidos y para todas aquellas actividades que demandan combustibles fósiles dentro de las cadenas de producción de petróleo y gas natural, por lo que la quema de combustibles contabilizó en 2019, 203,294.2 Gg CO₂e. Las emisiones de la industria de la energía por actividad principal en la producción de electricidad y calor representan el 84%, la refinación del petróleo 5%, la manufactura de combustibles sólidos y otras industrias de la energía representa el 11% (Gobierno de México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, e Instituto Nacional de Ecología y Cambio, 2022). Para producir energía eléctrica se utiliza la quema de combustóleo en las centrales termoeléctricas del país para la producción de la misma, lo cual provoca que las emisiones a la atmósfera de Gases de Efecto Invernadero (GEI) aumenten la contaminación (Cervantes de la Rosa, Gutiérrez Flores, Domínguez Ramírez, & Muñoz Mata, 2022).

Las fuentes de energía primaria son elaboraciones naturales más o menos complejas de las que el hombre pueda extraer energía para realizar un determinado trabajo u obtener gran utilidad, y aunque existen innumerables

fuentes de energía, en última instancia, toda la energía procede del Sol (salvo la energía geotérmica y la energía nuclear). Los combustibles fósiles son aquellas sustancias capaces de quemar, es decir, combinarse rápidamente con oxígeno con un desprendimiento de calor más o menos elevado, las reservas pueden definirse en términos de reservas probadas estimadas en años de consumo a un ritmo equivalente. El carbón se encuentra en casi todas las regiones del mundo, pero en la actualidad los únicos depósitos de importancia comercial están en Europa, Asia, Australia, Sudáfrica y América del Norte. Las exploraciones geológicas han permitido localizar los yacimientos de carbón más extensos del mundo. Las reservas mundiales de carbón ascienden a 1,04 billones de toneladas y los recursos se estiman en 9.98 billones. El petróleo y gas son las fuentes de energía más importantes de nuestra sociedad moderna siendo un recurso natural no renovable que aporta el mayor porcentaje del total de la energía que se consume en el mundo, el grueso de las reservas de petróleo de la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP) se encuentran en oriente medio, en países como Arabia Saudí, Irán e Irak constituyen un 55% al total de esta Organización, el 86% de las reservas mundiales de petróleo y el 83% de las reservas de gas natural se centran en los países de la OPEP y de la antigua Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS), mientras que en los países miembros de la organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) las reservas son de un 7% y de un 8%, respectivamente, con un consumo del 60% y del 50% de las reservas mundiales de petróleo o de gas natural (Colino Martínez & Caro, 2010).

Los resultados de los estudios de planeación indican que para el año 2026. El sector público requerirá adiciones de capacidad resultantes de los trabajos de rehabilitación y mantenimiento (RM) que realiza la Subdirección de Generación, los cuales ascienden a 538.8 MW. A su vez estos se distribuyen en las unidades de la nucleoelectrónica Laguna Verde (255 MW); en la central termoeléctrica Altamira (16MW), en la carboeléctrica Río Escondido (120 MW), en El Sauz U5 (7 MW) y en varias centrales hidroeléctricas. Por otra parte, la capacidad bruta de las centrales que utilizarán combustibles fósiles, alcanzará 3,069 MW, equivalente a 69.8% de la capacidad en proceso de construcción. La mayor parte de dicha capacidad

corresponderá a centrales de ciclo combinado y una pequeña fracción (97 MW) a centrales de combustión interna, que estarán operando en la región noroeste (Baja California Sur). En cuanto a la capacidad que se encuentra en proceso de licitación (2,063 MW), 31.9% corresponderá a las tecnologías renovables. Dentro de esta categoría, las centrales eólicas (608 MW) y geotérmicas (50 MW) tendrá la mayor participación. Por su parte, las tecnologías térmicas (unidades turbogás, de combustión interna y ciclos combinados) aportarán 68.1% de la capacidad en licitación. Finalmente, dentro de los proyectos de ciclo combinado, destacan Baja California III (La Jovita) y Norte III (Juárez), aportando en conjunto 1,248 MW de capacidad bruta (Gobierno de México. Secretaría de Energía, 2012).

A lo descrito en líneas anteriores se debe asociar la toma de mediciones de parámetros eléctricos, para identificar áreas potenciales de eficiencia de energía eléctrica, como manejo de demanda y factor de potencia (Cervantes de la Rosa, Gutiérrez Flores, Domínguez Ramírez, & Muñoz Mata, 2022).

También se debe considerar el estudio de carga y consumo horario de energía y la posibilidad de mejorar la calidad del servicio eléctrico, al tiempo que se reducen el monto de la factura eléctrica y las pérdidas (Arellano Martínez, Mireles Huerta, & Samayoa Castillo, 2012).

Más allá de la continuidad y confiabilidad en el consumo de energía eléctrica de acuerdo con las condiciones de eficiencia y calidad en la operación del sistema eléctrico, hace referencia al desarrollo en la investigación científica en el comportamiento de las diferentes estructuras que comprende el sistema sumando la aplicación de la nueva tecnología para el control y regulación en las perturbaciones de frecuencia, transitorios, sobretensiones (Mercado Polo, Peña, & Pacheco, 2017). Para muchos especialistas existe confusión por la falta de comprensión en equipos que no funcionan o no se desempeñan como esperaban y mediante investigaciones han demostrado que el pico o impulso de tensión y corriente, bajo factor de potencia, así como la incorporación de energías renovables al sistema eléctrico son la causa de las perturbaciones que causan fallas y el incorrecto funcionamiento de equipos (Erazo Plasencio & Quevedo

Moreira, 2018).

Por otra parte, los inversores pueden conectarse a los sistemas eléctricos y a la operación de una gran cantidad de plantas de generación fotovoltaicas, turbinas eólicas, celdas de combustible. Además de poder funcionar como sistema aislado. Estos sistemas están conectados a la red eléctrica a bajo voltaje (≤ 13.8 kV) que se ven afectados por cargas no lineales. Por lo que estos sistemas deben ser controlados considerando armónicas, resonancias y otros problemas de calidad de la energía (Beltrán Tellas, López Monteagudo, Beltrán González, Reta Hernández, & Morera Hernández, 2020).

La interconexión de los sistemas eléctricos es cada vez más compleja. Una gran cantidad de cargas no lineales provocan la contaminación armónica grave y compleja en la red eléctrica; por ende, el control de armónicos es de gran importancia. La señal en la aplicación práctica tiene la característica compleja de la interferencia del ruido, que incide directamente en el proceso de detección de armónicos. Por lo tanto, eliminar el ruido y hacer que la detección de armónicos sea estable lo más rápido posible es de gran importancia para evaluar la calidad de energía eléctrica que se está suministrando. La medición y el análisis de armónicos son partes clave de la evaluación de la calidad de la energía. Las razones para que se produzcan armónicos son varias, entre las más frecuentes están las originadas por los equipos electrónicos que consumen energía eléctrica de una forma no lineal, es decir, de una forma no continua en el tiempo; también está la variación de los parámetros de un circuito e impedancias, la conexión y desconexión de equipos. Los armónicos en la demanda introducen fluctuaciones, caídas de tensión, desequilibrios en la red conduciendo a posibles daños y fallos de energía (Amaya Vásquez & Inga Ortega, 2022).

En la empresa Mallas y Armex de Aguascalientes S.A. de C.V. (MACEP), se participa en el análisis de la tarifa horaria de media tensión de alta demanda (GDMTH); esta tarifa será aplicable a los servicios que impliquen asignación de energía para cualquier finalidad, suministrada en media tensión, con una demanda igual o superior a 100 kW. Se han presentado en los últimos dos años variaciones

importantes de voltaje y corriente, así como de armónicos que han afectado el funcionamiento de los equipos, de igual manera no se tiene instalado un sistema fotovoltaico que pueda contribuir en el consumo de energía eléctrica y disminuir el pago en el recibo de luz.

Se solicitó la factura eléctrica para examinar las condiciones contratadas, así como el histórico de consumos, también se registró el factor de potencia, con un promedio de 85.83%, indicando que se encontraba por debajo del nivel permitido establecido por la Comisión Federal de Electricidad (CFE L0000-70) (Gobierno de México. Comisión Federal de Electricidad, 2009). El análisis del consumo de energía se registró con una lectura promedio de 20,440 kWh con el objetivo de contribuir a la mejora de la calidad de la energía.

1.4. JUSTIFICACIÓN

Se encuentran varios trabajos de investigación reportados en la literatura, con respecto al estudio sistemático en la mejora continua de los parámetros de calidad de energía que se encuentran fuera de los límites establecidos por las normas de acuerdo con las cargas conectadas que afectan y ocasionan pérdidas económicas significativas. Se han realizado estudios equivalentes como los desarrollados en (Berenguer Ungaro, Hernández Rodríguez, Conde García, Arias Gilart, & Deás Yero, 2018).

Sin embargo, las propiedades operativas del sistema eléctrico en cada empresa en particular, están sujetas a su capacidad de carga, necesidad de trabajo y funcionamiento de los equipos, características eléctricas de las subestaciones, en la conexión a la tarifa gran demanda media tensión horaria (GDMTH), hacen que cada situación de trabajo sea diferente, por consiguiente, no se tiene actualmente un sistema que controle los parámetros eléctricos en las perturbaciones y genere alteraciones basándose en los límites permitidos de acuerdo con el funcionamiento de cada empresa (Cervantes de la Rosa, Gutiérrez Flores, Domínguez Ramírez, & Muñoz Mata, 2022).

Se pueden formular las siguientes preguntas: ¿Existe un método que permita

controlar las perturbaciones en los parámetros eléctricos, antes de establecer un sistema de control eléctrico, considerando todos sus esquemas de funcionamiento?, además, ¿es posible contar con una selección de dispositivos de regulación de los parámetros que puedan ser controlados de acuerdo con las necesidades de funcionamiento de la planta?

La importancia en el desarrollo de este trabajo de investigación, se enfoca en detectar las posibles perturbaciones que genera el sistema eléctrico en la planta ya que se han presentado fallas relevantes en los equipos debido a los constantes paros y arranques de las maquinarias así como de la alta carga conectada en el sistema eléctrico, generando un costo significativo en mantenimientos correctivos así como el alto consumo de energía eléctrica, se tienen poca información acerca de los dispositivos de regulación en la planta que permita controlar dichas afectaciones así mismo es importante seleccionar dispositivos de regulación para poder generar un esquema de control de las perturbaciones de los parámetros de la calidad de la energía de acuerdo con la necesidad de trabajo de los equipos de la planta la cual está conectada a dicha tarifa.

En la planta no se tiene instalado un sistema fotovoltaico que contribuya al consumo de energía el cual se debe considerar para mejorar las condiciones en el gasto del consumo de energía eléctrica por lo que también se pretende analizar que tanto afecta en las perturbaciones de la calidad de la energía por tener sistemas electrónicos de gran potencia (Inversor). Se debe seleccionar el esquema de control más adecuado en la interacción de los elementos de regulación con respecto a las variaciones del factor de potencia, perturbaciones de los parámetros de energía eléctrica, así como la interconexión de un sistema fotovoltaico a la red eléctrica para mejorar la calidad de la energía y detectar las perturbaciones del sistema eléctrico.

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. Objetivo general

Desarrollar un diagrama de control en la interacción de los dispositivos de regulación para poder predecir el sistema más adecuado que permita regular las perturbaciones de los parámetros de la calidad de la energía en la empresa Mallas y Armex de Aguascalientes S.A. de C.V. conectada a tarifa Gran Demanda Media Tensión Horaria (GDMTH).

1.5.2. Objetivos específicos

- Calcular los elementos de regulación como son el banco de capacitores, el filtro de tensión y corriente, así como el dimensionado del sistema fotovoltaico para someterlo a la simulación y determinar cuál de los elementos mejora las condiciones en las perturbaciones de acuerdo con las necesidades de funcionamiento del sistema eléctrico.
- Diseñar un esquema de control que permita interactuar entre los elementos de regulación para seleccionar el esquema que mejores resultados genere en las variaciones de las perturbaciones mediante la simulación.
- Examinar la simulación mediante el software del modelado análisis y optimización (etap) para interpretar los parámetros en las perturbaciones de la calidad de la energía.
- Analizar mediante las simulaciones en los esquemas de control y la interacción de los elementos de regulación para seleccionar los mejores resultados que permita estar dentro de los límites especificados en las perturbaciones de la calidad de la energía.

1.6. HIPÓTESIS

El diseño de un sistema de control integrándolo al sistema eléctrico de la empresa ayudará a reducir las perturbaciones que se generen en la empresa para optimizar las condiciones de funcionamiento de los equipos.

El implementar un sistema de control que permita interactuar los elementos de regulación ayudará a mejorar las variaciones en las perturbaciones de las formas de onda de tensión y corriente en la sección de baja del transformador principal.

A través del analizador de redes y el diseño de diversos escenarios de simulación integrando los elementos de regulación se podrá obtener un flujo de carga que disminuya y optimice las condiciones en las perturbaciones de la calidad de la energía.

Al cambiar las condiciones de funcionamiento en empresas que estén dentro de la tarifa Gran Demanda Media Tensión Horaria (GDMTH) en los equipos se podrá implementar un sistema de regulación que ayudará a seleccionar la mejor opción para controlar las alteraciones del sistema eléctrico.

1.7. ALCANCES Y LIMITACIONES

Con esta investigación, se apoyará con la creación de un nuevo sistema de control en la interacción de dispositivos de regulación con respecto al funcionamiento de acuerdo con las necesidades de la empresa para predecir los sistemas de conexión que mejor desempeño se presente ante las perturbaciones de los parámetros de la energía. Se proporcionará una nueva herramienta, para que los analistas de la calidad de la energía, implementen la innovación en nuevos desarrollos, haciendo esquemas de control precisos y económicamente rentables.

La dependencia de los equipos de medición y la implementación de este tipo de esquemas de control y selección de los equipos de regulación así como los altos costos que genera en la instalación y operación de este tipo de innovaciones son limitantes para validar la propuesta, pero con el apoyo de la empresa Mallas y Armex de Aguascalientes S.A. de C.V. y los datos obtenidos de las simulaciones desarrolladas en el software de modelado, análisis y optimización etap, se pudieron validar y desarrollar la mejor interpretación de los datos.

1.8. ESTRUCTURA DE LA TESIS

La tesis tiene una estructura en 5 capítulos, los cuales se describen a continuación:

En el **Capítulo 1** se presenta a modo de introducción el problema a resolver, se exhiben los objetivos que se pretenden lograr, además se indica la hipótesis, alcances y limitaciones de la investigación. En el **Capítulo 2** se presenta una descripción general y la teoría fundamental los sistemas eléctricos. En este capítulo se puntualiza en el análisis de la teoría de las variables que actúan sobre las perturbaciones de la calidad de la energía así como el estudio del arte con respecto a diferentes publicaciones relacionados al tema, en el **Capítulo 3** en la sección de metodología se desarrolla un análisis estadístico para verificar las condiciones en las variaciones de la corriente con respecto al funcionamiento de las cargas eléctricas (carga capacitiva, carga inductiva y carga resistiva) así como el cálculo de los elementos de regulación como son el banco de capacitores el filtro de tensión-corriente y el arreglo del sistema fotovoltaico, se realiza la toma de lectura de consumo de energía, la verificación del factor de potencia, se realiza el levantamiento de los datos de acuerdo con el diagrama unifilar con las cargas instaladas y consumos mensuales en la empresa, así mismo se desarrolla la simulación para determinar las condiciones reales en las variaciones de las perturbaciones del sistema eléctrico, se muestra una estrategia metodológica de la investigación. En el **Capítulo 4** se muestran los resultados que se obtuvieron de la simulación referente al esquema de control y selección de los dispositivos junto con el dimensionado del sistema fotovoltaico y en el **Capítulo 5** se presentan las conclusiones, así como las sugerencias para futuros trabajos.

2. MARCO TEÓRICO

En la actualidad el término de calidad de energía eléctrica ha tenido gran importancia y una de las razones va de la mano con el aumento de la productividad y la competencia que existen en las empresas, ya que genera una relación entre productividad, eficiencia y calidad de la energía (Erazo Plasencio & Quevedo Moreira, 2018).

Para el crecimiento en productividad existen diversas características, tales como:

- La búsqueda e instalación de equipos que poseen una alta eficiencia, como modernos y sofisticados motores, bombas.
- Necesidad de automatizar procesos con el uso de computadoras y dispositivos electrónicos.
- Evitar las pérdidas eléctricas.
- Reducir los costos de sistemas sobredimensionados y tarifas.
- Reducir y optimizar el desgaste de equipos.

Cuando se menciona calidad de energía se hace referencia a la confiabilidad y continuidad del servicio, con los índices de tensión y corriente en su óptimo nivel. El criterio calidad de energía evolucionó y seguirá evolucionando a medida que pasen los años, revolucionando el mercado, ayudando al desarrollo de nueva tecnología para dar solución a los diversos fenómenos ya existentes. Más allá de continuidad y confiabilidad, hace referencia al desarrollo científico sumando a la tecnología (Valtierra Rodríguez, Romero Troncoso, Osornio Ríos, & García Pérez, 2014).

Para muchos especialistas existe confusión por la no comprensión en equipos que no funcionan o no se desempeñan como esperaban y mediante investigaciones han demostrado que el pico o impulso de tensión y las perturbaciones pueden causar fallas en el funcionamiento de equipos (De Oliveira, Vilela Ferreira, & Vilela Ferreira, 2022).

Dos de los principales estándares componentes hace referencia al tema, IEC (Comisión Electrotécnica Internacional) (Asociación Española de Normalización y

Certificación, 2007) da la definición al término "Calidad de Energía Eléctrica", como las características de la electricidad en un punto dado de la red eléctrica, evaluadas con relación a un conjunto de parámetros IEC 61000-4-30 Internacional (Erazo Plasencio & Quevedo Moreira, 2018).

Los parámetros medibles dentro de la IEC 61000-4-30 son:

- frecuencia
- magnitud
- flicker
- armónicos
- fluctuaciones de tensión
- interrupciones
- desequilibrios

A su vez la IEEE define el término "Calidad de Energía Eléctrica", como la diversa variedad de fenómenos electromagnéticos y en un punto específico en la red (Suárez, Di Mauro, Anaut, & Agüero, 2005).

Los parámetros medibles en IEEE STD 519-2022 (IEEE, 2022) son:

- alteraciones en los valores RMS de corriente y tensión
- perturbaciones transitorias
- factor de potencia
- formas de onda perfecta

2.1. CALIDAD DE LA ENERGÍA (FUNDAMENTOS)

Calidad de energía eléctrica es un término de mucha importancia para la industria de generación de energía, y por lo tanto requiere de continua atención por parte de la generación misma y de los grandes usuarios (Erazo Plasencio & Quevedo Moreira, 2018). En años recientes esta cuestión se ha hecho más crítica, debido al incremento en el número de cargas sensibles a disturbios de potencia (Issouribehere, Barbero, & Barrera, 2009). Tomando en cuenta que es la presencia de estas mismas cargas la causa de la degradación de la calidad de la energía,

no es posible hablar de una limpieza de la red eléctrica solo dejando de utilizar estos equipos (Sousa Santos & Gómez Sarduy, 2020). A esta clase de equipos que hoy en día utilizan electrónica de potencia, conmutación por medio de semiconductores y rectificación, se les denomina cargas no lineales; es difícil imaginarse un usuario que no cuente con al menos uno de estos dispositivos (Carreño Perez & Espinel Ortega, 2020). Debido a la alta presencia de estos equipos la red eléctrica está muy contaminada, y es necesaria una limpieza para que usuarios y generación puedan seguir disfrutando de los beneficios de la electricidad sin problemas graves para ambos (Tello Maita & Marulanda Guerra, 2017). Dado esto, la meta para las compañías de suministro de energía es proporcionar energía de buena calidad, mientras que para los usuarios es mantenerla, dentro de lo posible, en buena calidad (Salazar López, 2009).

La calidad del servicio de energía eléctrica es un amplio término relacionado con la continuidad del servicio y la calidad de la onda de tensión (Marmolejo Duarte & Chen, 2019). La continuidad del servicio es lo que tradicionalmente se ha denominado confiabilidad y básicamente es calificada con los siguientes aspectos: número de interrupciones por año, tiempo promedio por interrupción y usuarios afectados en promedio por interrupción (Ramírez Castaño & Cano Plata, 2006).

La Comisión Federal de Electricidad define a la calidad de la energía como **“Características eléctricas en un punto determinado del sistema eléctrico, evaluadas con respecto a un conjunto de parámetros y valores de referencia, relacionados a la compatibilidad electromagnética entre el suministrador y el cliente”**. Las perturbaciones de corta y larga duración se catalogan dependiendo del tiempo y los ciclos de generación de las variaciones de tensión respecto al parámetro normal de tensión (Chahine, Tarnini, Moubayed, & El Ghaly, 2023), así como a las variaciones transitorias, corta (Instantáneo, momentáneo y temporal) y larga duración en sobre tensiones hasta un 120% y en bajas tensiones de un 80%, como se puede ver en la Figura 1 (Gobierno de México. Comisión Federal de Electricidad, 2009).

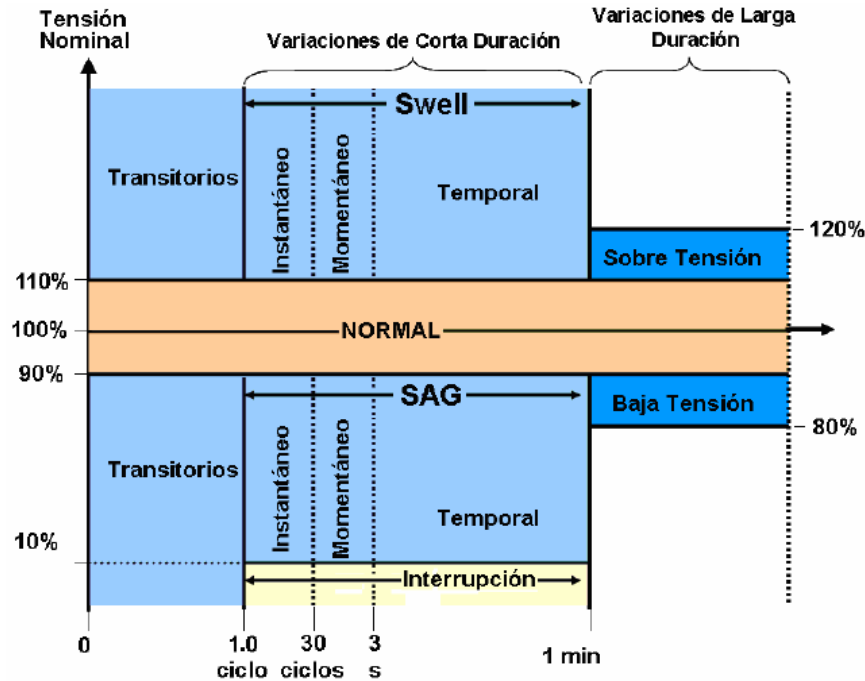


Figura 1. Perturbaciones de corta y larga duración de los parámetros de la energía eléctrica.

(FernandezFica. Soluciones en Calidad de Energía, s. f.)

2.1.1. Importancia de la calidad de la energía

En la actualidad, la calidad de la energía representa para las divisiones de distribución la atención correspondiente a problemas relacionados con perturbaciones en la energía (Jaramillo Arteaga, 2020), particularmente con los grandes clientes y con aquellos que emplean en sus procesos de producción o de control sistemas y equipamientos industrializados con niveles de sensibilidad que deben de considerarse en su aplicación tanto por el suministrador como por el propio cliente (Singh, Shahani, & Kumar Verma, 2012).

De conformidad con lo establecido en el reglamento de la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica, en su capítulo V, del suministro y la venta de energía eléctrica; el artículo 18 señala que, "El suministrador deberá ofrecer y mantener el servicio en forma de corriente alterna en una, dos o tres fases, a las tensiones alta, media, y baja, disponibles en la zona de que se trate" (Cidrás & Carrillo, s. f.), observando lo siguiente:

1. Que la frecuencia sea de 60Hz con una tolerancia de 0.8% en más o menos.
2. Que las tolerancias en el voltaje de alta, media o baja tensión no excedan de 10% en más o en menos y tiendan a reducirse progresivamente.

Lo deseable para los parámetros regulados conforme al Reglamento de la Ley de Servicio Público de Energía Eléctrica (Saucedo Martínez, Taxis Villagran, & Flores Carrera, 2008), es que mantengan un comportamiento estable en el alcance de un valor nominal, dentro de rangos normalizados y con una forma de onda sinusoidal perfecta; sin embargo en el desempeño operativo de las instalaciones, tanto las del suministrador como las del cliente se tiene factores de perturbaciones, que afectan a los parámetros mencionados, la utilización misma de la energía suministrada es uno de los factores que causan la variación de dichos parámetros (Gobierno de México. Comisión Federal de Electricidad, 2009).

La correcta medición del suministro y consumo de la energía eléctrica y por lo tanto garantizar la correcta facturación, es una necesidad fundamental tanto para las empresas comercializadoras como para sus clientes. Sin embargo, las nuevas definiciones de potencia que han surgido en los últimos años a raíz de los cambios importantes en los sistemas eléctricos, debido a la aparición de componentes armónicas y al desbalance de las cargas en sistemas trifásicos, están redefiniendo la metrología eléctrica, ya que varios de los métodos empleados en la medición tradicional de la potencia reactiva y el factor de potencia, son inadecuados para determinados escenarios de funcionamiento de los sistemas eléctricos (González Sua, Ordóñez Plata, Barrero Pérez, Duarte Gualdrón, & Bautista Morantes, 2009).

2.2. POTENCIAS ELÉCTRICAS Y EL FACTOR DE POTENCIA

Las potencias eléctricas y factor de potencia (FP) son variables eléctricas que inciden a nivel industrial en el cálculo del costo de la energía eléctrica consumida; para su obtención generalmente se utilizan medidores digitales o analizadores de calidad (PQA) que emplean diferentes algoritmos o metodologías para el cálculo de la energía eléctrica, encontrándose diferencias importantes al comparar los registros obtenidos para cada una de las variables medidas. La medición de la

energía eléctrica es una tarea del proceso de distribución de energía, actividad que involucra parámetros eléctricos tan importantes como potencia activa (P), potencia reactiva (Q), potencia aparente (S) y el factor de potencia (FP); variables que inciden en el cálculo del costo de la energía eléctrica consumida para fines comerciales (Daza Urrego, Buriticá Arboleda , & Garzón Rodríguez, 2015). De acuerdo con esto se han venido desarrollando equipos con diferentes funciones que permiten obtener el cálculo de estos parámetros y brindar más información en cuanto a estos, tanto para el cliente como para las empresas prestadoras del servicio, pero existe un interrogante al respecto: ¿cómo o bajo qué normatividad se hace la determinación de estos parámetros?

Adicionalmente los sistemas eléctricos reales cuentan con cargas no lineales que a pesar de ser alimentadas con un voltaje sinusoidal absorben una corriente no sinusoidal originando distorsiones armónicas que tienen efectos en la vida útil de los equipos industriales, y que también pueden afectar las mediciones arrojadas por los equipos de medida (Delgado Contreras, 2018).

Otro aspecto que tiene relevancia en la medición de potencia y en dichos equipos es la metodología empleada para la obtención de potencias totales ya que se analiza el sistema trifásico como tres sistemas monofásicos, olvidándose que es un sistema único, tanto en su operación como en su funcionamiento (Daza Urrego, Buriticá Arboleda , & Garzón Rodríguez, 2015).

2.2.1. Potencia activa

La potencia útil que se transforma íntegramente en energía mecánica (trabajo) y calor (pérdidas), se la designa con la letra P siendo su unidad Watt y el símbolo de la unidad W (Ramos Ramos & Riveros Arcaya, 2018).

En toda instalación industrial, se tienen máquinas rotativas instaladas como los motores eléctricos, los cuales son alimentados de corriente alterna, que transforman a energía mecánica y calor (Medina Álvarez, 2020).

Se calcula con la siguiente fórmula:

$$P = V_{rms} * I_{rms} * \cos \varphi \quad (1)$$

Sistemas trifásicos:

$$P = \sqrt{3} * V_{LL} * I_{LL} * \cos \varphi \quad (2)$$

Donde:

VLL	Voltaje de línea a línea (v)
ILL	Corriente de Línea a Línea (A)
P	Potencia Activa (w)
Cos φ	Factor de Potencia

El fasor de una carga resistiva está en fase la corriente con respecto a la tensión como se observa en la Figura 2.

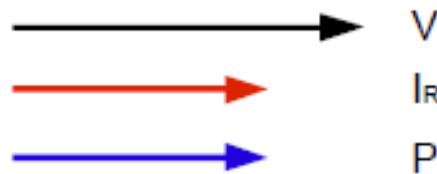


Figura 2. Fasores de una carga resistiva.
(Crismatt Campillo & Barón Martínez, 2010)

2.2.2. Potencia aparente

La potencia aparente de un circuito eléctrico de corriente alterna, es la suma de la energía que disipa dicho circuito en cierto tiempo en forma de calor o trabajo y la energía utilizada para la formación de los campos eléctricos y magnéticos de sus componentes. Esta potencia no es realmente consumida, salvo cuando el FDP ($\cos \phi$) es la unidad, y nos señala que la red de alimentación de un circuito no solo ha de satisfacer la energía consumida por los elementos resistivos, sino que también ha de contarse con la que van a suministrar a bobinas y condensadores. Se le designa la letra S, siendo su unidad el Voltamperio y el símbolo de la unidad VA (Ramos Ramos & Riveros Arcaya, 2018).

La potencia aparente requiere una carga y se obtiene por medio de la suma vectorial de la potencia activa y la reactiva (Ver Figura 3). Su unidad de medida es

KVA (González Sua, Ordóñez Plata, Barrero Pérez, Duarte Gualdrón, & Bautista Morantes, 2009).

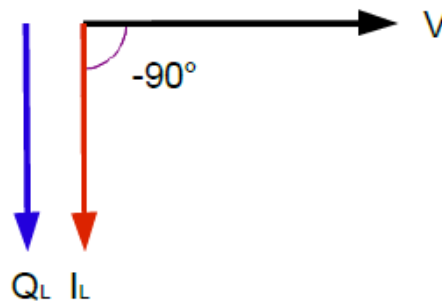


Figura 3. Fasores de una carga inductiva.
(Crismatt Campillo & Barón Martínez, 2010)

$$S = V_{rms} * I_{rms} \quad (3)$$

Donde:

V rms Voltaje promedio
I rms Corriente promedio

2.2.3. Potencia reactiva

La potencia reactiva es aquella que utilizan ciertos receptores para la creación de campos eléctricos y magnéticos (como motores, transformadores, reactancias, etc.). Esta potencia no se convierte en potencia útil, aumenta la potencia total a transportar y distribuir por las compañías suministradoras, así como las pérdidas de distribución. Se la designa con la letra Q siendo su unidad el Voltamperio Reactivo y el símbolo de la unidad Var (Ramos Ramos & Riveros Arcaya, 2018).

En una instalación industrial hay máquinas estáticas y dinámicas que necesitan campo magnético para su funcionamiento como los transformadores, motores, etc.

Estos equipos consumen un tipo de energía conocida como reactiva, el cual es originado por dispositivos de tipo inductivo y de tipo capacitivo, cuya unidad de medida es el KVA_r, como se puede ver en la Figura 4.

Se calcula con la siguiente fórmula:

$$Q = V * I * \text{sen } \varphi \quad (4)$$

Para circuito trifásico:

$$Q = \sqrt{3} * V * I * \text{sen } \varphi \quad (5)$$

$$Q = (\sqrt{S^2 - P^2}) \quad (6)$$

Donde:

Q	Potencia reactiva (kVAR)
P	Potencia Activa (w)
S	Potencia Aparente (kV)

También se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$Q = P * (tg\varphi_1 - tg\varphi_2) \quad (7)$$

Donde:

P	Potencia útil (w)
$\tan \varphi_1$	Factor de Potencia Inicial
$\tan \varphi_2$	Factor de Potencia deseado

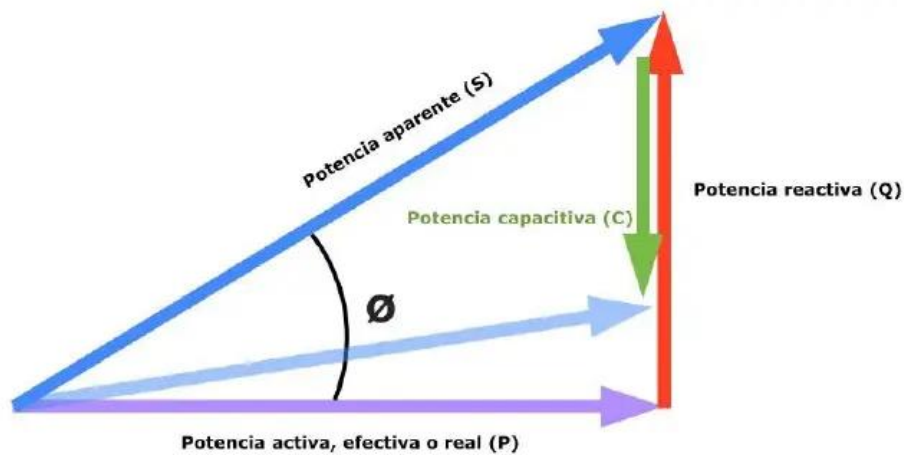


Figura 4. Fasores de una carga capacitiva (Crismatt Campillo & Barón Martínez, 2010)

2.2.4. Factor de potencia

Se denomina factor de potencia (FP) de desplazamiento al cociente entre la

potencia activa y la potencia aparente, que es coincidente con el coseno del ángulo entre tensión y la corriente cuando la forma de onda es sinusoidal pura, o sea que, el factor de potencia debe tratar de coincidir con el coseno ϕ pero no es lo mismo. Las cargas industriales en su naturaleza eléctrica son de carácter reactivo a causa de la presencia principalmente de equipos de refrigeración, motores, generadores, transformadores. Este carácter reactivo obliga a que, junto al consumo de potencia activa (KW), se sume el de una potencia llamada reactiva (kVAr), las cuales en su conjunto determinan el comportamiento operacional de equipos y motores (Ramos Ramos & Riveros Arcaya, 2018).

Esta potencia reactiva ha sido tradicionalmente suministrada por las empresas generadoras de electricidad, aunque puede ser producida por las propias industrias. Al ser suministradas por las empresas de electricidad deberá ser transportada por las redes, ocasionando necesidades de inversión en capacidades mayores de los equipos y redes de transmisión y distribución. Todas estas cargas industriales necesitan de corrientes reactivas para su operación. Dependiendo del tipo de carga, el FDP ($\cos \phi$) puede ser: adelantado, retrasado, igual a 1 (Borges Vasconcellos, Pérez Abril, & León Martínez, 2012).

Bajo condiciones de voltajes y corrientes senoidales el factor de potencia se obtiene de la ecuación:

$$fp = \frac{P}{S} \quad (8)$$

$$fp = \cos \phi \quad (9)$$

$$\cos \phi = \frac{P}{\left(\sqrt{P^2 + Q^2}\right)} \quad (10)$$

Donde:

$\cos \phi$	Factor de Potencia (%)
P	Potencia Activa (W)
Q	Potencia Reactiva (kVAr)

2.3. PERTURBACIONES DE VOLTAJE Y CORRIENTE (ARMÓNICOS)

Las armónicas en sistemas eléctricos son funciones senoidales de tensión eléctrica y/o corriente cuyas frecuencias son múltiplos de la frecuencia fundamental del sistema, donde su análisis se refiere a un problema en estado estable (Amaya Vásquez & Inga Ortega, 2022). En los últimos años los estudios de propagación de armónicas se han convertido en una herramienta importante para el análisis, diseño y regulación de los sistemas de distribución, se usan para cuantificar la distorsión de las formas de onda de tensión y corriente en un sistema eléctrico (Ver Figura 5), y determinar la existencia y/o mitigación de condiciones de resonancia (Alvarado Perusquía & Ramírez Sánchez, 2010).

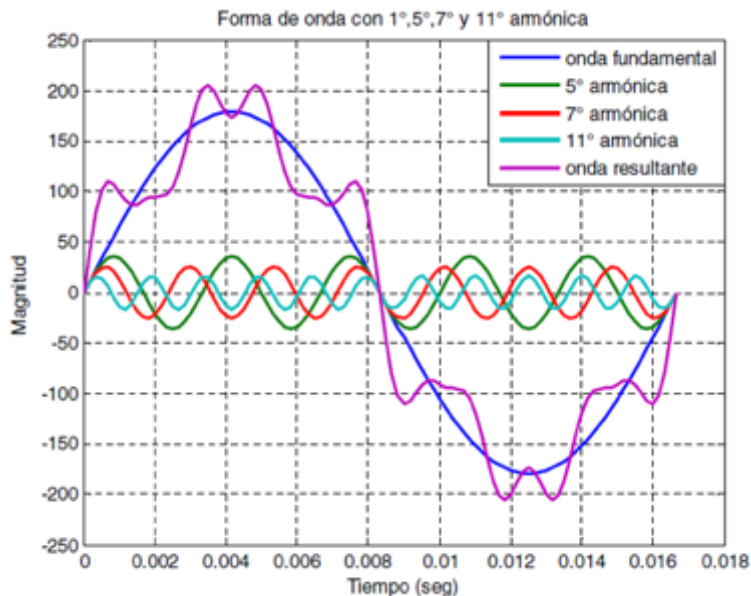


Figura 5. Forma de Onda Original y sus componentes armónicos 1°, 5° y 11°. (Alvarado Perusquía & Ramírez Sánchez, 2010)

Los filtros pasivos shunt o paralelo proveen un camino de baja impedancia para las corrientes armónicas, está compuesto por una rama RLC en serie, que se conecta en paralelo con la barra o sistema de alimentación (Astudillo Mora, Vásquez Vega, & Rojas Serrano, 2016).

Además de ser más económico que otras estrategias de compensación y transportar solo las corrientes por las cuales fue sintonizado existe la posibilidad de que el mismo proporcione parte de las potencias reactivas del sistema lo cual su diseño se desarrolla como se describe:

$$VLL = kV \text{ base} * Va.u \quad (11)$$

$$X_{eff} = \frac{VLL_{sist}^2}{Q_{eff}} \quad (12)$$

$$X_c = \frac{h^2}{h^2 - 1} * X_{eff} \quad (13)$$

MVA base potencia base: dato del sistema eléctrico
kVbase voltaje base del sistema

$$Z_{base} = \frac{kV_{base}^2}{MVA_{base}} \quad (14)$$

$$C = \frac{1}{2\pi f X_c} \quad (15)$$

$$X_L = \frac{X_c}{h^2} \quad (16)$$

$$L = \frac{X_L}{2 * \pi * f} \quad (17)$$

$$R = \frac{X_L * (f_{res})}{Qf} \quad (18)$$

$$X_c = X_L$$

$$X_c(h = 10.34) = \frac{X_c}{h} \quad (19)$$

$$X_L(h = 10.34) = X_L * h \quad (20)$$

$$I_{fund} = \frac{\frac{VLL_{sis}}{\sqrt{3}}}{X_c - X_L} \quad (21)$$

$$I_5 = 25\% * I_{fun} \quad (22)$$

$$I_7 = 15\% * I_{fun} \quad (23)$$

$$I_{11} = 10\% * I_{fun} \quad (24)$$

$$I_{13} = 5\% * I_{fun} \quad (25)$$

$$I_{total} = \sqrt{(I_{11}^2 + I_{13}^2 + I_{15}^2 + I_{17}^2 + I_{19}^2)} \quad (26)$$

$$\% \text{Margen de Corriente} = \frac{I_{total}}{I_{fun}} * 100 \quad (27)$$

$$I_{totalrms} = 104.76\% I_{fun} \leq 135\% I_{fun} \text{ establecida en la Norma IEEE - 18 - 2002}$$

$$V_c(1) = I_f * X_c \quad (28)$$

$$V_c(h) = \sum_h^n I(h) * \frac{X_c}{h} \quad (29)$$

$$V_{cl - ntotal pico} = \sqrt{2} * (V_c(1) + V_c(h)) \quad (30)$$

$$V_{L - nsis} = \frac{V_{LLsis}}{\sqrt{3}} \quad (31)$$

$$V_{L - Npico sis} = \sqrt{2} * V_{L - Nsis} \quad (32)$$

$$\% \text{Margen de Tensión} = \frac{V_{cl - N total pico}}{V_{L - Npico sis}} * 100 \quad (33)$$

$$V_{totalrms} = 109.1\% V_{fun} \leq 110\% V_{fun} \text{ establecida en la Norma IEEE - 18 - 2002}$$

Al realizar el análisis de las ecuaciones para determinar los parámetros aceptables en los niveles de tensión y corriente se pueden obtener para seleccionar el filtro adecuado, así como conocer las características dentro de normas (Astudillo Mora, Vásquez Vega, & Rojas Serrano, 2016).

2.4. EL USO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

El uso de sistemas fotovoltaicos para generación de electricidad es una práctica cada vez más común en el ámbito internacional. Durante los últimos 30 años el desarrollo tecnológico en este campo ha permitido una reducción del 95% en el costo de los módulos fotovoltaicos comerciales, a la par de un incremento cercano al 200% en su eficiencia (Loaeza Salcedo, Ramiro Carmona, & Tenorio Cesalin, 2012). Un dato que puede servir como referencia para dimensionar el nivel de penetración de esta tecnología en estos últimos años son los más de 1200 MW de potencia pico instalada a nivel mundial, con un crecimiento anual del orden de 16% (González G., Jiménez G., & Lagunas M., 2003).

El escenario actual del sistema de distribución (SD) está en proceso de transformación y adaptación debido al importante aumento de las cargas no lineales conectadas a la red eléctrica en todos los niveles de tensión, que a su vez acaban comprometiendo la calidad de la energía eléctrica (EPQ) de todo el sistema. Como cargas no lineales, por ejemplo, podemos enumerar los inversores de red, los convertidores para control de máquinas, los rectificadores controlados y no controlados, las fuentes conmutadas entre otros (Marcos de Oliveira, Santos Mariano, Salvadori, & Ando Junior, 2022).

Como resultado de la creciente inserción en la Generación Distribuida (GD) de equipos con características no lineales en aplicaciones residenciales e industriales se produce un aumento de los índices de perturbaciones electromagnéticas (Ángel Silva & Ordoñez Plata, 2005), que acaban distorsionando la forma de onda, provocando un aumento en las pérdidas eléctricas, averías inoportunas y en casos extremos hasta la quema de los dispositivos electrónicos o en el punto de acoplamiento común de la potencia de corto circuito (PCC) de la red eléctrica. En vista de lo anterior, se destaca la importancia de estudiar el desarrollo de sistemas y equipos con un mejor EPQ, donde la continuidad del suministro es también un determinante, garantizando la seguridad energética de los sistemas con cargas críticas y aumentando la fiabilidad del sistema donde se insertan (Marcos de Oliveira, Santos Mariano, Salvadori, & Ando Junior, 2022).

México es un país con un excelente recurso solar, como se puede ver en la Figura 6. La irradiación diaria (promedio anual) sobre una superficie horizontal es superior a 4.4 kWh/m²·día, en todo el territorio nacional y en algunos sitios es superior a 6 kWh/m²·día (un valor de los más altos en el mundo). Además, por encontrarse cerca del ecuador, es relativamente constante a lo largo de todo el año (García Torres, 2020). Con base en lo anterior, la explotación de la tecnología fotovoltaica en México brinda condiciones favorables para contribuir en forma importante a los requerimientos energéticos del país. Y su utilización puede resultar más rentable en comparación con muchos otros países (González G., Jiménez G., & Lagunas M., 2003).

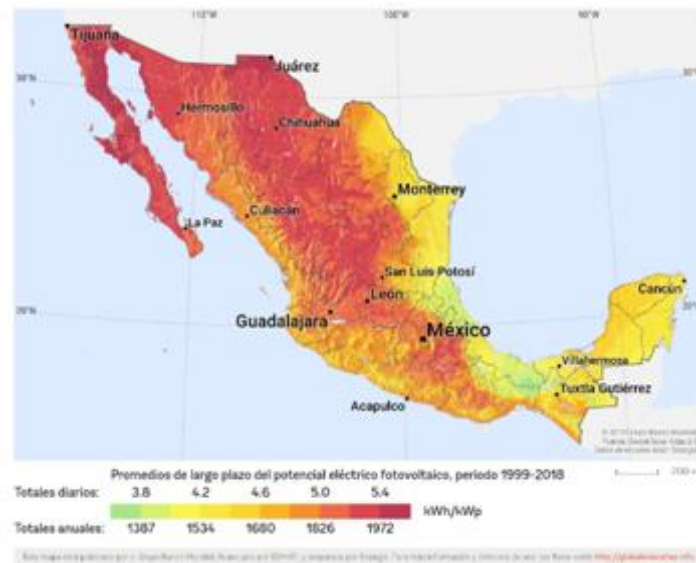


Figura 6. Mapa del recurso solar en la República Mexicana (Solaris, 2021)

2.4.1. Arreglo de sistemas fotovoltaicos

El sistema fotovoltaico conectado a la red (SFCR) tiene la principal característica de operar conectado a la red eléctrica convencional, la energía que se genera es aprovechada por la carga a la cual se suministra o alimenta, al igual que se inyecta electricidad a la red, el objetivo principal de este sistema es reforzar su producción y anualmente disminuir el consumo de electricidad, además en dependencia del país y regulaciones que existan, el propietario puede percibir remuneraciones económicas. Una planta fotovoltaica conectada a la red se subdivide en tres subsistemas principales como se observa en la Tabla 1, los cuales son

dimensionados con base en las necesidades o requerimientos (Tansinchana Cadena, 2021).

Tabla 1. Partes de un Sistema Fotovoltaico Interconectado a Red

SUBSISTEMAS	DESCRIPCIÓN
Sistema generador (paneles solares)	Su función principal de convertir energía solar en energía eléctrica.
Sistema de inversor	Tiene como cargo la conversión de corriente eléctrica directa a corriente alterna a una frecuencia requerida
Sistema de transformación	Su objetivo es elevar o disminuir los valores de voltaje.

(Tansinchana Cadena, 2021)

Para realizar el diseño en el arreglo de un sistema fotovoltaico (Fv) se deben tomar en cuenta varias consideraciones como las capacidades de los módulos fotovoltaicos a seleccionar los cuales corresponden a condiciones normalizadas con radiación solar de 1000 w/m^2 , temperaturas de módulo de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ y sin viento. Las tensiones nominales de los módulos y arreglos en sistemas conectados a red se configuran en tensiones elevadas (De Oliveira, Vilela Ferreira, & Vilela Ferreira, 2022). Determinada la energía consumida, este tiene que ser suministrada por una fuente y es representada por un panel de módulos FV conectados entre sí de tal forma que son capaces de suministrar la energía necesaria para alimentar la carga eléctrica. Para determinar el número de paneles del módulo Fv se debe considerar el promedio de la energía consumida diariamente (Wh) de acuerdo con la tarifa conectada al suministro de energía eléctrica, así mismo se debe seleccionar el módulo del Panel FV para conocer las características eléctricas (V_m , I_m), por último analizar la irradiación diaria (promedio anual) sobre una superficie horizontal en el emplazamiento a instalar el sistema fotovoltaico por el factor de corrección K (0.7 a 1.0), como se describe en la ecuación (Loeza Salcedo, Ramiro Carmona, & Tenorio Cesalín, 2012):

$$M = \frac{Ec}{Vm * Im * H.S.P} \quad (34)$$

Donde:

M	Número de módulos
Ec	Energía consumida (wh)
Vm	Tensión máxima del módulo (v)
Im	Corriente máxima del módulo (A)
H.S.P	Horas de Sol Pico (hrs)

El arreglo de los paneles Fv se determina en base a las especificaciones de entrada del inversor y especificaciones de salida del panel:

$$No\ de\ filas\ en\ serie = \frac{V_{inv}}{V_m} \quad (35)$$

$$No\ de\ columnas\ en\ paralelo = \frac{I_{inv}}{I_m} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} &Potencia\ del\ Inversor \\ &= Numero\ de\ paneles\ FV \\ &* Potencia\ del\ panel\ FV \end{aligned} \quad (37)$$

Es importante mencionar que el arreglo fotovoltaico no necesariamente debe tener la configuración ni el número de módulos, esto solo se refiere a las conexiones en serie y paralelo entre los módulos para tener las condiciones necesarias de entrada del inversor (Loaeza Salcedo, Ramiro Carmona, & Tenorio Cesalín, 2012).

2.5. AUTOMATIZACIÓN DE SISTEMAS ELÉCTRICOS

Un proceso industrial es un conjunto de pasos a seguir con el fin de elaborar un producto o desarrollar una actividad ligada a la productividad. Implementar sistemas de control demanda el uso de maquinaria, equipo y tecnología acorde al objetivo o fin el proceso. El control eléctrico es una técnica de regulación de energía a los elementos o dispositivos, en principio, se debe disponer de un conjunto de elementos físicos interconectados con el propósito de regular la

energía demandada, realizando la tarea de control o acción de control (Ordóñez Sánchez & Resabala Lara, 2020).

En procesos industriales operaciones tales como la inversión de marcha, el frenado, la limitación o variación de la velocidad, el torque y el control de la aceleración en máquinas eléctricas son frecuentes. También operaciones más complejas como la de secuenciación y sincronización de mecanismos (Marin Ruiz & Teodoro Romero, 2016).

El control industrial optimiza la producción de dichos procesos; al mejorar tiempos, aumentar producción, mejorar la calidad, etc., La confiabilidad, seguridad y mantenibilidad de los sistemas, son características fundamentales que deben poseer (Ordóñez Sánchez & Resabala Lara, 2020).

Sistema de control de lazo abierto. Se denominan sistemas de control de lazo abierto cuando la salida no tiene efecto sobre la acción de control, es decir no se compara la salida con la entrada de referencia (Ver Figura 7). Por lo tanto, para cada entrada de referencia corresponde una condición de operación fija. Así, la precisión del sistema depende de la calibración y del operador cuya función será la del controlador (Cosco Grimaney , 2011).

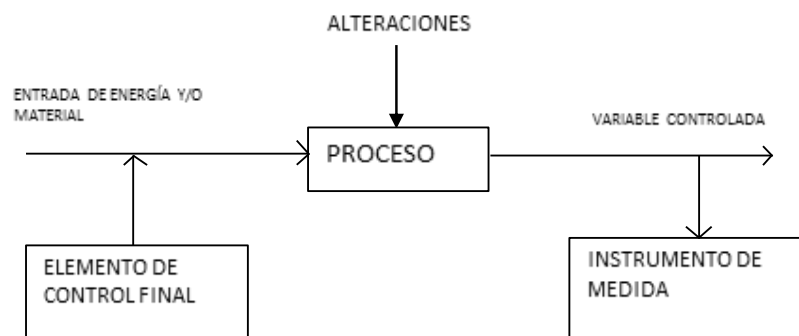


Figura 7. Sistema de control de Lazo abierto
(Cosco Grimaney , 2011)

Sistema de control de lazo cerrado. - Se denomina sistema de control de lazo cerrado cuando frente a presencia de perturbaciones, tiende a reducir la diferencia entre la salida del sistema y el valor deseado o "set point"; (Ver Figura 8), realizando el control de forma automática como se puede ver en la Figura 8 (Cosco Grimaney , 2011).

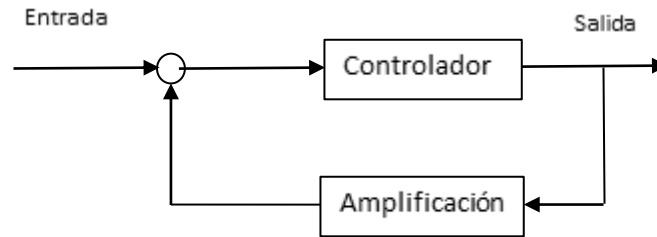


Figura 8. Sistema de control de Lazo cerrado.
(Cosco Grimaney , 2011)

De acuerdo con las normas UNE, tanto los esquemas de mando como de fuerza, se representarán preferentemente en formato especial de dibujo, ambos esquemas se dibujan en el mismo plano, se dibujará el de fuerza y el de mando a la derecha. Se van en planos diferentes, irá primero el de fuerza y en el plano siguiente el de mando (Fernández Morales & Enrique Duarte, 2015).

La representación de los circuitos de alimentación de los actuadores. Aparecerán los contactos principales de los siguientes elementos:

- Dispositivos de protección (disyuntores, relay, etc.)
- Dispositivos de conexión y desconexión (interruptores, contactores, etc.)
- Actuadores (motores, líneas, etc.)

Todos los elementos estarán identificados por la clase de aparato, número dentro del conjunto y su función. También es aconsejable, si el esquema es muy complejo, incluir referencias a bobinas y contactos auxiliares como se puede ver en la Figura 9 (Fernández Morales & Enrique Duarte, 2015).

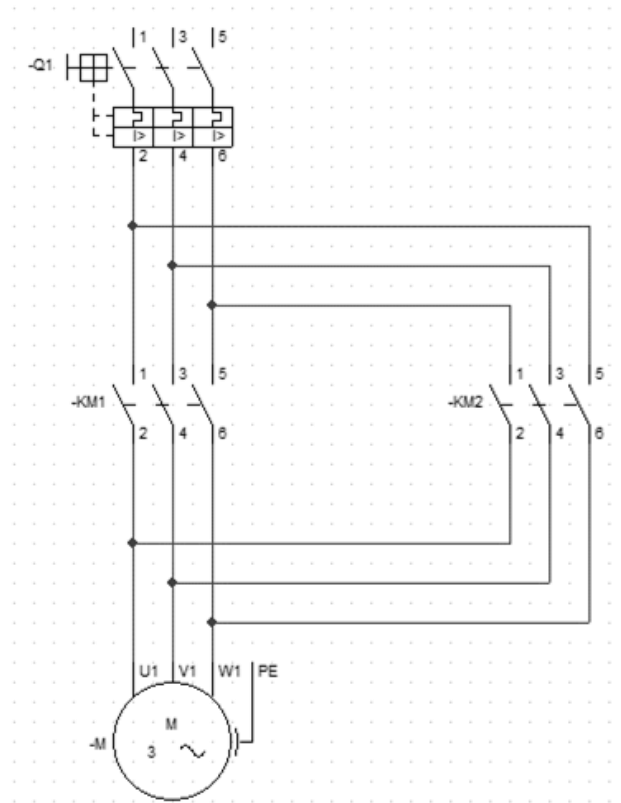


Figura 9. Esquema de control de fuerza.
(Fernández Morales & Enrique Duarte, 2015)

En un esquema de mando la representación lógica de los elementos que componen el automatismo que gobierna la instalación (Erasquin Marsal, 2019). En él representaremos los siguientes elementos:

- Bobinas de los elementos de mando y protección (contactores, relés)
- Contactos auxiliares de los aparatos.
- Elementos de diálogo hombre-máquina (pulsadores, finales de carrera)
- Dispositivos de señalización (lámparas, sirenas, etc.)

Todos los elementos estarán identificados por la clase de aparato, número dentro del conjunto y la función (principal, auxiliar u otras) que desarrolla.

Es habitual dividir el plano en una cuadrícula, marcada en los bornes del dibujo, que se identifican (Ver Figura 10) con letras en sentido vertical y con números en horizontales (Fernández Morales & Enrique Duarte, 2015).

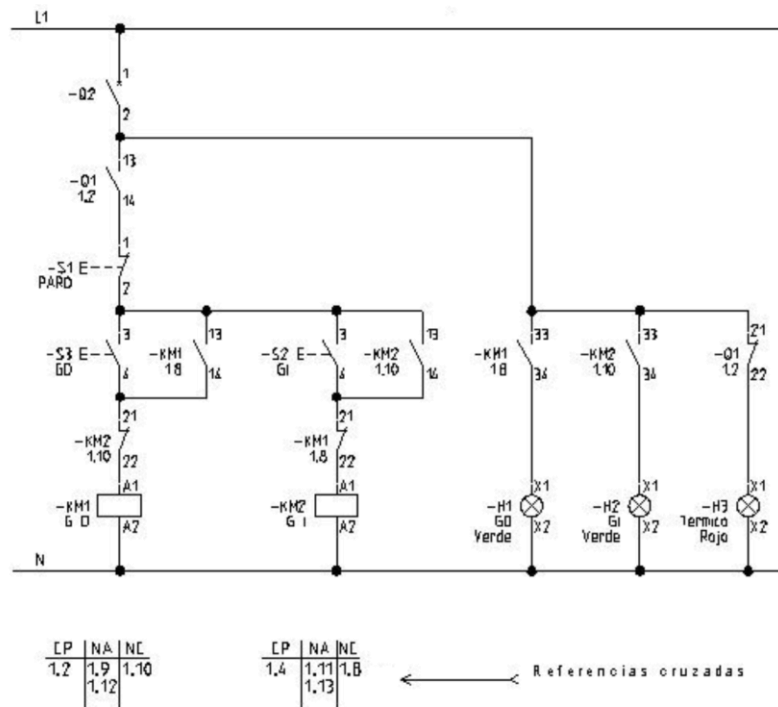


Figura 10. Esquema de control de mando (Fernández Morales & Enrique Duarte, 2015)

En lo que se refiere a la automatización de sistemas eléctricos es un tema que ha adquirido gran importancia a partir de la automatización de los procesos industriales y de la incorporación cada vez más notoria de la electrónica básica y de la electrónica de potencia en el control y automatización de sistemas (Jasinski, Borkowski, Sikorski, & Kostvla, 2018).

Hoy en día en un ambiente típicamente industrial se pueden tener tecnologías convencionales (tales como los controles por relevadores y arrancadores magnéticos) combinados con tecnologías de expansión (tales como los controladores lógicos programables, los arrancadores de estado sólido) y nuevas tecnologías (como la fibra óptica) operando todas en un sistema de manufactura (Serra, 2009), en donde se requiere programabilidad, expansibilidad, confiabilidad, mantenibilidad y versatilidad como factores de los sistemas de producción y que requieren de un conocimiento del equipo de control a nivel conceptual y de diseño (Chaj Ramírez, 2008).

2.6. REVISIÓN ACTUAL DE LA LITERATURA ACERCA DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA

Los sistemas de estudio acerca de la automatización para la mejora de la calidad de la energía actualmente han experimentado cambios considerables en los últimos años, analizando la presente investigación en comparación con la investigación en (Gondoman, y otros, 2018), realizó un estudio comparativo para establecer las condiciones en las que pueden aceptarse algoritmos computacionales basados en definiciones alternativas del factor de desequilibrio. El estudio se centró en la evaluación de algoritmos de cálculo basados en diferentes definiciones del factor de desequilibrio (Das, Bass, Kothapalli, Mahmoud, & Habibi, 2018). Una referencia importante con la que se puede relacionar la metodología en la mejora de la calidad de la energía se ha encontrado resultados que pretendían definir rangos de compatibilidad entre los niveles de desequilibrio típicos y/o admisibles especificados en diversas normas y evaluar el rendimiento de los instrumentos de medición de la calidad de la energía que adoptan diferentes definiciones del factor de desequilibrio. Dicha investigación presentó el diseño y la implementación de un prototipo de registrador de cortes y caídas de tensión de la cual es importante conocer los registros en las perturbaciones de la energía. Este registrador sirve como alternativa de bajo coste para estudiar la calidad de calidad de la onda de tensión en redes de distribución (Rauch & Brückl, 2023).

En otro documento a diferencia del presente documento aborda en primer lugar algunas definiciones relacionadas con la calidad de la energía en términos de construcción del protocolo para el registro de dos perturbaciones de la onda de tensión, interrupciones y las caídas de tensión. El equipo consta de un sistema de adquisición de datos y una interfaz gráfica de usuario que permite el análisis y la especificación de los niveles de tensión para registro de perturbaciones (Mulenga, 2022).

En otra literatura que también aborda la regulación del sistema eléctrico en uno de los temas presentados en la metodología del documento, desarrolla un estudio acerca de la corrección del factor de potencia (PFC) aislado, está destinado a alimentar uno o más postreguladores no aislados para permitir una simplificación

sustancial de la arquitectura general y una reducción de costes. El uso de un convertidor resonante LLC como PFC aislado se ha considerado y demostrado muy recientemente, suscitando la atención de la industria debido a las favorables características del convertidor que han llevado a su éxito como convertidor cc-cc (Sucameli & Adragna, 2023).

Otro de los temas de investigación importantes de acuerdo con los flujos de energía (como el método de Newton-Raphson) se propone un método nuevo y sencillo basado en la transformación de Clarke para detectar perturbaciones y generar señales de compensación para los dispositivos de mitigación de la calidad de la energía. El objetivo es subsanar las deficiencias de los enfoques existentes. En el estudio se introduce la transformación de Clarke mediante la presentación de vectores (Saribulut & Ameen, 2023).

Como se define en la implementación de la Generación Distribuida (mencionado en la presente investigación) a diferencia de la propuesta de automatizar los elementos de regulación, los sistemas eléctricos interconectados (SIP) existentes se están viendo sobrecargados por la expansión de las industrias y residencias, junto con la incorporación de fuentes de energía renovables que provocan graves fluctuaciones de frecuencia, tensión y potencia en las líneas de interconexión. La regulación automática de la tensión (AVR) y los lazos de control de frecuencia de carga (LFC) proporcionan energía de alta calidad a todos los consumidores con desviación nominal de frecuencia, tensión y potencia de conexión, garantizando la estabilidad y seguridad del IPS en estas condiciones. En el presente artículo se investiga un controlador proporcional integral derivativo (PID) para el control efectivo de un IPS de cuatro áreas. Cada área del IPS tiene cinco unidades generadoras, incluyendo gas, recalentamiento térmico, hidroeléctrica y dos unidades generadoras de gas, térmico, hidráulico y dos fuentes de energía renovable: eólica y solar fotovoltaica. El controlador PID se ajustó mediante un algoritmo de optimización metaheurístico conocido como optimizador basado en el gradiente (GBO). La integral de tiempo multiplicada por el valor cuadrático del error (ITSE) se utilizó como criterio de error para la evaluación de la función de idoneidad. Se evaluaron las respuestas de tensión, frecuencia y de GBO-PID, se

evaluaron y compararon con la derivada integral proporcional (GBO-IPD), integral derivativa inclinable (GBO-TID) e integral proporcional (GBO-I-P) con una perturbación de carga (SLP) en las cuatro zonas (Ali, y otros, 2023).

Las características de las perturbaciones en el funcionamiento de las instalaciones de GD, a diferencia de otros estudios de investigación con el presente tema se estudia la alta velocidad de los procesos electromecánicos transitorios y las desviaciones significativas de los indicadores de calidad de la energía respecto a los valores estándar, requieren una mejora y un aumento de la velocidad de los dispositivos de automatización. Los dispositivos electroautomáticos modernos deben determinar las regiones de funcionamiento (normal y de emergencia) y adaptar los algoritmos de funcionamiento a las condiciones del modo actual. El estudio presentado propone métodos desarrollados para utilizar la prueba de relación de probabilidad secuencial de Wald (WSPRT) con el fin de mejorar la fiabilidad y la eficacia de los dispositivos de automatización del sistema eléctrico. El artículo proporciona ejemplos del uso de WSPRT en los dispositivos de desconexión automática de la carga de frecuencia, desconexión automática de transformadores y control de la calidad de la energía. Los resultados de la modelización matemática confirman el alto rendimiento de la WSPRT en los dispositivos de automatización del sistema eléctrico gracias al aumento de la fiabilidad de la identificación de las regiones operativas y la velocidad de respuesta (Kulikov, Ilyushin, Loskutov, Suslov, & Filippov, 2022).

Uno de los estudios importantes sobre la mejora de la calidad de la energía es el análisis con redes neuronales sobre la identificación de anomalías y eventos de calidad de energía es un sistema eléctrico interconectado inteligente, se ha desarrollado una metodología basada en redes neuronales convolucionales profundas. La metodología desarrollada tuvo una tasa de precisión del 84% en la identificación del tipo de falla que ocurría y un 95% en el nodo donde se presentaba, para lograr dichos resultados se utilizó una red neuronal que tenía una estructura que permitía determinar las características específicas de las fallas, la información recogida por la estructura se encargó de determinar tanto el tipo de falla que ocurría como el nodo donde se presentaba, logrando desarrollar una

metodología eficaz para la identificación de anomalías y eventos de calidad de energía (Guevara Gómez, 2023).

La importancia de conocer otros estudios y temas de investigación mostrados en la literatura en los párrafos anteriores es comparar y mejorar una metodología alternativa, oportuna e inédita en la que se logre desarrollar una metodología eficaz para la identificación de anomalías y eventos de calidad de energía en un sistema eléctrico interconectado inteligente así como el desarrollo de elementos de automatización, regulación e integración de sistemas de energías alternas, lo que resulta en una herramienta útil para mejorar la gestión y supervisión del sistema eléctrico. Además, se espera que esta metodología permita identificar y regular de manera más precisa y rápida las fallas y anomalías, lo que resultará en una mejora significativa en la seguridad y fiabilidad del sistema eléctrico.

A diferencia de otros trabajos similares se puede notar la mejora en la metodología del análisis de la calidad de la energía generando otro enfoque integrando elementos de regulación, sistemas fotovoltaicos, automatización, análisis estadístico, generación de estudios eléctricos en el flujo de carga (Corto Circuito, Coordinación de protecciones, variaciones de corriente, factor de potencia, flujo de potencias) considerando los diferentes esquemas de trabajo de la empresa de acuerdo con las necesidades de funcionamiento de las diferentes máquinas respecto a las líneas de producción, del cual es la importancia de desarrollar el presente tema de investigación que otros criterios no lo contemplan ya que genera una manera integral de realizar el análisis del sistema eléctrico.

3. PROCEDIMIENTO

3.1. CARACTERÍSTICAS DE LA EMPRESA

El método utilizado en esta investigación constituye distintas fases enfocadas a la selección de los elementos de regulación (banco de capacitores, filtro de tensión-corriente), que contribuye al consumo de energía eléctrica, para la construcción de esquemas de control y poder predecir las condiciones en las perturbaciones de los parámetros de la calidad de la energía.

En este capítulo se describe la metodología propuesta, sustentada en la teoría de los conceptos acerca de las perturbaciones de la calidad de la energía como el factor de potencia, variaciones de tensión y corriente, así como el aprovechamiento de las nuevas tecnologías como el sistema fotovoltaico, elementos que integran la automatización en sistemas de control para poder generar una combinación de los esquemas de control. Se pretende realizar una interacción entre los dispositivos de regulación que permita identificar las mejores condiciones de los parámetros de la calidad de la energía.

El análisis se desarrolla en la planta Mallas y Armex de Aguascalientes S.A. de C.V. (MACEP) es una empresa de México, con sede principal en Aguascalientes. Opera en fabricación de productos de resorte, alambre, mallas y Armex a diferentes especificaciones de acuerdo con las necesidades de construcción de los clientes, así como para el sector minero. La empresa fue fundada el 16 de abril de 2013, actualmente emplea a 95 personas (2020), la empresa se encuentra en Carretera a colonia Hidalgo de Ojuelos Km 2.2, en el Municipio de Fresnillo, estado de Zacatecas como lo muestra la Figura 11.



Figura 11. Ubicación de la planta MACEP Aceros.
(Google Maps, s. f.)

La empresa MACEP dentro del proceso de conformado de materiales desarrolla la construcción de resortes, alambres, mallas, varillas y alambrión con reducción de diámetro de acuerdo con las especificaciones, troquelado para la conformación de diferentes configuraciones en las varillas desarrolladas como peso, diámetro, espaciamiento, dimensiones de configuración, coeficientes de corrugado, límites de fluencia, alargamiento a la ruptura, corrugaciones y coeficientes de corrugado, resistencia a la fuerza cortante, desarrollado por procesos de soldadura, la lista de productos se puede ver en la Figura 12.



Figura 12. Materiales fabricados en la empresa.
(Vélez Moreno, 2021)

Dentro de sus procesos de manufactura se tienen diferentes máquinas para el desarrollo de la empresa la cual se describen a continuación:

Estirado y laminado en frío (trefilado). Con el proceso de estirado o laminado en frío (Figura 13), generalmente llamado trefilado se deforma la estructura molecular del acero, disminuyendo el diámetro e incrementando la longitud y resistencia de este (Vélez Moreno, 2021). La resistencia y características finales del alambre dependerán de la composición química del alambraón y de la reducción de área en el trefilado.

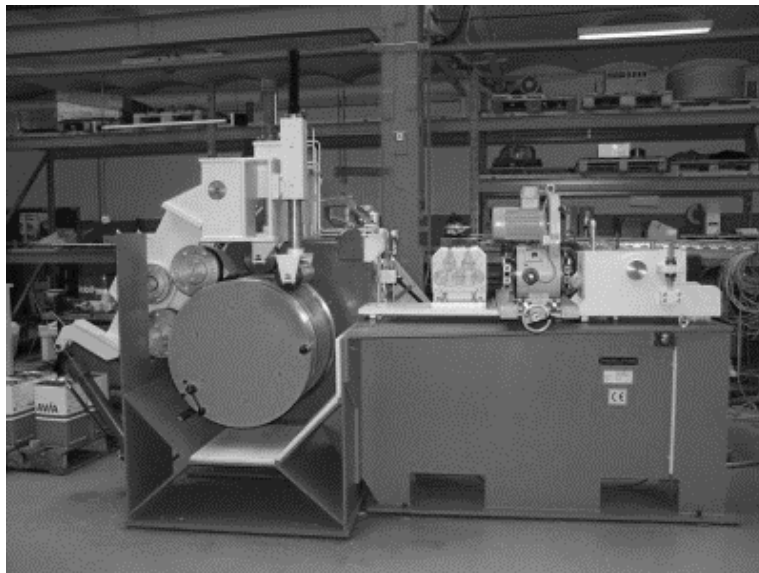


Figura 13. Estirado en frío.
(QuimiNet, 2021)

Trefilado de alambres de acero. - El alambre de acero trefilado es un material de gran interés industrial. Se emplea masivamente en las obras de hormigón pretensado, en los cables de la minería y de la industria pesquera y en la industria del automóvil como hilos muy finos para el refuerzo de neumáticos (Atienza Riera, 2001).

El proceso de trefilado con el que se obtienen estos alambres es una de las más antiguas operaciones de conformado de metales (Atienza Riera, 2001). Consiste, esencialmente, en reducir las dimensiones de una barra haciéndola pasar a través de una matriz cónica por estirado en frío (Argüello Avilés, 2012), como lo muestra la Figura 14.

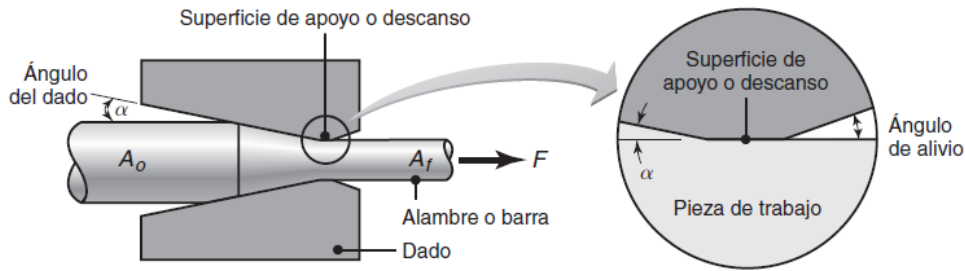


Figura 14. Trefilado de acero.
(Kalpakjian & Schmid, 2008)

Uno de los análisis que se realizan en el proceso de trefilado son los límites y alargamientos a la ruptura se definen en el ensayo de tracción que consiste en la aplicación de una carga uniaxial de tracción sobre el material y en la medición de las deformaciones que se producen como se describe en la Figura 15 (Límites de fluencia y alargamiento a la ruptura), estas deformaciones son triaxiales y están constituidas por un alargamiento en la dirección que se aplica a la carga y acotamientos transversales a la misma. En el caso de aceros estirados y laminados en frío, la transición de la zona elástica a la plástica es continua y gradual, por lo que es difícil su determinación. Por esta razón se toman los valores convencionales de la tensión de fluencia. Estos valores se determinan tomando alargamiento plástico o un alargamiento total bajo carga.

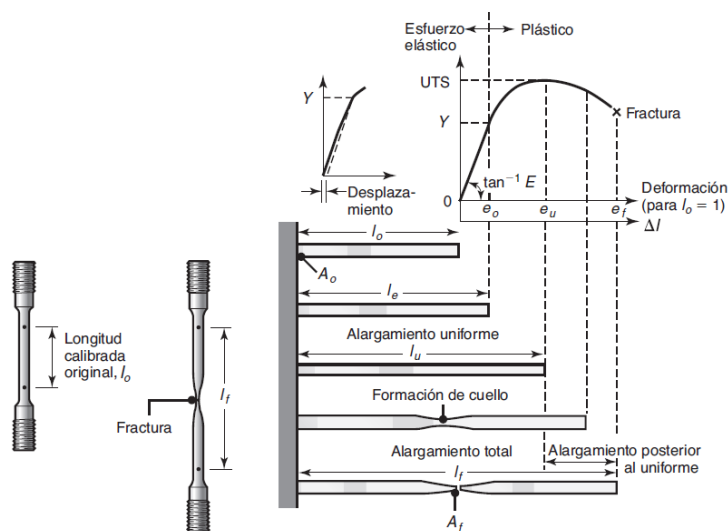


Figura 15. Límites de fluencia y alargamiento a la ruptura.
(Kalpakjian & Schmid, 2008)

El sistema eléctrico de la máquina (es un poco antigua) se compone de tres motores de 10 HP con un consumo total de 22.380 kW de energía, el método de arranque a tensión plena por medio de contactores de arranque y paro por lo que se generan muchas variaciones de corriente en el funcionamiento ya que presenta arranques y paros muy continuos debido al acomodo del material y daño del acero generando sobrecalentamientos tanto en los motores como en los rodillos de guía. Las variaciones de corriente fluctúan entre 37 y 45 Amp generando variaciones importantes debido a los constantes paros de la máquina.

Corrugaciones y coeficiente de corrugado. La adherencia al concreto depende del tamaño, forma y posición de las corrugaciones. Para poder comparar varillas con corrugaciones de diferentes geometrías se propuso el coeficiente de corrugado, como se observa en la Figura 16, el cual representa por unidad de superficie de la varilla, la suma de las áreas de las corrugaciones, proyectadas en un plano perpendicular al eje de la misma.

Características	Barras corrugadas			
	B 400 S	B 500 S	B 400 SD	B 500 SD
Tipo de acero	B 400 S	B 500 S	B 400 SD	B 500 SD
Norma de producto	UNE 36068	UNE 36068	UNE 36065	UNE 36065
Límite elástico R_e (MPa)	400	500	400	500
Carga unitaria de rotura R_m (MPa)	440	550	480	575
Relación R_m/R_e	1,05	1,05	$\geq 1,20$ $\leq 1,35$	$\geq 1,15$ $\leq 1,35$
Relación R_e real/ R_e nominal	-	-	$\leq 1,20$	$\leq 1,25$
Alargamiento de rotura A_5 (%)	14	12	20	16
Alargamiento total bajo carga máxima A_{gt} (%)	Suministrado recto	5,0	5,0	7,5
	Suministrado en rollo*	7,5	7,5	10,0

* Los resultados pueden verse afectados por el método de preparación de la muestra para su ensayo. Pueden aceptarse aceros que presenten valores característicos que sean inferiores en un 0,5%.

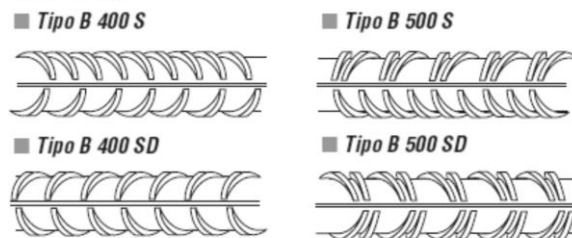


Figura 16. Corrugaciones y coeficiente de corrugado. (Calsider, 2008)

La máquina de corrugado tiene un motor de 15 HP generando un consumo de energía total de 12 kW presentando variaciones de corriente hasta 30 Amp por el sistema de arranque del motor (Tensión Plena), la máquina tiene pocas variaciones de corriente considerables, aunque el factor de potencia en cada máquina (3 máquinas) es muy bajo de alrededor de 82% dicha máquina genera muy pocas fallas por ser muy compacta y requiere de poco mantenimiento.

Soldadura por resistencia eléctrica. - La soldadura eléctrica o electrosoldadura es también conocida como soldadura por resistencia. Es sin duda uno de los tipos de soldadura más conocidos y extendidos (Cabrera Escobar & Cabrera Escobar, 2018). El paso de la corriente en la soldadura eléctrica ocurre con precisión y bajo una presión controlada por la máquina en los puntos donde serán fusionados los elementos (Cabrera Escobar & Cabrera Escobar, 2018).

El sistema eléctrico de la máquina se compone de dos autotransformadores formadoras de arco eléctrico de 9,325 kVA, se tiene 31 electrodos en fila para la electrosoldadura y dos motores de 15 HP, con un consumo de energía total de 29.840 kW, se genera un consumo de corriente de 60 Amp, debido a los constantes paros y arranques y derivado de funcionamiento propio de la máquina se presentan variaciones importantes de voltaje y corriente así como variaciones del factor de potencia por debajo del 90%. Se genera un sobrecalentamiento en los equipos por las constantes variaciones de paros ya que los operadores (3 personas) deben acomodar y estar guiando las varillas de acero hacia la mesa de ensamble-empalme de estas dentro de los canales de área de electrosoldado dependiendo de las especificaciones de la distancia de separación en la formación de la malla. En este caso se presentan constantes fallas debido a que los equipos ya son muy antiguos y requieren de mantenimiento en las boquillas de los electrodos.

Es esa presión la que creará la unión cuando, por el calor, el metal fundido fluya. Al enfriarse, se solidifica y se habrá establecido la conexión metálica por la soldadura eléctrica. Son los electrodos, varillas metálicas por donde pasa la corriente eléctrica, los que harán la presión y todo el proceso de fusión como lo muestra la Figura 17.

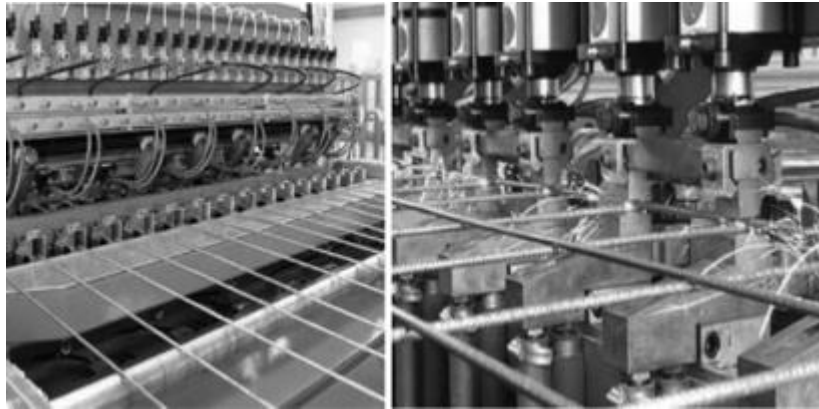


Figura 17. Proceso de mallas electrosoldadas.
(JACOM Strategic Allies, 2021)

3.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN

Para comprender el tipo de investigación debemos tener muy claro cuáles son los objetivos, la población a estudiar las variables que se pueden recoger, así como los métodos para desarrollarlo al tiempo de analizar cada fase de la investigación, los medios técnicos de los cuales se tiene disponibilidad que necesitaremos entre otros aspectos. La investigación aplicada pretende describir un fenómeno dentro de una población de estudio de la cual consta de empresas integradas en tarifas de gran demanda las cuales generan gran cantidad de consumo de energía eléctrica y derivado del funcionamiento de los equipos genera perturbaciones de voltaje y corriente lo cual se deberá medir el fenómeno y describirlo de acuerdo con la población de estudio. A su vez los estudios observacionales pueden descritos y analizados en función de los objetivos que se persigan y el diseño para alcanzarlos, en estudios de investigación aplicada, la investigación se limita a medir la presencia, características o distribución del comportamiento de las características y fenómenos del sistema eléctrico, pretendiendo relacionar factores de riesgo con determinados efectos generando una relación de las causas y los fenómenos generados (Veiga de Cabo, De la Fuente Díez , & Zimmermann Verdejo, 2008).

El estudio experimental trata de estudiar los factores desconocidos y sus efectos en el tiempo con el analizador de redes para conocer las variables que están afectando e integrar el estudio experimental en los fenómenos para definir las características experimentales de los grupos de estudio de acuerdo con el

funcionamiento de los equipos que integran la empresa realizando pruebas y diagnósticos de riesgo a estudiar. Dentro de los estudios se generan ensayos controlados asignados de manera aleatoria en fases o grupos de estudio en cada uno de los buses de conexión del sistema, con el fin de conocer en cada fase las variables generadas como son el factor de potencia, las variaciones de voltaje y corriente, realizar maniobras en los procedimientos preventivos de carácter experimental, dichos estudios analizan el diseño y la existencia de fuentes de falla que son considerados potencialmente los causales (Veiga de Cabo, De la Fuente Díez , & Zimmermann Verdejo, 2008).

La investigación se centra en medir el análisis descriptivo de la presencia y características de los fenómenos determinando los efectos producidos en los cambios durante un periodo de tiempo de ocho meses con el fin de tener oportunidad de interpretar los resultados obtenidos con el analizador de redes así como el desarrollo en campo del listado de las características eléctricas de los datos de placa de los equipos definiendo el funcionamiento específico en cada una de las máquinas, un vez obtenidos los datos se procede a realizar los diagramas eléctricos (Diagrama Estructural, Diagrama Unifilar y Cuadro de Cargas), esto con el fin de realizar la descripción en la visión general del sistema eléctrico de la empresa. Al desarrollar el análisis descriptivo se realizan los cálculos necesarios para determinar si las condiciones de instalación de los equipos como son interruptores, cableado, motores, maquinaria son adecuados y pertinentes a los esquemas de medición de las variables eléctricas. Se genera un recorrido en las instalaciones para determinar las características en el desarrollo de los diferentes mantenimientos tanto correctivos, preventivos, predictivos y determinar las posibles fallas generadas en los equipos. Esto genera la facilidad en realizar estudios de análisis estadísticos en el desarrollo de las potencias activa, reactiva y aparente para asociar las variaciones de corriente respecto al cambio en cada una de las potencias.

El estudio analítico pretende descubrir una relación entre los factores de riesgo y el efecto que producen los cambios en el funcionamiento de los equipos de acuerdo con la necesidad de trabajo de la planta, el estudio es esencial para comprender las condiciones reales en la intervención de los grupos de estudio los cuales se

someten al análisis y poder determinar los efectos resultantes. El estudio analítico se somete a las pruebas de simulación con el software de sistemas eléctricos realizando varias pruebas del flujo de carga así como la coordinación de protecciones, integrando el sistema de control de regulación determinando los factores de confusión y riesgo comparándolo con el diseño inicial de forma correcta que podría validar o invalidar los resultados del estudio, en los estudios se muestra una representación del fenómeno y las posibles relaciones causales definidas en las simulaciones. Se debe tener en claro que desde que actúa un determinado factor de causa produce un efecto para encontrar relaciones de interpretación en los resultados finales del sistema eléctrico en el flujo de carga para cada bus de conexiones, así como en la acometida de conexión general.

La investigación aplicada trata de comprender y resolver alguna situación en la empresa en la calidad de la energía de acuerdo con la necesidad o problema en un contexto cuantitativo para la formulación y delimitación del problema revisando la literatura de acuerdo con el tema de investigación de la calidad de la energía así como la construcción del marco teórico integrando la formulación de las hipótesis, se desarrolla una planeación de la investigación identificando la población de estudio dentro de la empresa realizando estudios estadísticos para generar un plan de muestreo. En la investigación se desarrollan las condiciones principales de funcionamiento de los equipos y las fuentes consultadas, de las que obtendrán los datos más relevantes a ser analizados, son representaciones de las organizaciones dirigidas a descubrir relaciones e interacciones entre variables reales de los sistemas eléctricos en la empresa.

3.3. MUESTRA DE LA INVESTIGACIÓN

El análisis desarrollado en la empresa MACEP abarca todo el sistema eléctrico de la planta en la que se subdivide en dos áreas principales (Voltajes de alimentación a 220V y 440V) integrado dos transformadores respectivamente en la acometida de Comisión Federal de Electricidad (CFE) y dos tableros de fuerza (I-Line) que alimentan a equipos en sistemas independientes.

Las mediciones se realizaron con el analizador de redes Fluke 434-II (Fluke , 2012), por un periodo de tres meses (mayo-noviembre del 2021) en los periodos de mayor consumo puesto que representan en dicho periodo el trabajo de los equipos cuando tiene mayor producción representando un mayor consumo de energía eléctrica dando lecturas reales en la planta como son: niveles de tensión, niveles de corriente, triángulo de potencias, factor de potencia entre otros. Estos análisis se desarrollaron en ambos tableros con el fin de determinar las variables en cada caso.

También se recolectó y analizó las características de conexión en las facturas eléctricas (recibo de CFE) y las demandas de energía eléctrica para checar los estadísticos de consumo y costos en el pago del recibo que fueron proporcionados por Gerente de Planta.

3.3.1. Recolección de datos

La recopilación, monitoreo y análisis de datos en las mediciones de calidad de potencia eléctrica nacen de la necesidad de controlar y mejorar el rendimiento en el sistema de energía.

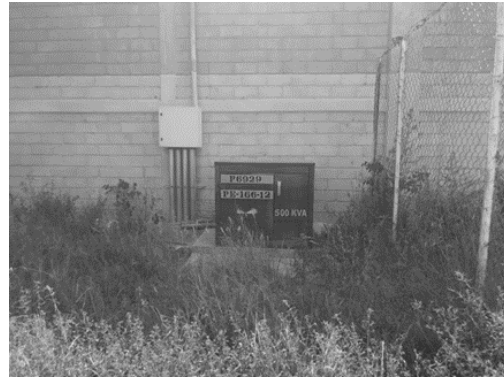
El primer paso que se realizó fue una inspección general de la fuente de alimentación y de los diversos equipos eléctricos de suministro de la energía eléctrica, tal es el caso de transformadores, centros de carga y medidores, acometidas, y centros de distribución, lo cual nos permite tener una vista general del sistema eléctrico de la empresa y sus componentes, como parte de la inspección se tomaron los datos principales (potencia, voltaje, corriente) en un periodo de diez meses (mayo 2021 a noviembre 2021) en cada equipo y se analizaron las conexiones eléctricas que se tenían dentro de la empresa.

3.3.2. Características de la subestación y equipos eléctricos

Las características del sistema eléctrico desde la subestación principal incluyen dos transformadores, uno tipo poste de 150 kVA y voltajes de 13200V/220V y otro tipo pedestal de 500 kVA y voltajes de 13200V a 440V, como se observa en la Figura 18.



a



b

Figura 18. Transformadores de la empresa MACEP Aceros con una potencia de: 150 kVA (a) y 500 kVA (b) respectivamente.

Elaboración propia

Como siguiente paso se procedió al análisis de los centros de carga, en los cuales se colocarían los dispositivos de medición, se analizaron primero las diferentes líneas o fases, se procedió a la identificación del neutro y la tierra física, también de la misma forma se procedió a analizar los diversos dispositivos o maquinaria conectada a los centros de carga, cabe mencionar que dentro de la empresa se manejan 2 tensiones, la tensión 1 es trifásica la cual cuenta con 3 fases 4 hilos con un voltaje de 440V, la tensión 2 es trifásica la cual cuenta con 3 fases 4 hilos a un voltaje de 220V , la inspección de los centros de carga nos ayudara a elegir el centro de carga más idóneo para realizar las mediciones necesarias.

Características de los equipos eléctricos. Se ha tomado lectura realizando el levantamiento de los equipos y maquinaria conectada al sistema eléctrico con alimentación a 440V y 220V contemplando la potencia de cada uno como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Dato de los equipos y maquinaria conectada al sistema eléctrico

CANTIDAD	EQUIPO	POTENCIA	VOLTAJE
2	máquina reparadora de malla criba	186.25 W	440V
2	enderezadora de varilla	4470 W	440 V
1	dobladora de malla cerca	7450 W	440 V
1	compresor de máquina de malla cerca	7450 W	440 V
1	bomba de agua para máquina de malla cerca	3725 W	440 V
1	motorreductor de máquina de malla reja	7450 W	440 V
1	motor de malla criba de 3x3	2235 W	440 V
1	motor de malla criba de 2x2	2235 W	440 V
1	enrolladora de alambre para malla criba	186.24 W	440 V
1	máquina de corte de varilla	3725 W	220 v
4	máquina de soldar lincoln	11000 W	220 V
1	máquina troqueladora de argolla plana	7450 W	220 V
1	máquina dobladora de cerca	7450 W	220 V
3	máquina plancha para restaurar placa	3725 W	220 V
1	máquina cizalla para corte de placa	7450 W	220 V
2	máquina troqueladora de placa	7450 W	220 V
2	máquina despuntadora de placa	3725 W	220 V
2	máquina de soldar Miller	11000 W	220 V
2	compresor de aire para llenado	7450 W	220 V
2	roscadora de varilla	3725 W	220 V
2	bomba de agua para enfriamiento de trefiladora	186.25 W	220 V
3	tornos de maquinados	5587 W	220 V
1	fresadora de maquinados	372.5 W	220 V
2	sierra cinta de maquinados	745 W	127 V
1	mezcladora de cartucho	14900 W	220 V
1	compresor de control vehicular	7450 W	220 V
8	cortadoras de malla criba	63.5 W	127 V

Elaboración propia

La representación gráfica de los equipos instalados en la empresa con respecto a la potencia y voltaje de cada uno de ellos como son: reparadora de malla criba, enderezadora de varilla, máquina de malla reja, máquina de soldar, máquina de corte, dobladoras, troqueladoras, tornos para maquinados, fresadoras, sierra cintas, compresores y cortadoras de malla criba entre otras se ilustra en la Figura 19.

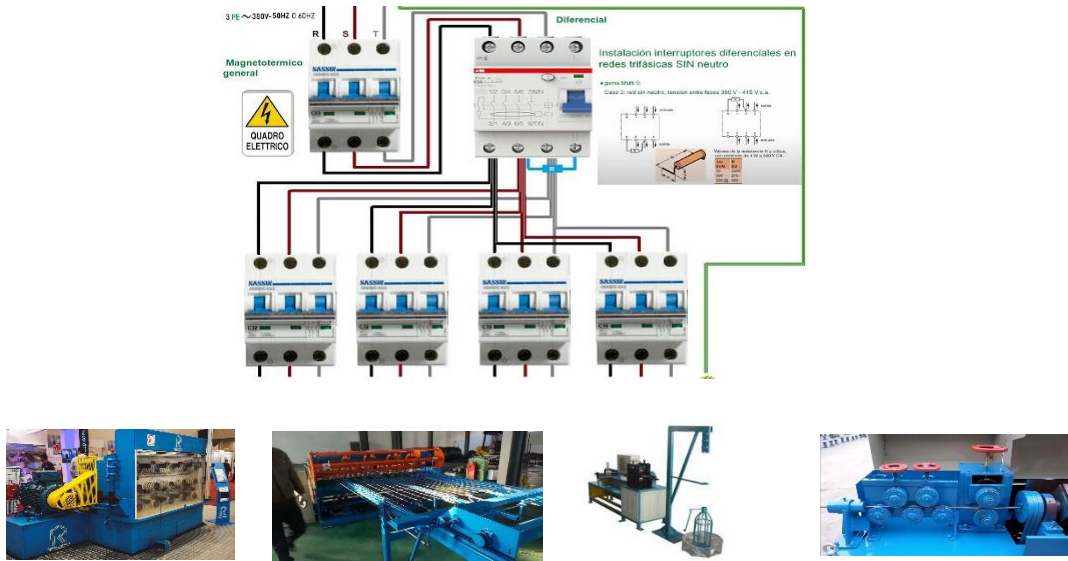


Figura 19. Representación gráfica de la conexión de los equipos descritos en la Tabla 2
Elaboración propia

Se tomaron los datos de los equipos y potencias que integran la máquina de malla correspondiente a motor de arrastre pesado, motor de arrastre ligero, motor de enderezadora y el slitter generadora de rollos de láminas de acero como se puede ver en la Tabla 3.

Tabla 3. Datos de potencia en la máquina de malla

Equipo	Potencia	Voltaje
Cabeza 1 trefiladora 3 pasos de motor	18625 W	440 V
Cabeza 2 trefiladora 3 pasos de motor	14900 W	440 V
Cabeza 2 trefiladora 3 pasos de motor	11175 W	440 V
Cabeza 1 trefiladora 2 pasos de motor	18625 W	440 V
Cabeza 2 trefiladora 2 pasos de motor	14900 W	440 V
Cabeza 1 trefiladora 1 paso 2 motores	22350 W	440 V

Elaboración propia

Datos de los equipos de potencia y voltaje dentro de las máquinas trefiladoras integradas por cabeza trefiladora como lo muestra la Tabla 4.

Tabla 4. Datos de potencia máquina trefilador

Cargas de la máquina de malla		
Nombre	Potencia	Voltaje de trabajo
motor de arrastre pesado	7450 W	440 V
motor de arrastre ligero	22350 W	440 V
motor de enderezadora	2235 W	440 V
motor enrollador	3725 W	440 V
motor de slitter	3725 W	440 V

Elaboración propia

3.3.3. Análisis del consumo de energía eléctrica

La empresa MACEP aceros se encuentra integrada dentro de la tarifa Gran Demanda Media Tensión Horaria (GDMTH), solicitando el recibo de CFE de la empresa MACEP como se muestra en la Tabla 5:

Tabla 5. Recibo de luz de la empresa MACEP

MALLAS Y ARMEX DE AGUASCALIENTES				TOTAL A PAGAR
Domicilio: Carretera Hidalgo de Ojuelos km 4.5				\$79,280
Miguel Hidalgo Col.				
Fresnillo Zac.				
C.P. 99194				
NUM. SERVICIO 11211456342782				
TARIFA	GDMTH	NUM.	MEDIDOR	MULTIPLICADOR
		1150FD		140
CARGA CONECTADA	146 kW	DEMANDA CONTRATADA		146
				FECHA LIMITE DE PAGO: 12 SEP 21
				CORTE A PARTIR: 13 SEP 21
KWh BASE		3,872		
KWh INTERMEDIO		14,892		
kWh punta		1,367		
kW base		99		
kW intermedio		127		
kW punta		139		
kWMax		62		
kVArh		12,451		
FACTOR	DE	85.82		
POTENCIA %				

Elaboración propia

En el momento del análisis de la empresa MACEP se tomaron los datos correspondientes a la tarifa gran demanda media tensión horaria (GDMTH), con una demanda contratada de 216 KW, durante el mes de facturación que comprende del día 31 de julio del 2020 al día 31 de agosto del 2020, la empresa pago a comisión nacional de electricidad (CFE) la cantidad de \$79,280 pesos mexicanos por todos los conceptos que incluye CFE en su recibo de electricidad como se observa en la Figura 18, durante el pasado año 2020 la empresa registro un consumo máximo de 35,371KWh, se puede analizar el consumo de energía eléctrica de la empresa en estudio durante todo el presente año como lo muestran la Tabla 6 y la Figura 20.

Tabla 6. Análisis del consumo de energía eléctrica en la empresa MACEP

Periodo	Demanda máx. KW	Consumo total KWh	Factor de potencia %	Factor de carga %
ago-19	179	35,371	81.78	27
sep-19	142	23,977	89.24	23
oct-19	135	20,729	88.08	25
oct-19	135	6,553	87.93	40
nov-19	151	25,827	87.42	24
dic-19	156	26,826	86.97	23
ene-20	139	24,740	87.97	24
feb-20	132	18,888	90.83	21
mar-20	139	24,251	92.66	23
abr-20	17	951	50.07	58
abr-20	16	4,825	78.1	48
may-20	140	17,400	94.99	17
jun-20	137	21,647	90.49	22
jul-20	148	28,653	90.33	26
ago-20	133	25,964	90.62	26

Elaboración propia

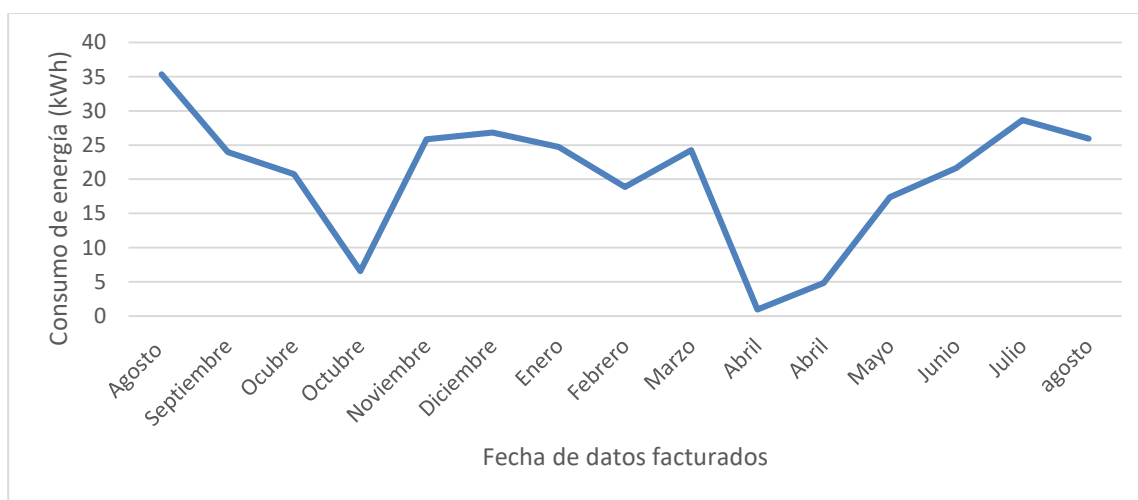


Figura 20. Consumo de energía mensual en kWh.

Elaboración propia

3.3.4. Instalación del equipo de medición en centro de carga

Conexión en tablero a 440Vca.- En este paso se procedió a conectar el analizador de redes en el tablero principal de alimentación de voltaje a 440Vca, anteriormente ya configurado con las diversas características eléctricas de la empresa, el analizador de redes cuenta con conectores tipo gancho o sondas

amperimétricas y conectores tipo caimán como se observa en la Figura 21, para realizar las conexiones primero se tuvo que retirar la carcasa del centro de carga, después la conexión del analizador de redes se realizó de la siguiente manera, primero se realizó la conexión de puesta a tierra, después se conectaron las pinzas de tensión con sus referentes colores y líneas (Narula, Singh, & Bhuvanewari, 2016) como se muestra en la Figura 22, después se conectaron las sondas amperimétricas con sus referentes colores y líneas, después de realizar las conexiones se procedió a grabar los datos mediante la opción de monitoreo con la que cuenta el analizador de redes.

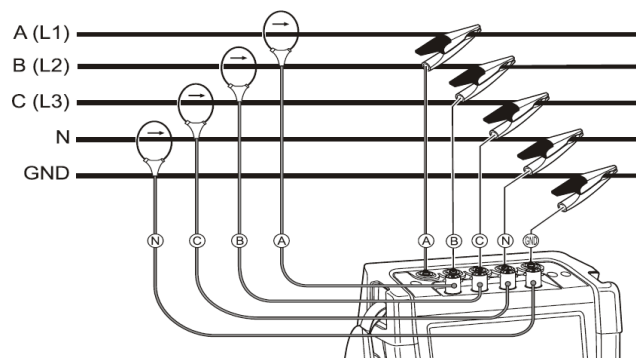


Figura 21. Diagrama de conexión del analizador de redes (Fluke, 2012)



a



b

Figura 22. Conexión del analizador de redes en centro de carga de 440 Vca. Vista del tablero general (a), Vista del interruptor general (b).

Elaboración propia

Conexión en Tablero a 220Vca.- Se procedió primero a la identificación de las líneas y neutro y tierra física, la tensión 220 V, con una trifásica, de igual manera que en el tablero de tensión de 440 V, se procedió a la conexión de los caimanes y sondas amperimétricas de la siguiente forma como se observa en la Figura 23, primero se

conectó la puesta a tierra, como siguiente paso se conectaron las pinzas de tensión o caimanes, después se procedió a conectar las sondas amperímetros con su respectivo color correspondiente a cada línea, de igual forma se dispuso el analizador de redes a monitorear sucesos de corriente, tensión, armónicos de corriente.

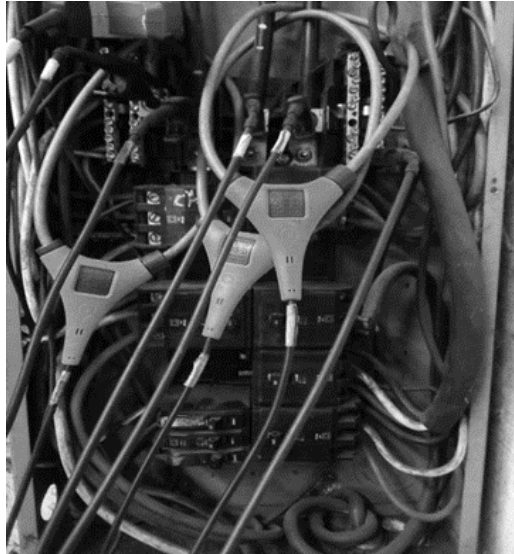


Figura 23. Conexión del analizador de redes en centro de carga de 220 Vca.
Elaboración propia

3.4. CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DE TENSIÓN

Se ha realizado el análisis de la tensión en el tablero principal de alimentación a 440 Vca en la que se han generado fluctuaciones de tensión en las tres fases que corresponden desde los 450 Vca como máximo y como mínimo los 395 Vca como se puede ver en la Figura 24 este análisis se ha representado en un período comprendido de 3 meses del año 2021. Cabe mencionar que las fases 2-3 y 3-1 se encuentran en parámetros más estables dentro de las fluctuaciones manteniéndose entre los valores aceptables de voltaje 420Vca y 445 Vca, sin presentar mayores perturbaciones en el sistema eléctrico de la planta.

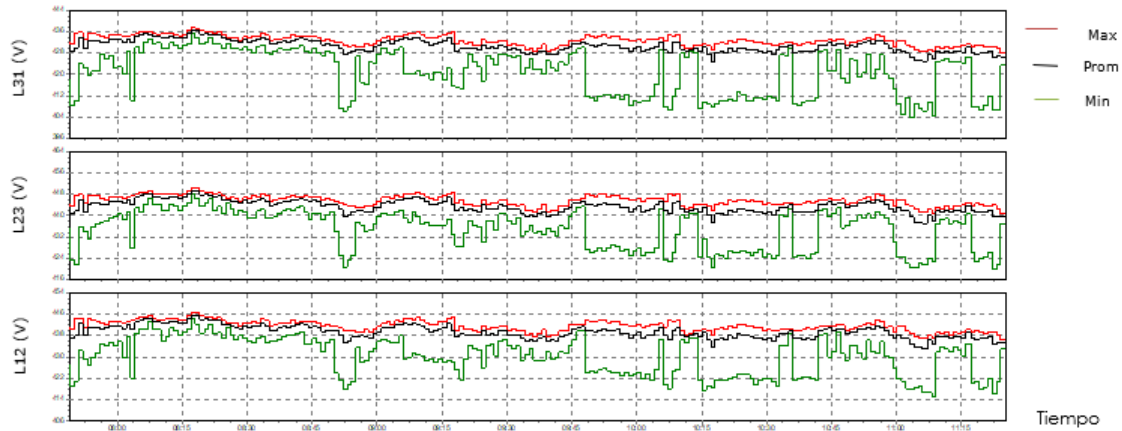


Figura 24. Características de tensión (440 Vca) en tablero principal.
Elaboración propia

Podemos observar en la Figura 25 que las fluctuaciones de tensión en las fases 1 y 2 representan el mayor rango tensiones máximas y mínimas que van desde los 430 Vca hasta un mínimo de 395 Vca provocando un desbalanceo considerable en el sistema eléctrico los que lleva a un funcionamiento de los equipos de manera inestable, así como perturbaciones en el sistema eléctrico general en el punto del tablero principal para alimentación en los demás equipos.

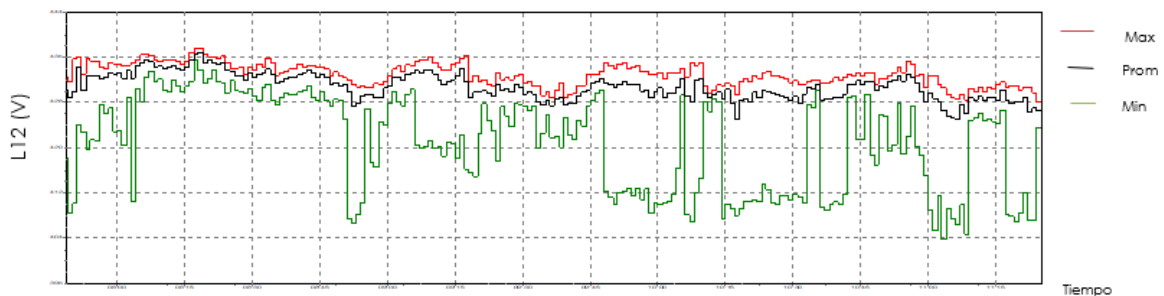


Figura 25. Fluctuaciones de tensión en fases 1 y 2.
Elaboración propia

De acuerdo con el análisis de las tensiones para las fases 1 y 2 se observa en la Figura 26 una parte del periodo de fluctuaciones más representativas máximas y mínimas, en dicho periodo las variables tanto de tensión como de corriente afectan considerablemente al sistema eléctrico interno observando que encienden al mismo tiempo una línea de máquinas como trefiladoras, soldadoras y motores de arrastre ligero superando un 60% del total de la carga conectada de la empresa ocasionando dichas fluctuaciones.

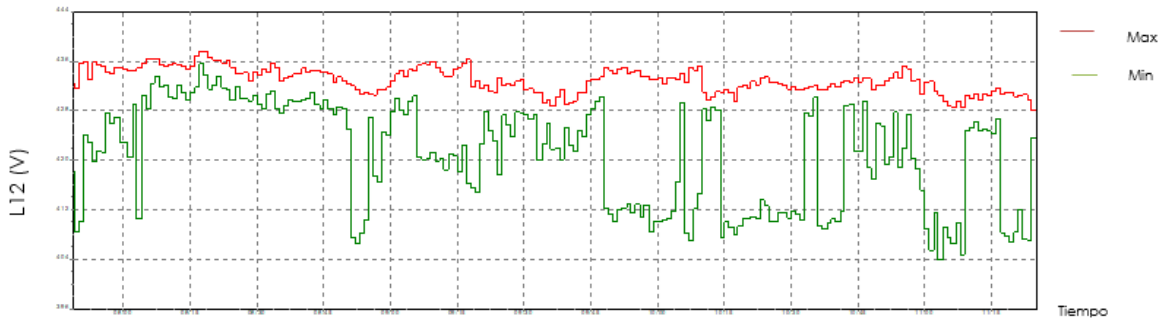


Figura 26. Periodo de fluctuación máximo y mínimo de tensión.
Elaboración propia

3.5. CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DE CORRIENTE

Se ha realizado el análisis de la corriente en el tablero principal de alimentación a 440 Vca en la que se han generado fluctuaciones de corriente en las tres fases que corresponden desde los 105 Amp como máximo y como mínimo los 8 Amp como se puede ver en la Figura 27 este análisis se ha representado en un periodo comprendido de 3 meses. Cabe mencionar que las fases 1 y 3 se encuentran en parámetros de mayor y menor corriente ya que dentro de las fluctuaciones deben mantenerse en condiciones en valores óptimos de tal manera que son las que presenten mayores perturbaciones en el sistema eléctrico de la planta.

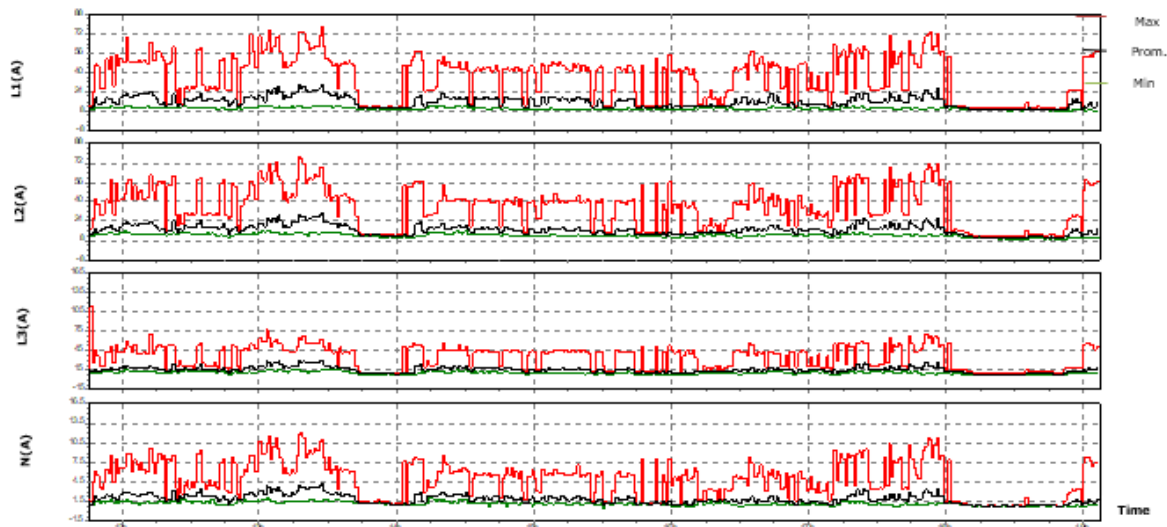


Figura 27. Fluctuaciones de corriente en alimentación principal.
Elaboración propia

Las fluctuaciones de corriente que se muestran en la línea 1 se generan desde los 72 Amp como máximo y como mínimo de 8 Amp mostrando una irregularidad en ciertos periodos cambiando sus características en periodos largos con valores mínimos trabajando con equipos de baja potencia, dichas fluctuaciones se consideran hay un consumo alto de energía eléctrica como se muestra en la Figura 28.

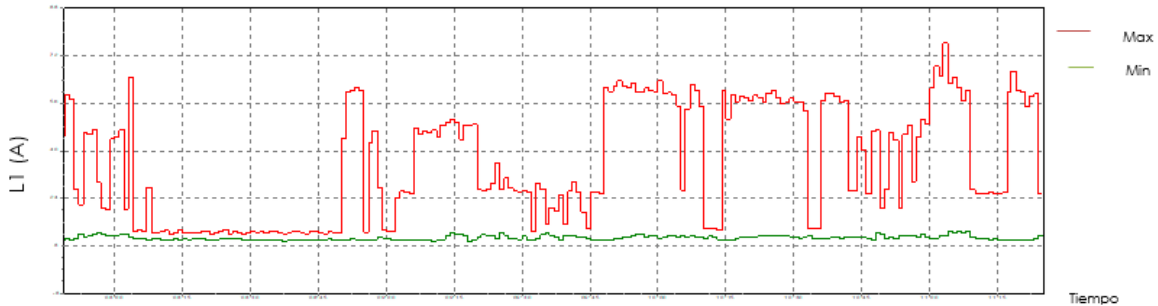


Figura 28. Fluctuaciones de corriente en la fase 1.
Elaboración propia

Las fluctuaciones de corriente que se muestran en la línea 2 se generan desde los 70 Amp como máximo y como mínimo de 8 Amp mostrando una irregularidad en ciertos periodos cambiando sus características en periodos largos con valores mínimos trabajando con equipos de baja potencia, dichas fluctuaciones se consideran hay un consumo muy inestable de energía eléctrica como se muestra en la Figura 29.



Figura 29. Fluctuaciones de corriente en la fase 2.
Elaboración propia

Las fluctuaciones de corriente que se muestran en la línea 3 se generan desde los 105 Amp como máximo y como mínimo de 15 Amp mostrando una irregularidad en ciertos periodos cambiando sus características en periodos largos con valores mínimos trabajando con equipos de baja potencia, se observa así mismo que presente un pico de corriente elevado llegando hasta un valor de 105 Amp, dichas fluctuaciones se considera hay un consumo elevado en un periodo de tiempo corto de energía eléctrica como se muestra en la Figura 30.

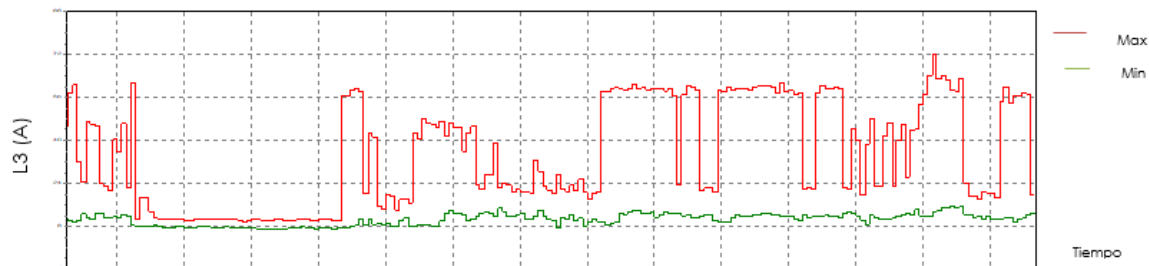


Figura 30. Fluctuaciones de corriente en la fase 3.
Elaboración propia

3.6. CARACTERÍSTICAS DE LAS POTENCIAS Y FACTOR DE POTENCIA (P, Q, S)

Se requiere encontrar el rendimiento óptimo en un sistema eléctrico de potencia para mejorar la calidad de la energía en la cual se analizan las variaciones de tensión y corrientes debidas a los cambios en las Potencias (real, aparente y reactiva) para esto se analizan las características.

Entre las variables que afectan a la corriente, voltaje y factor de potencia, sin duda las más importantes son la característica de las variaciones de las potencias (real, aparente y reactiva), dentro de las variaciones que se presentan son el arranque de motores eléctricos, máquinas de soldar, equipos con variadores de frecuencia), por lo que los factores que afectan la calidad de la energía son las variaciones en los diferentes tipos de cargas.

Entre los factores que influyen sobre la calidad de la energía, son las potencias (Real, Aparente y Reactiva) por lo que se desean analizar los efectos que producen y cuáles son las principales interacciones que se generan de las cuales hay mayor afectación en dichas variaciones como se puede ver en la Tabla 7.

Tabla 7. Análisis de las potencias y el factor de potencia

Voltaje	Corriente	Factor de Potencia	Potencia Real (w)	Potencia Aparente (VA)	Potencia Reactiva (Var)
419	25	0.8178	14837.10006	18142.7	10441.16972
432	95	0.8924	63432.93427	71081.28	32075.08716
430	76	0.8808	49854.83021	56601.76	26800.28246
422	37	0.8793	23779.30383	27043.448	12879.93747
427	105	0.8742	67885.31912	77654.22	37706.25056
420	71	0.8697	44918.47433	51648.24	25492.57459
429	24	0.8797	15687.40156	17832.672	8479.954186
426	43	0.9083	28817.43064	31726.776	13271.92551
422	57	0.9266	38603.57184	41661.528	15666.75321
424	68	0.5007	25003.46792	49937.024	43226.53072
426	40	0.781	23049.87168	29513.28	18431.95898
421	23	0.9499	15930.7311	16770.956	5241.829035
428	97	0.9094	65391.05449	71905.712	29907.21335
434	80	0.9033	54319.98163	60135.04	25798.50056
435	102	0.9062	69640.41881	76848.84	32495.48088

Elaboración propia

Como se puede observar en la tabla, se encuentran valores inferiores del f.p. de acuerdo con la normatividad en las características y límites de las perturbaciones de los parámetros de la energía eléctrica de CFE (CFE L0000-70) (Gobierno de México. Comisión Federal de Electricidad, 2009) (0.9), por lo que en la empresa MACEP aceros se ha obtenido un promedio general de 0.8586 afectando considerablemente a la calidad de la energía ya que se presentan unas fluctuaciones muy marcadas dentro de los consumos de energía tanto de las potencias real, aparente y reactiva.

De acuerdo con el análisis de las potencias se verifican las condiciones de consumo en un período de un año comenzando con el mes de agosto observando variaciones considerables en la potencia reactiva (Ver Figura 31), con respecto a las potencias aparente y real se observan valores muy inestables en el consumo.

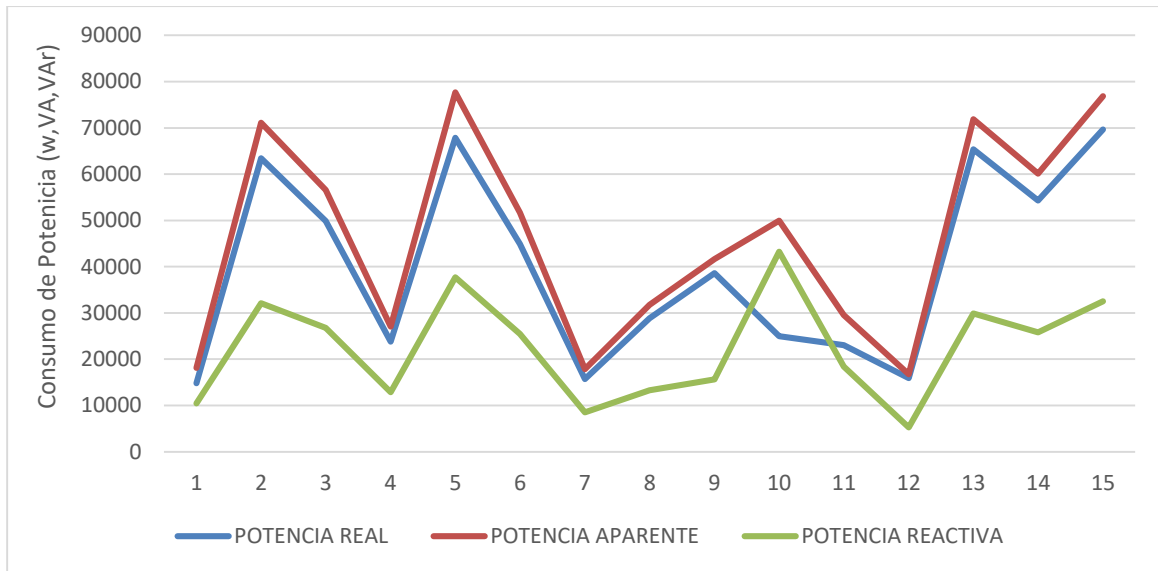


Figura 31. Variación de potencias, real, aparente y reactiva.
Elaboración propia

Así mismo se observan los valores en las fluctuaciones del factor de potencia como se muestra en la Figura 32 obteniendo pocos valores por encima de 0.9 ya que es el valor indicado por la normatividad con el fin de mantener una buena calidad de la energía, se observa así mismo que se encuentra la mayoría de los meses con valores inferiores al 0.9 lo que indica que se encuentra un valor promedio de 0.85, dicho valor representa consumos de energía inestables lo que afecta considerablemente la calidad de la energía.

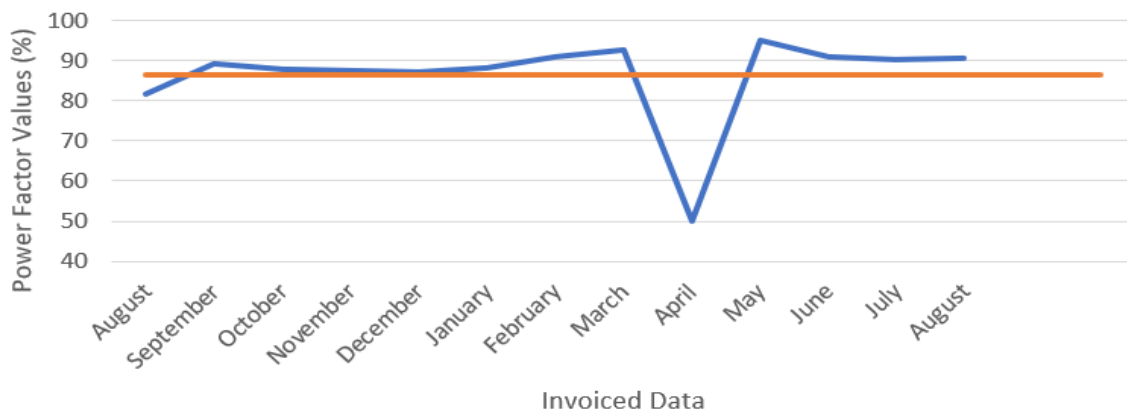


Figura 32. Variaciones del factor de potencia.
Elaboración propia

3.7. SIMULACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO

Se ha realizado el modelado, análisis y optimización del sistema (etap 19.0.1) (Etap Operation Technology, 2023), de acuerdo con el diagrama unifilar (Ver Figuras 33 y 34) del sistema eléctrico con el fin de determinar las características de funcionamiento en el flujo del sistema de eléctrico en la que nos indica los porcentajes de la caída de tensión en cada bus así como el flujo de potencia, se desarrolla la evaluación automática de los dispositivos en cuanto a las pérdidas de potencia real y reactiva en el paso del flujo de corriente en cada sección.

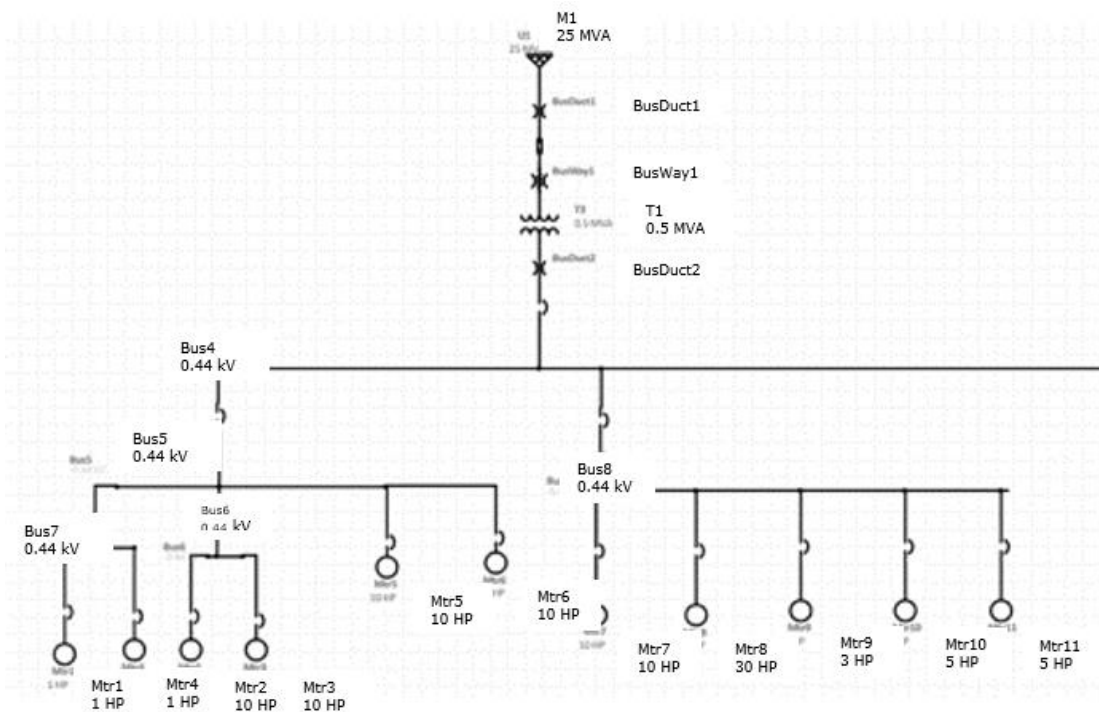


Figura 33. Diagrama unifilar de simulación en etap (parte 1).
Elaboración propia

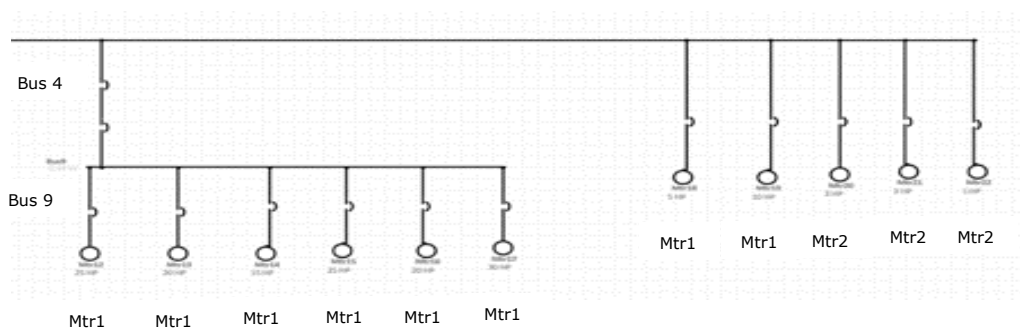


Figura 34. Diagrama unifilar en simulación en etap (parte 2).
Elaboración propia

Se toman en cuenta cada uno de los datos principales integrándolos en cada bloque desde la acometida del sistema de alimentación principal, solicitando dichos datos a la compañía suministradora (CFE) como son: Potencia de 25 MVA, voltaje de alimentación de 13 200 Vca, las reactancias de $2.498 + 3.123j$ secuencia positiva, conexión delta. Así mismo se integran los elementos de conducción y protección que en este caso se toman como un BusDuct tipo feeder aislante de cobre y un fusible para 15 kV a una corriente nominal de 10 Amp, por último, un transformador principal tipo pedestal reductor de 500 kVA con una alimentación en el primario de 13 200V y 440Vca en el secundario, se han tomado en cuenta los datos del transformador en cuanto a su impedancia y taps de derivación con el fin de anexarlos en los datos.

El desarrollo y los datos de cada uno de los elementos que integran el sistema eléctrico se han anexado de acuerdo con cada una de los buses, interruptores y cargas las cuales se han tomado físicamente en campo para cada caso y elaboración del diagrama unifilar de planta, pasando por tipo de motor, tipo de arranque de motores, características de los interruptores y protecciones que integra cada circuito de los buses.

3.7.1. Flujo de carga del sistema eléctrico

La simulación se refiere a generar las condiciones y datos reales integrando los elementos, datos y características eléctricas en el software modelado, análisis y optimización de circuitos de energía (etap) (Etap Operation Technology, 2023), con el fin de simular bajo las condiciones reales el flujo de carga en el sistema eléctrico calculando los voltajes en cada uno de los buses, los diferentes factores de potencia en cada derivación de acuerdo con el tipo de carga conectada, así mismo realiza un estimado en el paso de la corriente para cada bus, simulando el flujo en cada sección de la carga mediante el método de cálculo matemático de sistemas eléctricos (Newton-Raphson y/o Gauss-Seidel) (Nguyen, 1997).

Para comprender mejor el análisis de cálculo se generan mediante las ecuaciones de potencia no lineales de las magnitudes y ángulos de los voltajes de barra. Si se especifican las potencias de generación y carga en todas las barras, el vector

solución contiene magnitudes y ángulos de los voltajes llamadas variables de estado. Dado que el balance de potencia en un sistema eléctrico no puede ser conocido de antemano, debido a la presencia de pérdidas en la red, la potencia en una de las barras no puede ser especificada. Esta barra es conocida como de compensación o referencia, para la que se debe definir la magnitud y el ángulo de su voltaje. En otras barras es conveniente especificar tanto la potencia activa como la magnitud de voltaje debido a su capacidad de regulación de voltaje. A estas barras se le conoce como de generación o voltaje controlado (barra PV). Al resto de las barras se les conoce como de carga (barras PQ). Una barra de referencia o controlada puede ser aquella que tenga una gran capacidad de generación o un nodo de interconexión a un sistema de potencia del cual tome o entregue potencia activa y a la cual puede estar conectada una carga, que posea capacidad de mantener un voltaje especificado a sus terminales. Una barra PQ es aquella que tiene potencia de carga activa y reactiva, o un nodo de interconexión, cualquiera de las dos con una pequeña generación sin capacidad de control de voltaje. Las potencias calculadas en una barra se obtienen a partir de las ecuaciones del método de Newton-Raphson (Ver Figura 35) para encontrar las diferencias entre potencias especificadas y aquellas calculadas en función de las variables de estado proveen las ecuaciones necesarias y suficientes para resolver el sistema de ecuaciones algebraicas no lineales (Játiva Ibarra, Constante Flores, & Cabrera Celi, 2014).

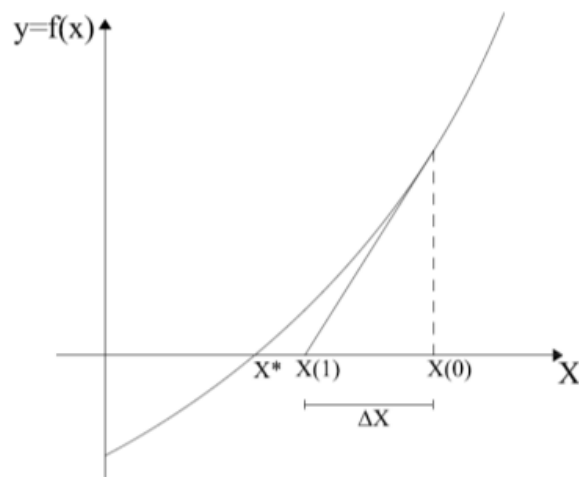


Figura 35. Principio del método de Newton-Raphson.
(Játiva Ibarra, Constante Flores, & Cabrera Celi, 2014)

Dentro de los requerimientos del software se integran primeramente el área de inicio del flujo de carga con el fin de dar los valores de tensión y potencia, así como el porcentaje de operación en los niveles de tensión, como se observa en la Figura 36.

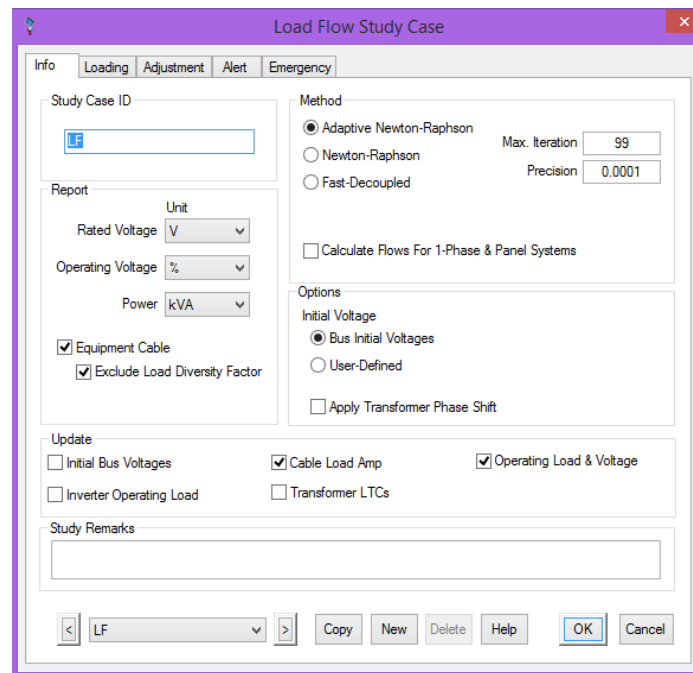


Figura 36. Configuración del flujo de carga en el software etap.
Elaboración propia

Una vez que se han anexado los datos para el proceso de simulación del flujo de carga se realiza la puesta en marcha en el sistema con el fin de analizar el paso de las corrientes máximas en cada uno de los buses que integran el sistema comenzando el análisis desde el fusible (Fuse 1) de protección principal en el lado de alta (13,200V), se selecciona en el display (Display Options) las opciones para el estudio del flujo como pueden ser potencia real, potencia aparente flujo de corriente y la combinación entre ellas de la misma forma se analiza el factor de potencia en cada sección (Bus) del sistema, en este caso se ha decidido realizar el estudio con respecto en las potencias real y la potencia reactiva (kW + jkVAr) en la sección de acometida principal y la sección de máxima carga (Bus 9), en la sección de acometida se observa en la Figura 37, una potencia máxima de 246.2 +j142.6 considerando que la potencia real máxima está entre 255 kW, un porcentaje de operación del 97.9% del total de la carga en el Bus 4.

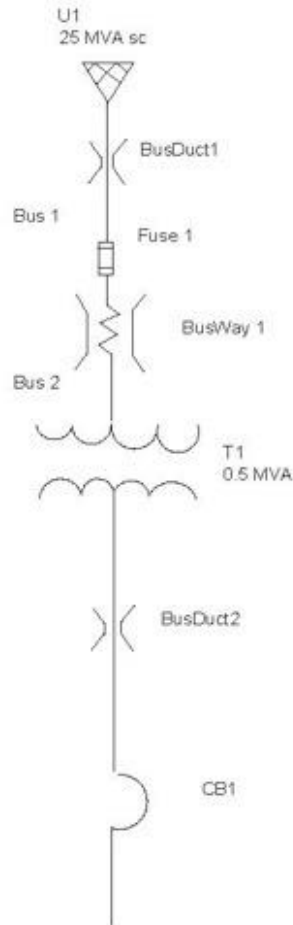


Figura 37. Flujo de carga en acometida (kW + jkVAr).
Elaboración propia

Se ha realizado el estudio del flujo de corriente y factor de potencia analizando los resultados en la acometida (Fuse 1, 13 200V) principal mostrando una corriente máxima de 12.4 Amp y un factor de potencia de 86.53% considerando este último muy bajo de acuerdo con los valores definidos por normatividad permitido de hasta 90%, se observa el valor de la corriente en el bus 4 de 373.3 Amp y un factor de potencia de 86.53% como se observa en la Figura 38.

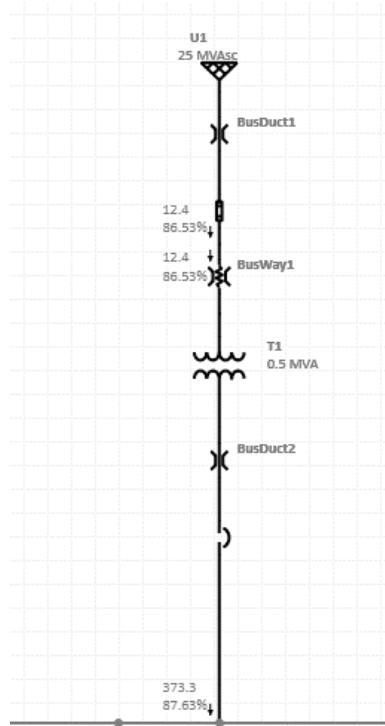


Figura 38. Flujo de carga en acometida (corriente y factor de potencia).
Elaboración propia

Se ha realizado el estudio del flujo de carga en cuanto a la potencia real y la potencia reactiva en el bus 9 que representa el área de mayor consumo y situación más crítica por el trabajo de los equipos en donde se observa una potencia de $138.5 + j72.2$ considerándose dentro de los límites de potencia (135 kW máxima) (Ver Figura 39), así mismo, el flujo de potencia para cada uno de los equipos se encuentra dentro de los límites de trabajo de potencia.

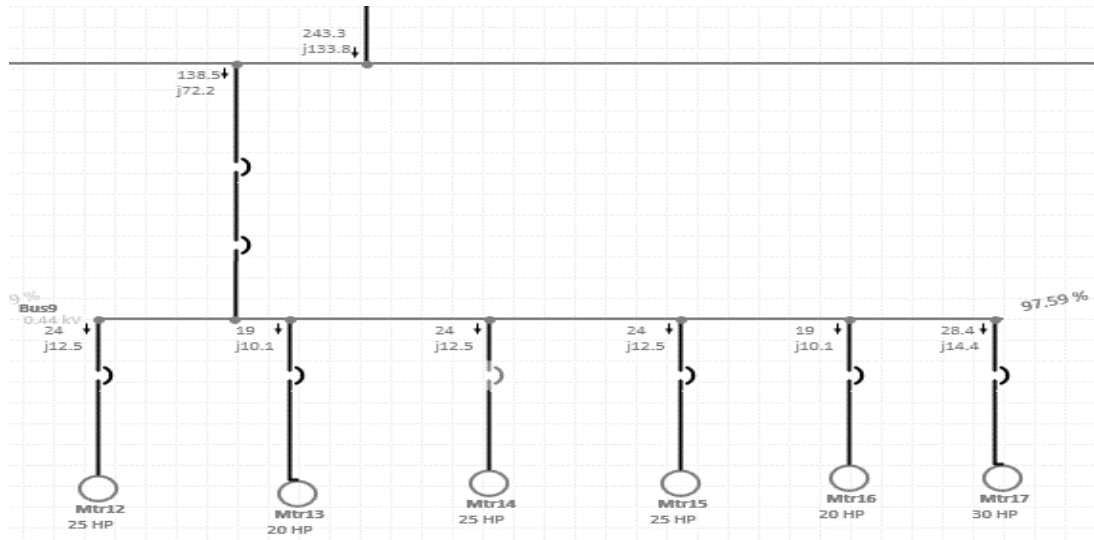


Figura 39. Flujo de carga en bus 9 (kW + jkVAr).
Elaboración propia

Se ha realizado el estudio del flujo de corriente y factor de potencia en el bus 9 analizando los resultados mostrando una corriente máxima de 210 Amp y un factor de potencia de 88.68% considerando este último muy bajo de acuerdo con los valores definidos por normatividad permitido de hasta 90%, se observa el valor de la corriente en el bus 9 en la alimentación de cada carga estando en valores permitidos y factor de potencia bajo en promedio de 88.68% como se observa en la Figura 40.

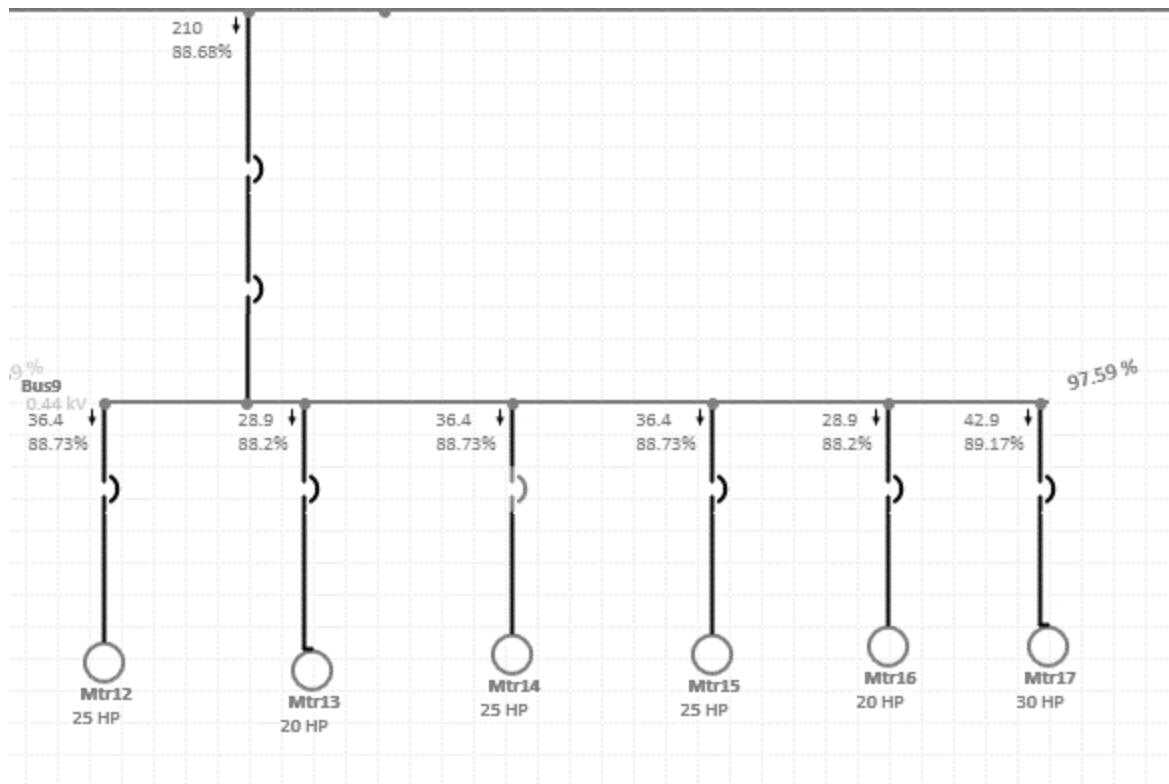
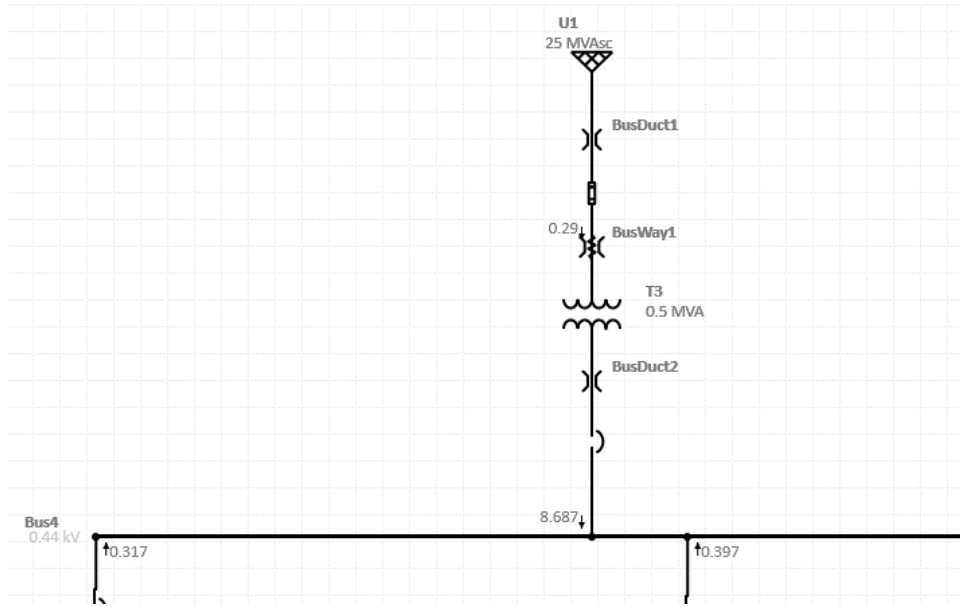


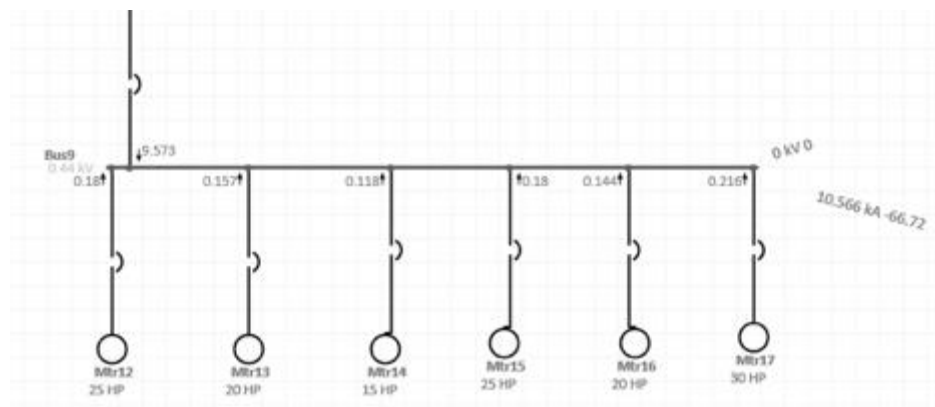
Figura 40. Flujo de carga en bus 9 (Corriente y factor de potencia).
Elaboración propia

3.7.2. Análisis de corto circuito

Se ha realizado el estudio de corto circuito en cada uno de los buses considerando una falla más severa, que es la falla de trifásica (tres fases a tierra) analizando el corto circuito en la acometida principal así como en el bus 9 (Carga conectada más severa) con el fin de determinar la capacidad interruptora de falla tanto en cada uno de los buses como en cada interruptor principal y derivado como se observa el diagrama en la Figura 41 (a y b), encontrando una corriente máxima de 0.29 kA generada en el punto de acometida y una corriente interruptiva en el bus 4 (Bus General) de 8.687 kA, así mismo se observa una corriente interruptiva de 9.573 kA en el bus de máxima carga generada por la acometida y de 10.566 kA generada por los motores de máxima carga (Bus 9).



a



b

Figura 41. Estudio de corto circuito en acometida y bus 9: a. Flujo de carga en bus 4, b. Flujo de carga en bus 9.
Elaboración propia

3.7.3. Coordinación de protecciones

El estudio de coordinación de protecciones proporciona información referente a la capacidad que tienen los dispositivos eléctricos de soportar valores de falla en secuencia conforme se estén presentando el paso de la corriente considerando las condiciones desde la acometida integrando el calibre del conductor principal, transformador, fusible de media tensión así como el interruptor del lado de bajo voltaje para el caso del alimentador principal, se toma en cuenta cada uno de los buses que integran el sistema eléctrico en este caso se tomará la sección de

máxima carga (Bus 9), la cual se debe configurar y analizar primeramente los sistemas y métodos de arranque de cada uno de los motores (M12 al M17) conforme a la curva de corriente de arranque y tiempo de máxima capacidad de arranque.

Se analiza el estudio de la coordinación de protecciones en la acometida principal del sistema se muestra el esquema de protecciones en la sección principal de acometida en la que integran el cable de alimentación principal del lado de alto voltaje, el fusible así como el transformador de 0.5 MVA y el interruptor principal del lado de bajo voltaje encontrando que el fusible opera protegiendo tanto al cable como al transformador del lado de alto voltaje (13 200V), así mismo el interruptor principal del lado de bajo voltaje (0.44 kV) genera una protección de los dispositivos tanto del transformador como del cable y de los dispositivos eléctricos conectados al sistema como se puede observar en la Figura 42.

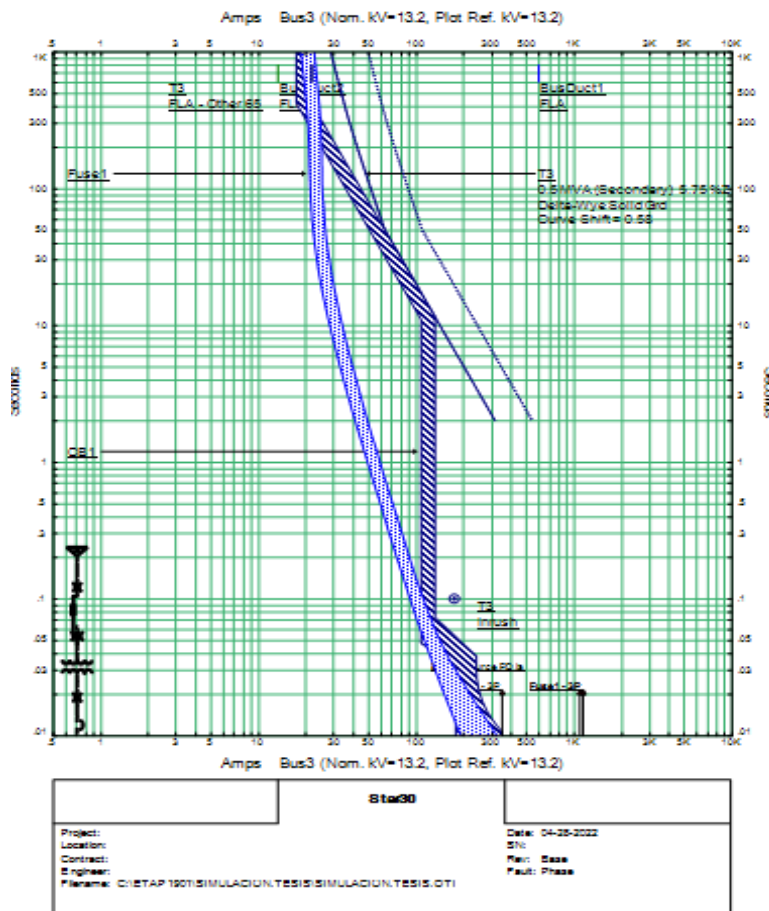


Figura 42. Coordinación de protecciones en el lado de acometida.
Elaboración propia

El estudio de coordinación de protecciones en otra sección en donde se realiza es en la sección de mayor carga (Bus 9) en la que contemplan los motores desde M12 al M17 que va desde los 15 HP hasta los 30 HP que corresponden a máquinas trafiladoras que trabajan de manera constante analizando el sistema de arranque con el fin de conocer la capacidad de corriente de arranque y la repercusión que debe generar en el tiempo de trabajo para la estabilidad en el sistema. Se han desarrollado la simulación integrando las gráficas de arranque de los motores M12 al M17 como se describe en la Figura 43 (Figura a, b, c, d, e, f).

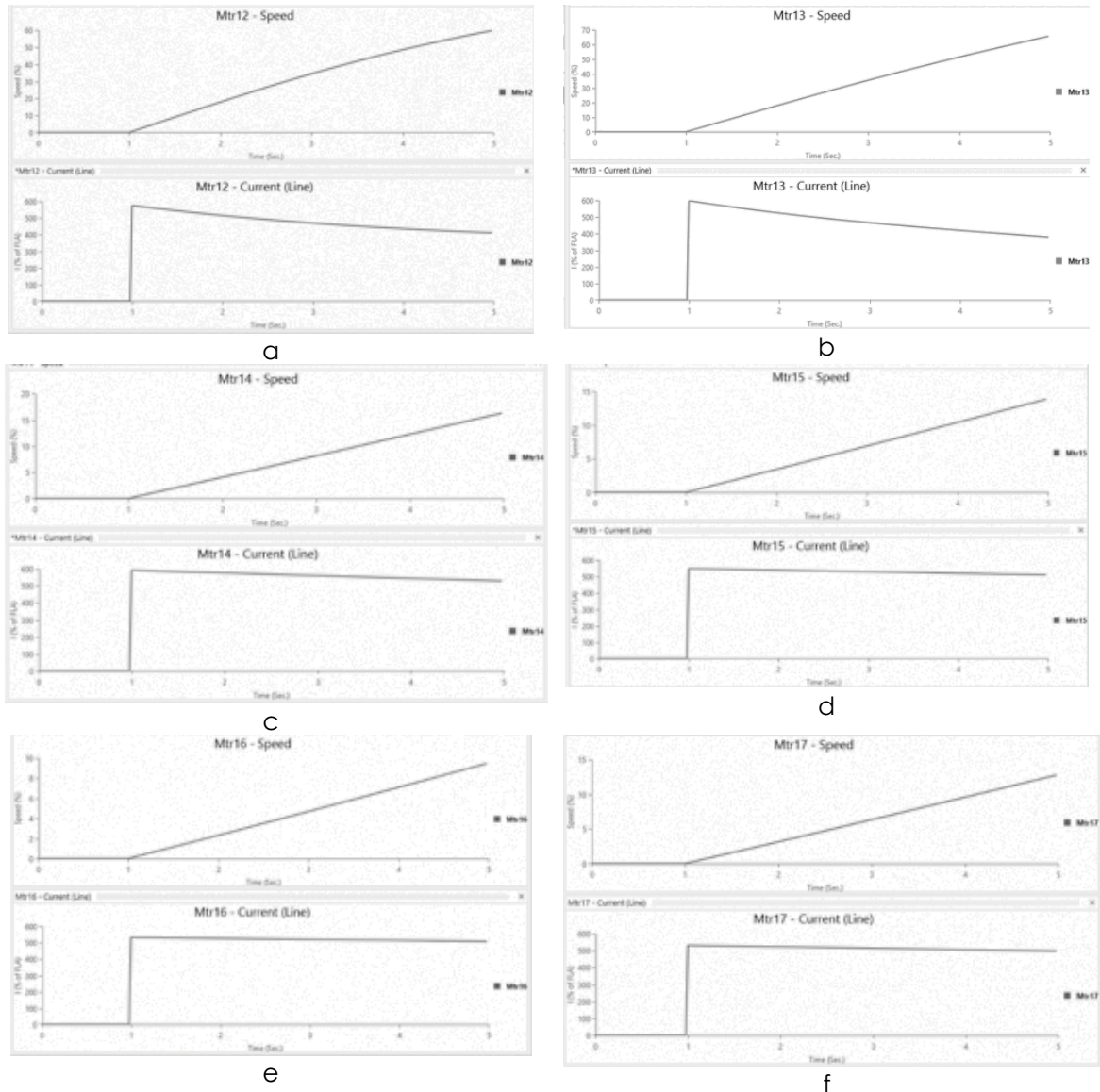


Figura 43. Corriente y tiempo de arranque de motores M12 al M17: a. Gráfica de Velocidad-Corriente Motor M12, b. Gráfica de Velocidad-Corriente Motor M13, c. Gráfica de Velocidad-Corriente Motor M14, d. Gráfica de Velocidad-Corriente Motor M15, e. Gráfica de Velocidad-corriente motor M16. f. Gráfica de velocidad-corriente motor M17. Elaboración propia

Una vez realizado el análisis de las corrientes y tiempo de arranque en los motores se procede a seleccionar la sección y secuencia de protecciones para cada motor de alimentación al bus 9, cabe mencionar que en dicha sección se tiene instalado un interruptor termomagnético en el bus principal (CB 4) de esta sección de 300 Amp con una capacidad interruptiva de 42 kA, el siguiente interruptor corresponde a una corriente de 250 Amp (Sección por el cual se realiza la coordinación de protecciones) y una capacidad interruptiva de 65 kA, acerca de la alimentación de cada motor se ha seleccionado la capacidad de las protecciones como se describe en la Tabla 8:

Tabla 8. Capacidad de corriente en interruptores M12 al M17

Motor	Interruptor	Capacidad de corriente (Amp)	Capacidad Interruptiva (kA)
M12	CB22	50	3.2
M13	CB23	40	18
M14	CB24	30	65
M15	CB25	50	65
M16	CB26	40	14
M17	CB27	50	65

Elaboración propia

En el desarrollo y análisis de la coordinación de protecciones se ha realizado en la secuencia en el funcionamiento para cada uno de los motores de la sección de máxima carga (del M12 al M17) se desarrolla y analizan las gráficas integrando las áreas de protección desde el interruptor principal de protección (CB20) en la sección del bus 9 con respecto a la protección de cada uno de los motores desde CB22 al CB27, como se observa en la Figura 44.

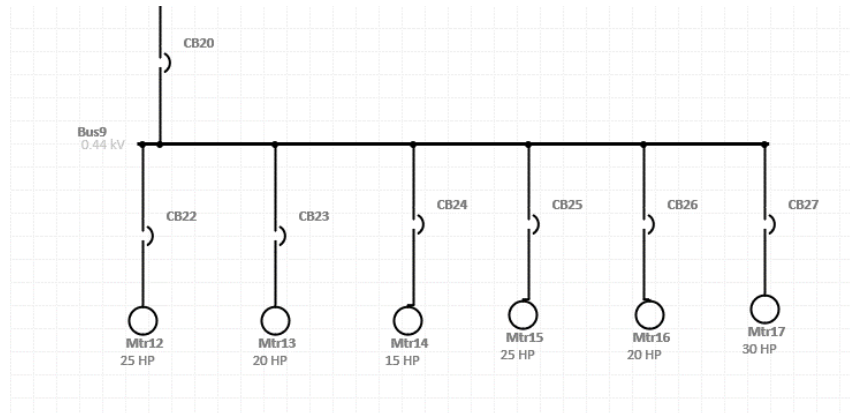
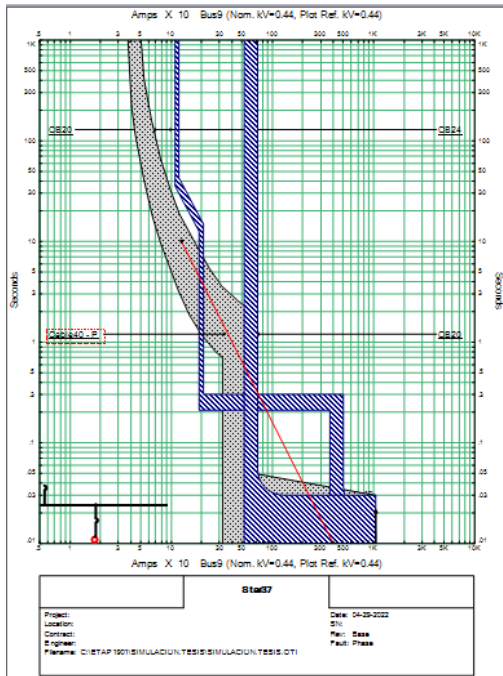
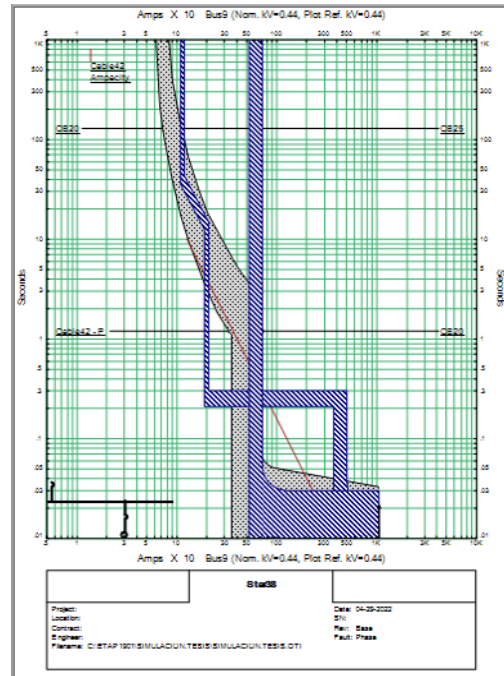


Figura 44. Sección de Interruptores para el análisis de coordinación de protecciones.
Elaboración propia

De acuerdo con las gráficas relacionadas con el sistema de análisis de protecciones y coordinaciones de disparo de los interruptores en el cual se contempla la protección del motor para cada caso así como la secuencia de disparo para cada protección, la protección principal (CB20) cuenta con un sensor de disparo a un tiempo de 300 ms y protección termomagnético de 250 Amp, para cada uno de los interruptores de protección a cada uno de los motores cuenta con una protección termomagnético de diseño para cada caso, de tal manera que se presenta una secuencia de protección acorde a las especificaciones de corriente nominal presentando el disparo de cada interruptor con una secuencia de protección óptima observando en las figuras 45, 46 y 47 (a y b respectivamente).

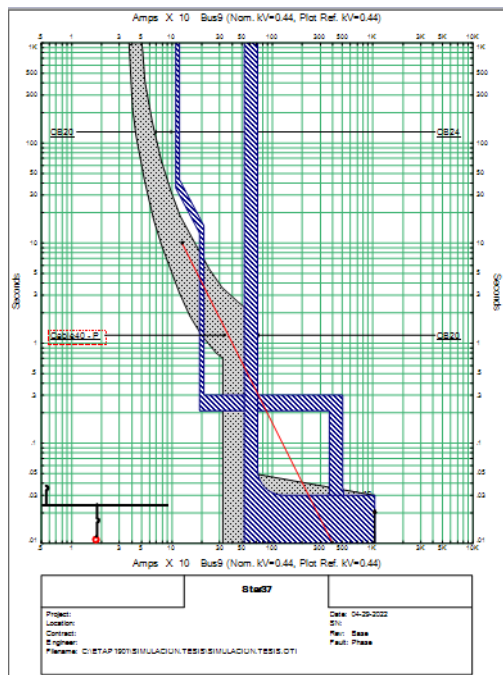


a

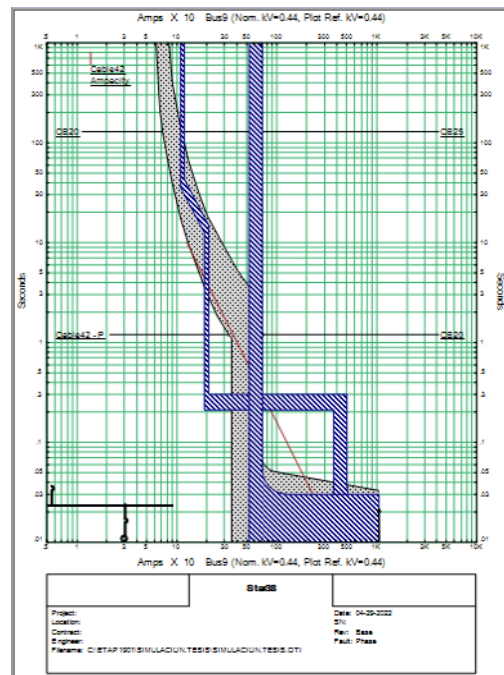


b

Figura 45 Coordinación de protecciones en motores M12(a) y M13 (b).
Elaboración propia



a



b

Figura 46. Coordinación de protecciones en motores M14(a) y M15(b).
Elaboración propia

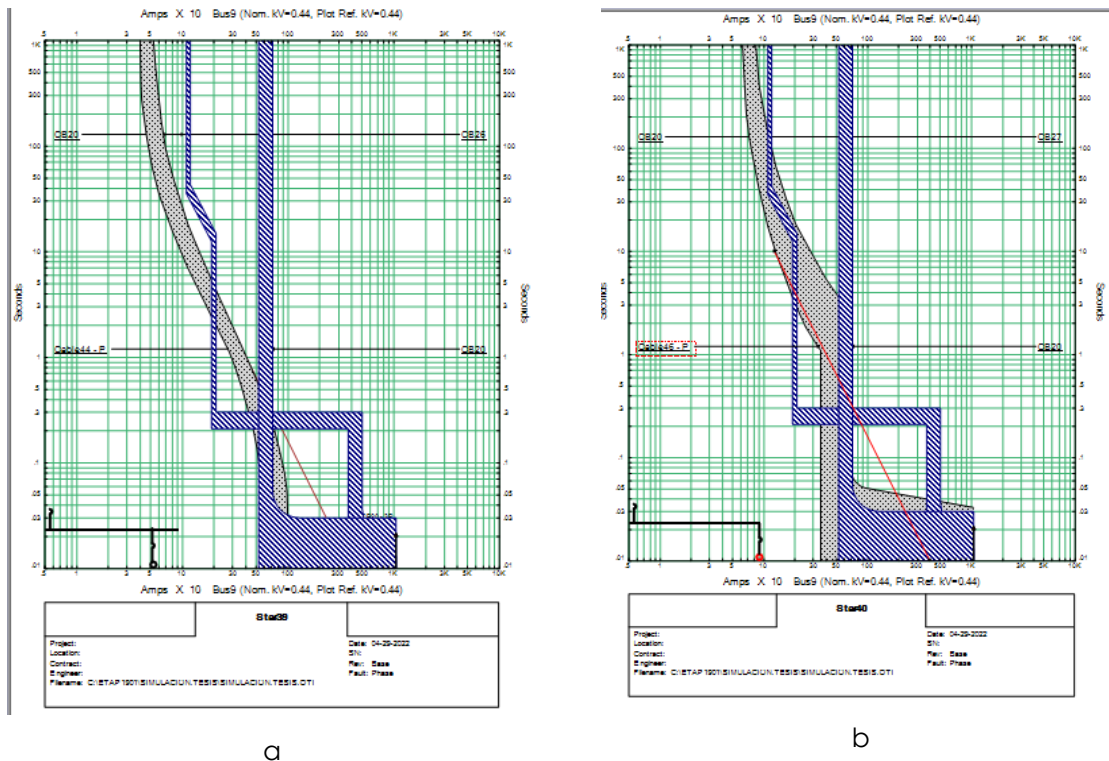


Figura 47. Coordinación de protecciones en motores M16 (a) y M17(b).
Elaboración propia

Una vez desarrollado el análisis de la coordinación de protecciones se puede identificar los niveles de protección en la sección de mayor consumo de energía ya que al estar trabajando constantemente los equipos y además de generar niveles de corrientes de arranque y paro en el sistema, se puede obtener protección en los equipos con el fin de limitar y reducir los efectos de falla en el sistema trabajando un trabajo óptimo y confiable.

3.8. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL SISTEMA ELÉCTRICO

Se desea encontrar el rendimiento óptimo en un sistema eléctrico de potencia para mejorar la calidad de la energía en la cual se analizan las variaciones de tensión y corrientes debidas a los cambios en las Potencias (real, aparente y reactiva) para esto se desarrolla mediante el análisis del diseño de experimentos factoriales.

Entre las variables que afectan a la corriente, voltaje y factor de potencia, sin duda las más importantes son la característica de las variaciones de las potencias (real, aparente y reactiva), dentro de las variaciones que se presentan son el arranque

de motores eléctricos, máquinas de soldar, equipos con variadores de frecuencia etc., por lo que los factores que afectan la calidad de la energía son las variaciones en los diferentes tipos de cargas.

Entre los factores que influyen sobre la calidad de la energía, son las potencias (real, aparente y reactiva) por lo que se desea analizar los efectos que producen y cuáles son las principales interacciones que se generan de las cuales hay mayor afectación en dichas variaciones.

Se hizo un estudio para observar el efecto de algunos de los factores controlables que afectan la calidad de la energía. Para efectos de este estudio, se consideraron solo tres variables: Potencia Real, Potencia Aparente y Potencia Reactiva.

OBJETIVO DEL EXPERIMENTO: Determinar en qué medida afectan las tres variables mencionadas, la calidad de la energía, y cómo interaccionan entre ellas.

Formula del análisis estadístico:

Desarrollo del modelo estadístico

$$Y_{ijk} = \mu + \beta_i + \tau_j + \delta_k + (\tau\delta)_{jk} + (\beta\delta)_{ik} + (\beta\tau)_{ij} + (\beta\tau\delta)_{ijk} + e_{ijk}$$

Donde:

β_i – *Potencia Real*

τ_j – *Potencia Aparente*

δ_k – *Potencia Reactiva*

Análisis de datos calculados para Rangos de Potencias mostrado en la Tabla 9 a un f.p. de 0.9 y 0.95.

Potencia real: 175 y 216 kW

Potencia reactiva 383 y 410 kVAR

Potencia Aparente: 421 y 447 kVA

Tabla 9. Datos calculados para f.p. de acuerdo con el análisis calculado

Potencia reactiva					
Potencia real	410		383		
	Potencia Aparente		Potencia Aparente		
	447	421	447	421	
175	-2	0	-5	5	
	1	-1	2	-3	
190	6	-2	-1	-2	
	-3	-3	0	1	
216	-7	-7	0	0	
	4	5	-3	-4	

Elaboración propia

De acuerdo con los datos establecidos de la tabla se ha realizado el análisis de varianza (Ver Tablas 10,11 y 12) con el software estadístico Minitab (Minitab, 2020):

Tabla 10. Modelo lineal general de potencias

Modelo Lineal General					
Corriente versus Potencia Real, Potencia Reactiva, Potencia Aparente					
Factor	Type	Levels	Values	Values	Values
Potencia Real	random	3	175	190	216
Potencia Reactiva	random	2	383	410	
Potencia Aparente	random	2	421	447	

Elaboración propia

Tabla 11. Análisis de Varianza (ANOVA)

Analysis of Variance for Current, using Adjusted SS for Tests						
Source	DF	Seg SS	Adj SS	Adj MS	F	P
P. real	2	4.00	4.00	2.00	0.16	0.853
P. Reactiva	1	4.17	4.17	4.17	0.33	0.571
P. Aparente	1	6.00	6.00	6.00	0.48	0.497
Error	19	237.83	237.83	12.52		
Total	23	252.00				

S= 3.53801 R-Sq = 5.62% R-Sq (adj) = 0.00%

Elaboración propia

Tabla 12. Observaciones inusuales de corriente

Unusual Observations for Corriente					
Obs	Corriente	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
17	-7.00000	-0.58333	1.61488	-6.41667	-2.04 R
20	5.00000	-1.58333	1.61488	6.58333	2.09 R

R Denotes an observation with a large standardized residual

Elaboración propia

De acuerdo con el resultado del análisis estadístico los valores de corriente se encuentran fuera de rango lo que indica que se presentan fluctuaciones de corriente cuando trabajan los equipos de potencia real, se generan menos fluctuaciones al trabajar los equipos con potencia aparente y potencia reactiva.

Se ha realizado respecto a los datos establecidos el histograma de comportamiento de las potencias con respecto al nivel de corriente promedio como se describe en las figuras 48, 49 y 50 siguientes:

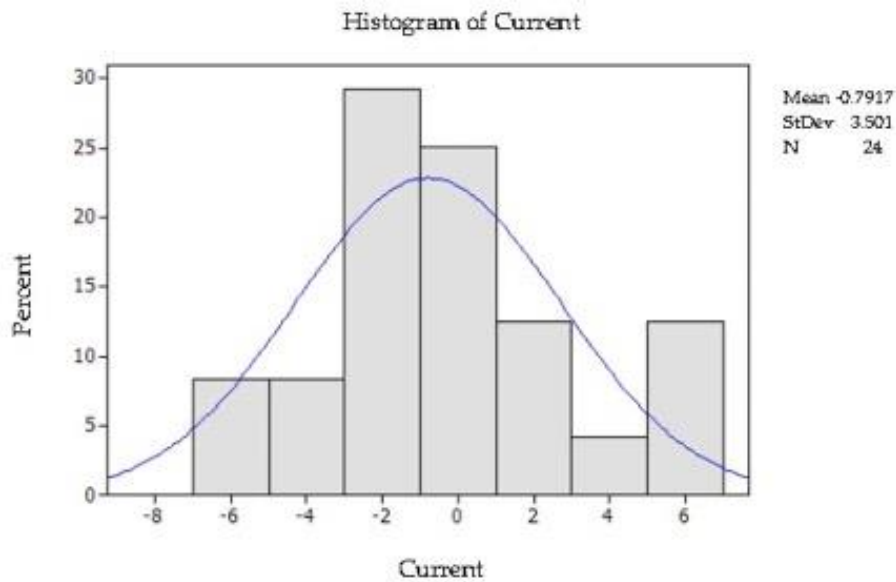


Figura 48. Histograma de Comportamiento de corriente.

Elaboración propia

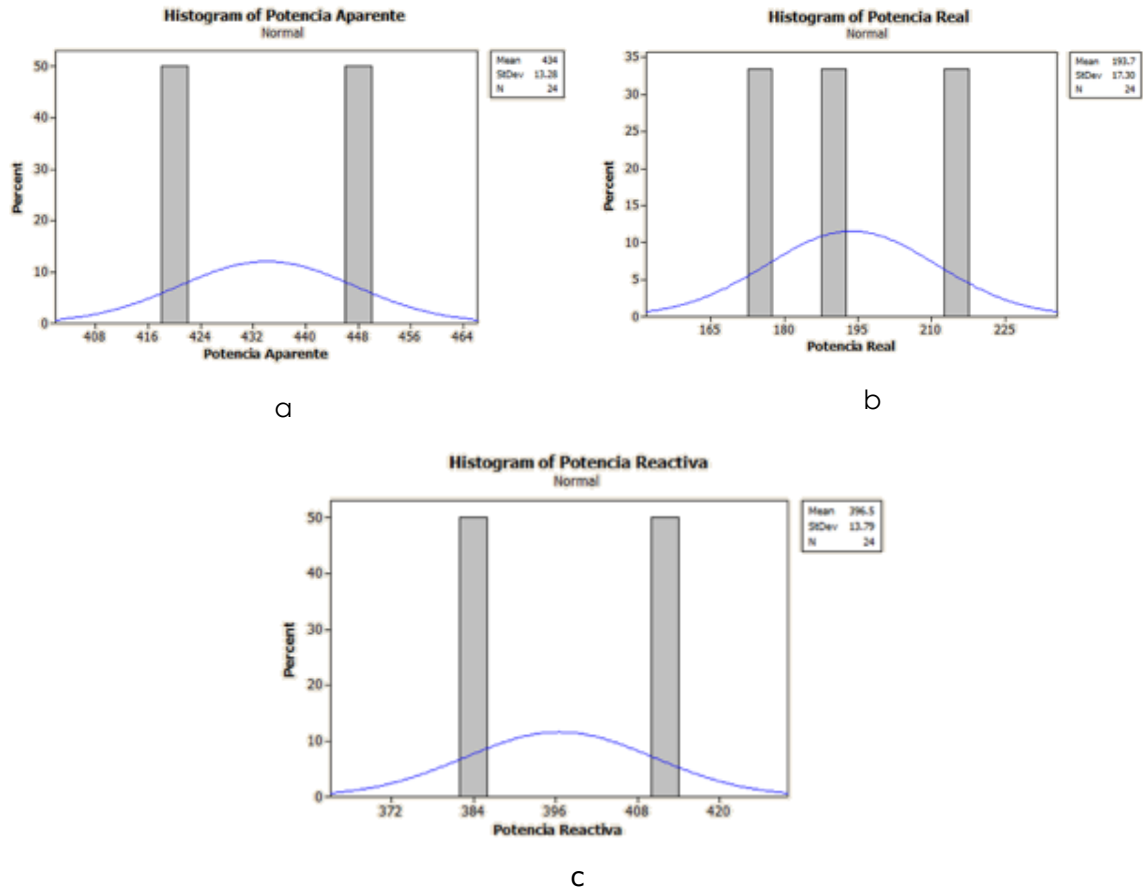


Figura 49. Histogramas de comportamiento de Potencias Aparente (a), Real (b) Reactiva (c).
Elaboración propia

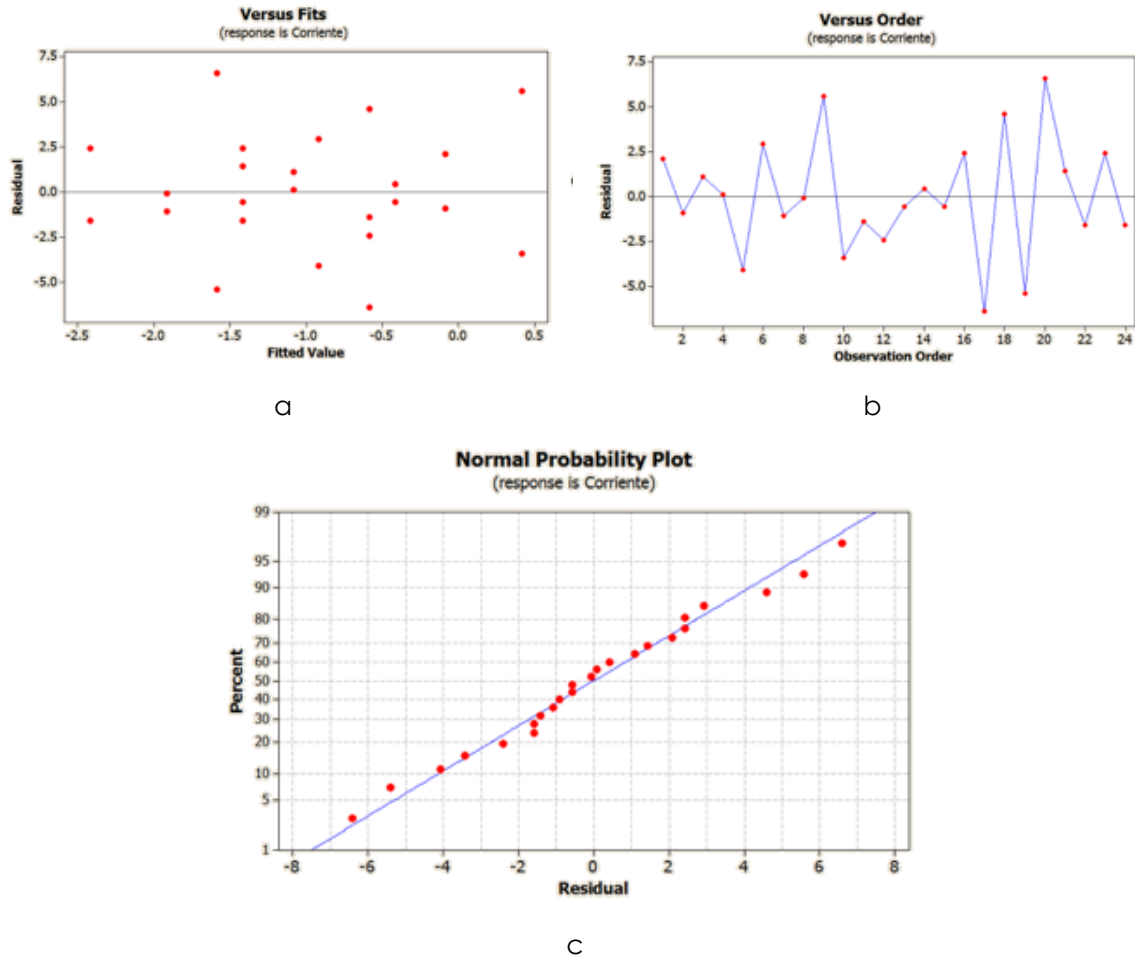


Figura 50. Comportamiento de las variaciones de corriente. Gráfica de ajuste (a), Gráfica de Orden (b), Prueba de Normalidad (c).

Elaboración propia

Análisis de datos medidos para rangos de potencias en promedio medidos de f.p. de 0.85 como se describe en las Tablas 13, 14 y 15.

Potencia real: 14.87 y 64.64 kW

Potencia reactiva 43.226 y 5.24 kVAr

Potencia Aparente: 77.654 y 16.770 kVA

Tabla 13. Datos calculados para f.p. de acuerdo con el análisis de medición

Potencia real (kW)	Potencia reactiva (kVAr)			
	43.226		5.24	
	Potencia Aparente (kVA)		Potencia Aparente (kVA)	
	77.654	16.77	77.654	16.77
14.87	-54.75	-55.75	10.25	-27.12
	15.25	-36.75	0.25	-12.40
42.25	-3.75	-22.75	22.25	20.14
	-42.75	-11.75	-15.72	7.02
69.64	25.25	-39.75	-27.12	9.43
	-8.75	-56.75	31.40	-5.32

Elaboración propia

Tabla 14. Análisis de Varianza (ANOVA)

ANOVA: Corriente.1 versus Potencia Real, Potencia Reactiva, Potencia Aparente			
Factor	Type	Levels	Values
Potencia Real.1	Fixed	3	14.87, 42.25, 69.64
Potencia Reactiva.1	Fixed	2	5.240, 43.226
Potencia Aparente.1	fixed	2	16.770, 77.654

Elaboración propia

Tabla 15. Análisis de varianza de corriente (ANOVA)

Analysis of Variance for Corriente.1					
Source	DF	SS	MS	F	P
Potencia Real.1	2	896.4	448.2	0.83	0.451
Potencia Reactiva.1	1	3903.0	3903.0	7.23	0.015
Potencia Aparente.1	1	1403.9	1403.9	2.60	0.123
Error	19	10262.2	540.1		
Total	23	16465.6			

S= 23.2404 R-Sq=37.67% R-Sq (adj) = 24.55%

Elaboración propia

De acuerdo con el resultado del análisis estadístico los valores de corriente se encuentran fuera de rango lo que indica que se presentan fluctuaciones de

corriente cuando trabajan los equipos de potencia real, se generan menos fluctuaciones al trabajar los equipos con potencia aparente y potencia reactiva.

Se ha realizado respecto a los datos establecidos el Histograma de comportamiento de las potencias con respecto al nivel de corriente promedio como se describe en las figuras 51 y 52 siguientes:

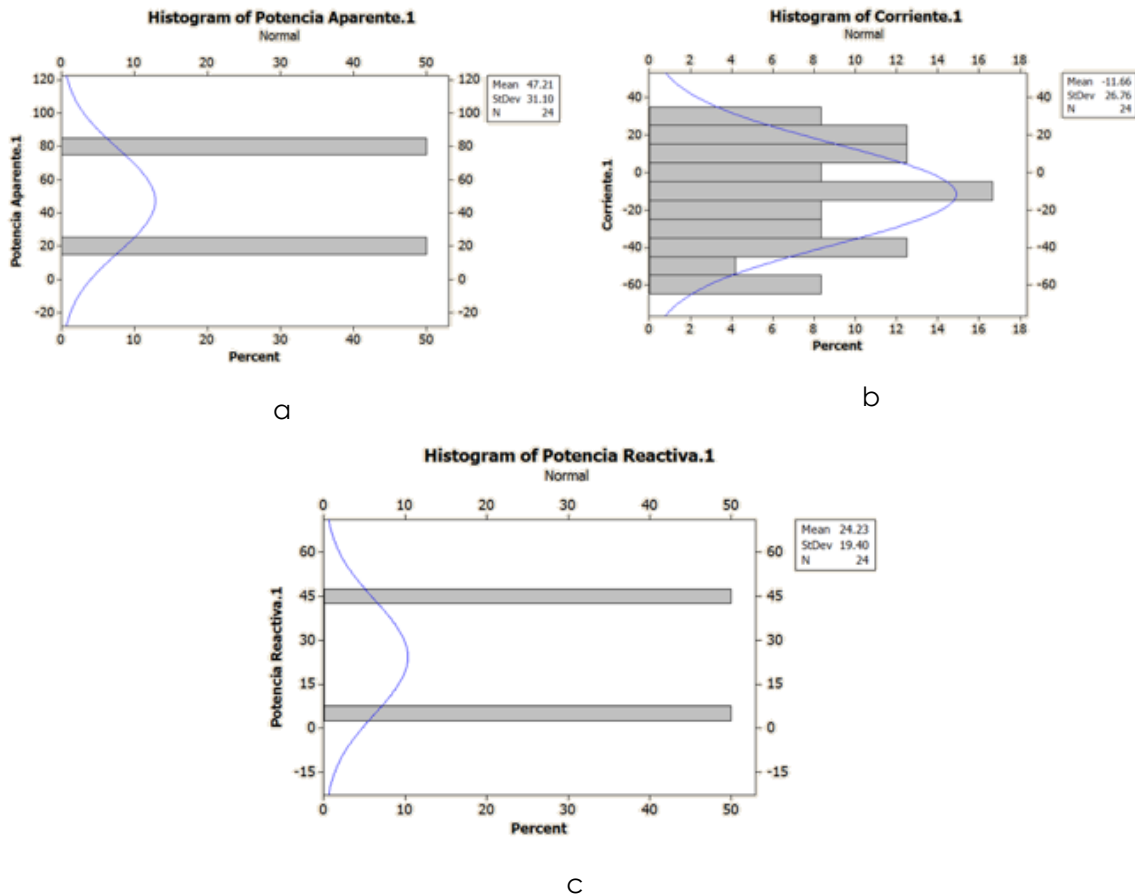


Figura 51. Histogramas de comportamiento de corriente. Histograma de Potencia Aparente (a), Histograma de Corriente (b), Histograma de Potencia Reactiva (c).
Elaboración propia

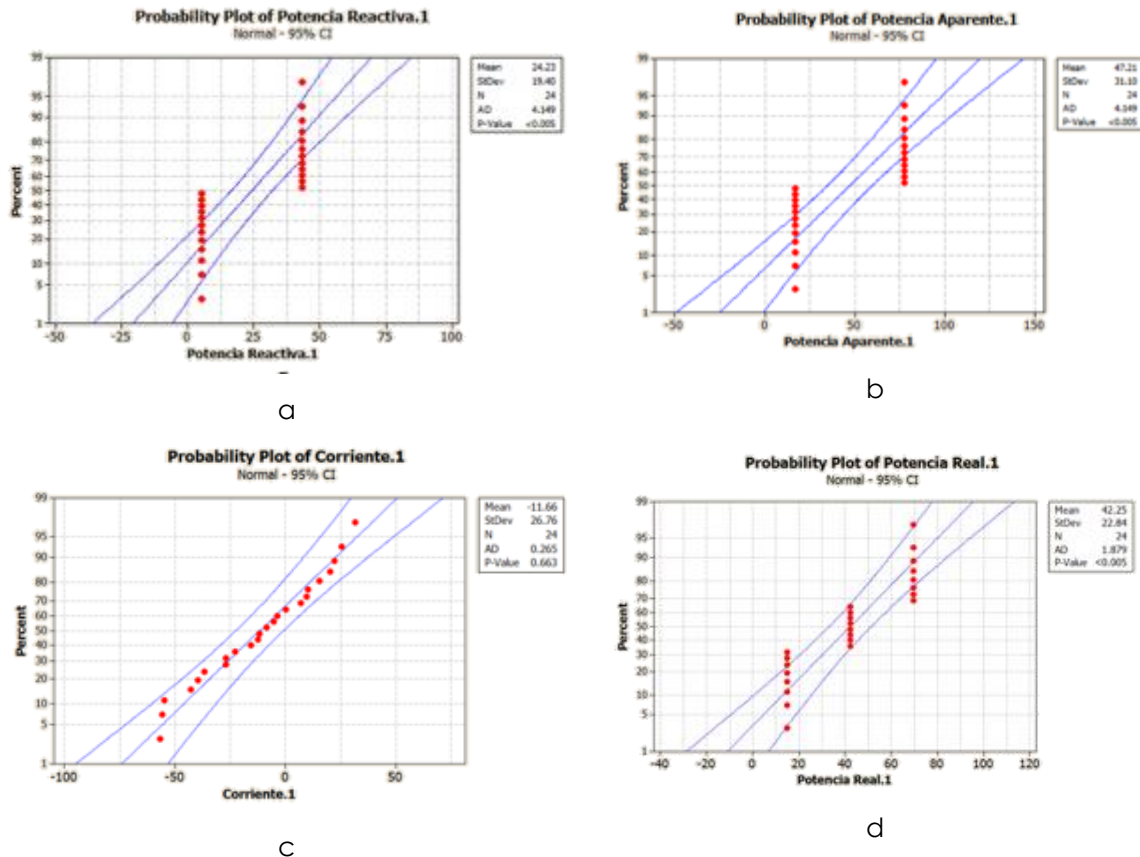


Figura 52. Análisis de probabilidades de corriente y potencia. Potencia reactiva (a), potencia aparente (b), Corriente (c), potencia real (d).
Elaboración propia

3.9. SISTEMA DE CONTROL DEL CONSUMO Y MONITOREO DE ENERGÍA ELÉCTRICA

La automatización industrial consiste en gobernar la actividad y la evolución de los procesos sin la intervención continua de un operador humano, han estado desarrollando sistemas de control en la industria con el fin de generar y mantener un control en la operación de los sistemas eléctricos por medio del cual se pueden supervisar y controlar las distintas variables que se presenten en un proceso o planta industrial. Para ello se deben utilizar diversos periféricos, software de operación, controladores lógicos programables (PLC) y unidades remotas con sistemas de control eléctrico con contactores y relevadores convencional, sistemas de comunicación que permite al operador tener acceso completo al proceso mediante su control y monitoreo permitiendo minimizar las tareas de

mantenimiento alcanzando un mayor rendimiento aumentando la productividad y ofrecer una mayor seguridad.

El control del consumo de energía eléctrica y las variables que se generan debido al trabajo continuo de los equipos así como las variaciones en el consumo de las potencias activa, reactiva y aparente que continuamente están variando de acuerdo con la demanda en el funcionamiento de los equipos y al comportamiento mediante el monitoreo y medición afectan directamente en las fluctuaciones de tensión y corriente así como en las diferentes cargas conectadas por lo que se deben de implementar un sistema de control con el fin de atenuar dichas variaciones de acuerdo con las necesidades en los cambios de las cargas conectadas permite mejorar el sistema de distribución en la demanda de energía eléctrica.

Referido a la propuesta de desarrollar un sistema por medio de un control automático con contactores y relevadores se fundamenta con respecto al estudio estadístico antes desarrollado con el objetivo de ofrecer un control inteligente económico controlando los parámetros eléctricos de tensión y corriente así como de acuerdo con los cambios que se generen en el consumo de las diferentes cargas conectadas se desarrolla un algoritmo de control para energizar los elementos necesarios para controlar las variaciones y afectaciones que se pueden ocasionar debido a la fluctuación en el trabajo de los mismos regulando el factor de potencia, las variaciones de tensión y corriente mediante un supresor de tensión así mismo se pretende integrar al control el dimensionado de un sistema fotovoltaico el cual debe contribuir en la regulación de los elementos con más carga en el consumo de energía eléctrica, cabe mencionar que al revisar la literatura en estudios previos no se tiene una propuesta de un componente novedoso ya que esta es una propuesta diferente como se observa en las Figuras 53 y 54.

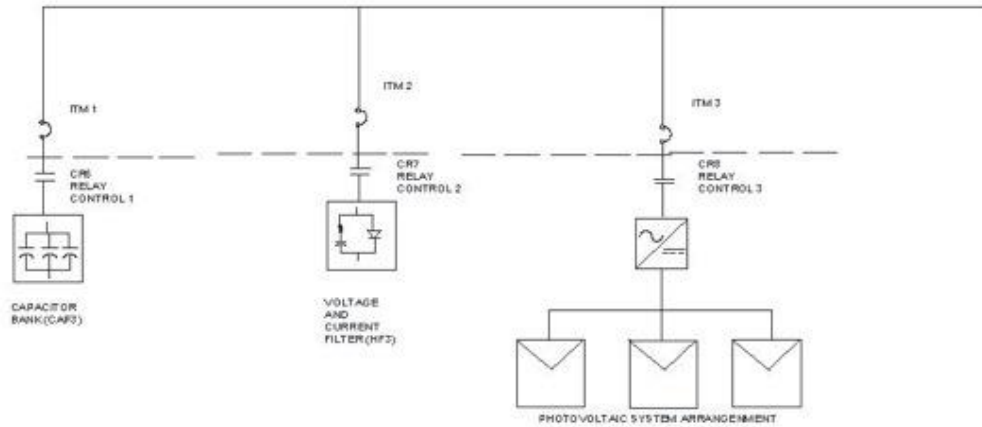


Figura 53. Propuesta del diagrama unifilar de conexión de los sistemas de regulación de control.
Elaboración propia

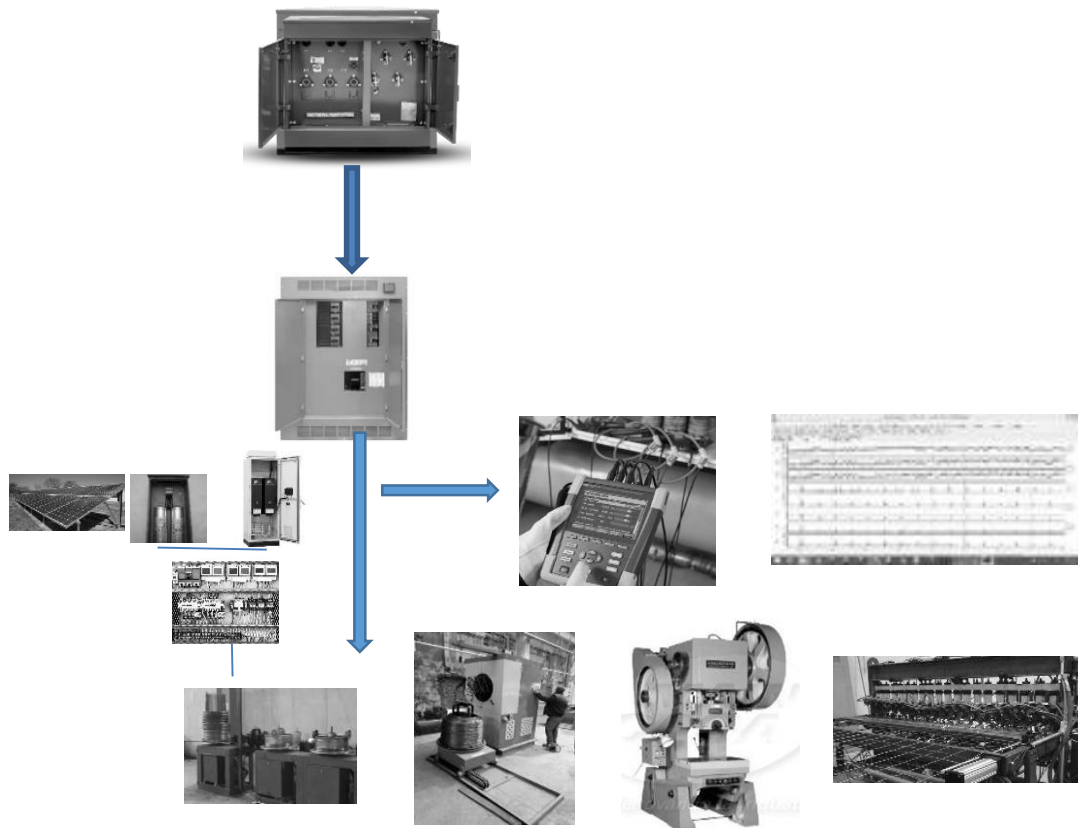


Figura 54. Representación gráfica de la propuesta de conexión del sistema de control.
Elaboración propia

3.10. SELECCIÓN DE LOS SISTEMAS DE REGULACIÓN

3.10.1. Cálculo para la selección del banco de capacitores

Para determinar la capacidad del banco de capacitores se ha tomado en cuenta el promedio del factor de potencia de acuerdo con el recibo de luz (CFE) de la empresa Mallas y Armex de Aguascalientes S.A. de C.V., estando bajo del valor nominal características y límites de las perturbaciones de los parámetros de la energía eléctrica (CFE L0000-70) permitido de 85.83%, así mismo se ha determinado la capacidad máxima de la Potencia Real del sistema eléctrico, siendo de 189.442 kW.

Datos:

Factor de potencia actual	$\text{Cos } \theta_1 = 0.8583$
Factor de potencia deseado	$\text{Cos } \theta_2 = 0.9$
Potencia Real	189.442 kW
Potencia aparente	500 kVA
Potencia reactiva (Qc)	kVAr

$$\text{Cos } \theta_1 = 0.8583 ; \theta_1 = \text{Cos}^{-1} 0.8583 = 30.87^\circ \quad (38)$$

$$\text{Cos } \theta_2 = 0.9 ; \theta_2 = \text{Cos}^{-1} 0.9 = 25.84^\circ \quad (39)$$

$$\tan(30.87^\circ) = 0.5977 \quad (40)$$

$$\tan(25.84^\circ) = 0.4842 \quad (41)$$

$$Q_c = P (\tan \theta_1 - \tan \theta_2) \quad (42)$$

$$Q_c = 189.442 (0.5977 - 0.4842) = 21.5 \text{ kVAr} \quad (43)$$

Por lo tanto, se ha seleccionado de acuerdo con la tabla un banco de capacitores trifásico a 440V de 25 kVAr como se muestra en la Figura 55.



Figura 55. Selección del banco de capacitores. (Siemens, 2021)

De acuerdo con la normatividad y en relación con el promedio del factor de potencia se hace acreedor a una penalización como se describe en el cálculo anexo.

$$\text{Penalización} = \frac{3}{5} \left(\left(\frac{90}{\text{FP}} \right) - 1 \right) \times 100 \quad (44)$$

$$\text{Penalización} = \frac{3}{5} \left(\left(\frac{90}{85} \right) - 1 \right) \times 100 = 3.5\% \quad (45)$$

Por lo tanto, se genera una penalización del 3.5% sobre el cargo por dicho concepto.

3.10.2. Selección del filtro de tensión y corriente

La energía Eléctrica comúnmente se genera en las grandes centrales utilizando máquinas rotatorias síncronas cuyo campo es excitado con un voltaje de CD e impulsado mecánicamente por una turbina, produciendo una tensión senoidal trifásica en las terminales de la armadura. Dicha forma de onda es característica del diseño de la máquina y la disposición de sus devanados.

Cuando un voltaje senoidal es aplicado a un circuito lineal las corrientes que fluyen en el sistema y caídas de voltaje son también senoidales.

Durante los últimos años ha crecido la preocupación debido al hecho de que la forma de onda de corrientes y voltajes en alimentadores y buses se ha corrompido

por la aparición de corrientes armónicas en los sistemas eléctricos de potencia, debido principalmente a la inducción masiva de la electrónica de potencia en las redes industriales, así como a la operación cada vez más extendida de grandes hornos de arco usados para fundición de acero (Trejo, 2013).

Ante esta situación es indispensable aplicar medidas que conlleva a mantener los sistemas eléctricos con una calidad de la energía adecuada y aprovechar las ventajas de la tecnología de los equipos electrónicos que ayudan a incrementar la productividad confort y ahorro de energía.

Límites de distorsión de voltaje. El suministrador es responsable de mantener la calidad del voltaje en el sistema general, especificándose los límites para diferentes niveles de tensión.

Es importante notar que la distorsión de voltaje total THDv que se utiliza es diferente a la convencional ya que se expresa la distorsión en función del voltaje nominal que es un valor constante para cada usuario, estableciéndose así una base fija a lo largo del tiempo (Soberanis Garfias, 2008).

Límites de Distorsión de Corriente. Las corrientes armónicas para cada usuario son evaluadas en la acometida y los límites se establecen en base a la relación entre la corriente de cortocircuito y la demanda máxima de corriente de carga del usuario (Erazo Ávila & Guamán Segarra, 2022).

Método de cálculo para filtro de tensión y corriente a desarrollar:

Donde:

Xeff reactancia efectiva

Zbase impedancia base

$$VLL = kV \text{ base} * Va.u = 13.2 \text{ kV} * 1 \text{ p.u.} = 13.2 \text{ kV} \quad (46)$$

$$X_{eff} = \frac{VLL_{sist}^2}{Q_{eff}} = 6.96 \Omega \quad (47)$$

$$X_c = \frac{h^2}{h^2 - 1} * X_{eff} = 79.056 \Omega \quad (48)$$

$$MVA \text{ base} = 250$$

$$kV \text{ base} = 13.2 \text{ kV}$$

$$Z_{base} = \frac{kV \text{ base}^2}{MVA \text{ base}} = 0.697 \Omega \quad (49)$$

$$C = \frac{1}{2\pi f X_c} = 0.335 \mu f \quad (50)$$

$$X_L = \frac{X_c}{h^2} = 0.739 \Omega \quad (51)$$

$$L = \frac{X_L}{2 * \pi * f} = 1.96 \text{ mH} \quad (52)$$

$$R = \frac{X_L * (fres)}{Qf} = 1.013 \Omega \quad (53)$$

$$X_c = X_L$$

$$X_c(h = 10.34) = \frac{X_c}{h} = 7.64 \Omega \quad (54)$$

$$X_L(h = 10.34) = X_L * h = 7.64 \Omega \quad (55)$$

$$I_{fund} = \frac{V_{LLsis}}{\frac{\sqrt{3}}{X_c - X_L}} = 97 \text{ amp.} \quad (56)$$

$$I_5 = 25\% * I_{fun} = 24.25$$

$$I_7 = 15\% * I_{fun} = 14.55$$

$$I_{11} = 10\% * I_{fun} = 9.7$$

$$I_{13} = 5\% * I_{fun} = 4.85$$

$$\begin{aligned} I_{total} &= \sqrt{97^2 + 24.25^2 + 14.55^2 + 9.7^2 + 4.85^2} \\ &= 101.62 \text{ amp} \end{aligned} \quad (57)$$

$$\% \text{ Margen de Corriente} = \frac{I_{total}}{I_{fun}} * 100 = 104.76\% \quad (58)$$

$$\begin{aligned}
 I_{totalrms} &= 104.76\%I_{fun} \\
 &\leq 135\%I_{fun} \text{ establecida en la Norma IEEE - 18} \\
 &\quad - 2002 \text{ se encuentra dentro de norma}
 \end{aligned}
 \tag{59}$$

$$V_c(1) = I_f * X_c = 7.668 \text{ kV} \tag{60}$$

$$V_c(h) = \sum_h^n I(h) * \frac{X_c}{h} \tag{60}$$

$$V_c(5) = (24.25 * \frac{79.056}{5}) = 0.3843 \text{ kV}$$

$$V_c(7) = (14.55 * \frac{79.056}{7}) = 0.164 \text{ kV}$$

$$V_c(11) = (9.7 * \frac{79.056}{11}) = 0.069 \text{ kV}$$

$$V_c(13) = (4.85 * \frac{79.056}{13}) = 0.0295 \text{ kV}$$

$$\begin{aligned}
 V_{cl} - n_{total} \text{ pico} &= \sqrt{2} * (V_c(1) + V_c(h)) \\
 &= \sqrt{2} * (7.668 + 0.6455) \\
 &= 11.75 \text{ kV}
 \end{aligned}
 \tag{61}$$

$$V_l - n_{sis} = \frac{V_{LLsis}}{\sqrt{3}} = 7.62 \text{ kV} \tag{62}$$

$$V_L - N_{pico} \text{ sis} = \sqrt{2} * V_L - N_{sis} = 10.77 \text{ kV} \tag{63}$$

$$\begin{aligned}
 \% \text{Margen de Tensi3n} &= \frac{V_{cl} - N_{total} \text{ pico}}{V_L - N_{pico} \text{ sis}} * 100 \\
 &= 109.1\%
 \end{aligned}
 \tag{64}$$

$$\begin{aligned}
 V_{totalrms} &= 109.1\%V_{fun} \\
 &\leq 110\%V_{fun} \text{ establecida en la Norma IEEE - 18} \\
 &\quad - 2002 \text{ se encuentra dentro de norma}
 \end{aligned}$$

3.10.3. Diseño del sistema fotovoltaico

El diseño de un sistema Fotovoltaico se realiza con el fin de contribuir en la mejora del consumo de energía eléctrica se contempla únicamente un 53% del total de consumo, considerándose para el desempeño y funcionamiento de los equipos de mayor potencia. En el consumo general se estima un promedio de 26 284 kWh por lo que al hacer la estimación del 53% se toma en cuenta únicamente 13 930 kWh, para el diseño del sistema fotovoltaico se realiza el cálculo únicamente el consumo diario ya que en la tarifa que se encuentra el sistema eléctrico es de manera mensual, haciendo la estimación de consumo se obtiene un total de 464.350 kWh, se ha tomado los datos de irradiancia promedio anual de 5.68 kWh/m² a un factor k de 0.95 por lo que se toma en cuenta las horas de sol pico de 5.4 hrs.

Por lo que se ha seleccionado un panel como se observa en la Figura 56 de las siguientes características:

MODELO	PS-400M1-24/TH
Potencia máxima a STC(Pmax)	400W
Corriente de cortocircuito (Isc)	10.36A
Circuito de Voltaje Abierto (Voc)	49.80V
Corriente de Potencia Máxima (Imp)	9.60A
Tensión Máxima de Potencia (Vmpp)	41.67V
Eficiencia del Módulo	19.88%

Figura 56. Datos del panel fotovoltaico seleccionado.
(CONERMEX, 2022)

$$N^{\circ} \text{ de Módulos} = \frac{Ec}{Voc * Isc * H.S.P.} = 167 \text{ paneles} \quad (65)$$

Selección del Inversor con las siguientes características (Ver Figura 57):

DATOS TÉCNICOS PRESERIE FRONIUS TAURO

DATOS DE ENTRADA	FRONIUS TAURO 50-3-D FRONIUS TAURO 50-3-P	FRONIUS TAURO ECO 50-3-D FRONIUS TAURO ECO 50-3-P	FRONIUS TAURO ECO 100-3-D FRONIUS TAURO ECO 100-3-P
Número de seguimiento MPP	3	1	1
Máx. corriente de entrada (I _{dc máx})	36 / 36 / 72 A	87,5 A	175 A
Rango de tensión de entrada (U _{dc mín} - U _{dc máx})	200 - 1.000 V		580 - 1.000 V
Tensión de puesta en servicio (U _{dc arranque})	400 V		450 V
Rango de tensión MPP	400-930 V		580-930 V
Número de entrada CC	D: 3/4/7 ^{II} , P: 3 ^{II}	D: 14/0/0 ^{II} , P: 2 ^{II}	D: 22/0/0 ^{II} , P: 3 ^{II}
Máx. salida del generador FV (P _{dc máx})		75kWp	150kWp

DATOS DE SALIDA	FRONIUS TAURO 50-3-D FRONIUS TAURO 50-3-P	FRONIUS TAURO ECO 50-3-D FRONIUS TAURO ECO 50-3-P	FRONIUS TAURO ECO 100-3-D FRONIUS TAURO ECO 100-3-P
Potencia nominal CA (P _{ac máx})	50.000 W	50.000 W	100.000 W
Máx. corriente de salida (I _{ac máx})		75 A	150 A
Acoplamiento a la red (rango de tensión)		3- NPE 380/220V a 3- NPE 400/230V	
Frecuencia (rango de frecuencia)		50 Hz / 60 Hz (45 - 65 Hz)	
Coefficiente de distorsión no lineal		< 3 %	
Factor de potencia (cos φ _{ac})		0 - 1 ind. / cap.	

Figura 57. Datos del inversor seleccionado.
(Fronius, 2022)

$$N^{\circ} \text{ Filas en serie} = \frac{V_{inv}}{V_m} = 13 \text{ paneles} \tag{66}$$

$$\tag{67}$$

$$N^{\circ} \text{ de ramas en paralelo} = \frac{I_{inv}}{I_m} = 16.89 \text{ ramas}$$

$$\tag{68}$$

$$Potencia \text{ del Inversor} = 167 \text{ paneles} * 515 \text{ watts} = 86\ 005 \text{ watts}$$

Diagrama Unifilar del Sistema Fotovoltaico. De acuerdo con el cálculo del sistema fotovoltaico se han determinado un total de 167 paneles de los cuales se compone el arreglo de 13 paneles en serie y 17 cadenas en paralelo tomando en cuenta un total de 221 paneles de 400 W c/u (Ver Figura 58), así como un inversor de 100 kW, los módulos suficientes para abatir un 53% de la potencia total de la planta.

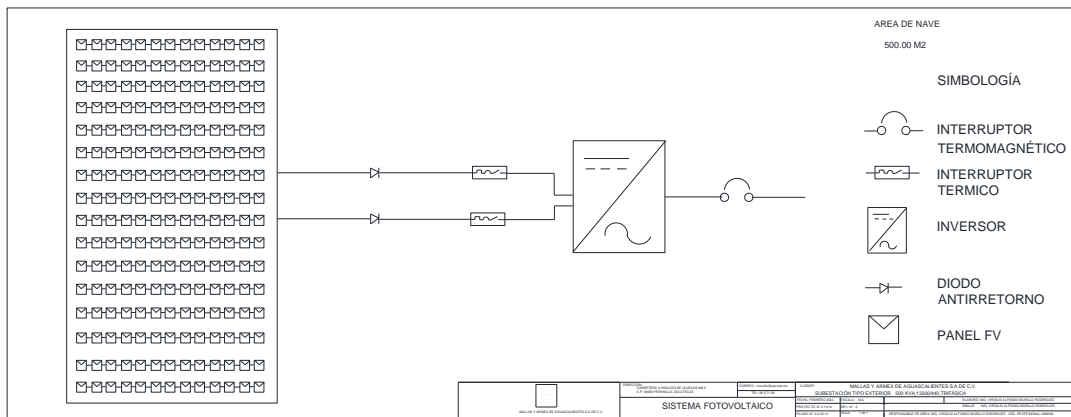


Figura 58. Diagrama unifilar del sistema fotovoltaico.
Elaboración propia

3.11. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

Con la finalidad de realizar un diseño en el sistema de control y considerando las condiciones de funcionamiento en la operación de los equipos los cuales generan perturbaciones en la calidad de la energía como se ha demostrado, bajo factor de potencia, alteraciones de voltaje y corriente, y consumo de energía eléctrica, se realiza la conexión de los elementos de regulación como son: Banco de Capacitores, Filtro de Tensión y Corriente, Sistema Fotovoltaico de acuerdo con el diseño del sistema de control en el bus 4 (Bus principal de 0.44 kV). Como se observa en la Figura 59 se integran los elementos al bus principal (Bus 4) que corresponde al bus de conexión de todos los equipos.

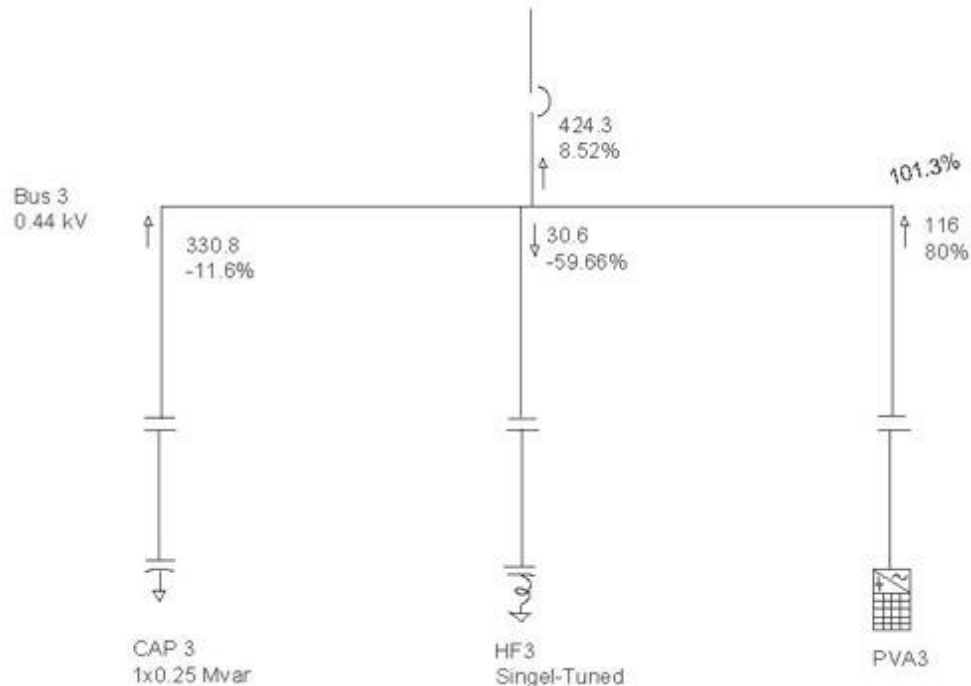


Figura 59. Diagrama unifilar integrando los elementos de control al bus principal (Bus 4).
Elaboración propia

Dentro de esta propuesta se ha considerado integrar las condiciones de operación de los equipos mediante el enclavamiento de contactores y (CR5 Banco de Capacitores, CR7 Filtro de tensión y Corriente, CR8 Sistema Fotovoltaicos, Conectados al Bus 4) para el control, condicionados en operar respecto a cada necesidad en la operatividad de la empresa, por lo que se ha realizado un listado de acuerdo con la necesidad de trabajo para el arranque de las máquinas de la planta con respecto al análisis de las mediciones realizadas para poder desarrollar la automatización del control, como se observa en la Tabla 16:

Tabla 16. Esquema de condiciones de funcionamiento de la planta.

Nomenclatura	Equipo	Potencia (w/H.P.)	Esquema de control						
			a CR5/ CAP3	b CR7 /HF 3	c CR8/PV A3	d CR5-CR7/CAP3- HF3	e CR5- CR8/CAP3- PVA3	f CR7- CR8/HF3- PVA3	g CR5-CR7- CR8/CAP3- HF3-PVA3
Mtr1	Mallacib a 1	372.5/0.5							X
Mtr4	Mallacri ba 2	372.5/0.5						X	
Mtr2	Enderez adora 1	8940/12		X		X			
Mtr3	Enderez adora 2	8940/12			X				
Mtr5	Doblado ra	7450/10		X	X				
Mtr6	Compres or	7450/10		X				X	
Mtr7	Arrastre Pesado	7450_/10			X				
Mtr8	Arrastre Ligero	22350/30	X			X	X		X
Mtr9	Enderez ado	2235/3					X		
Mtr10	Enrollad ora	3725/5					X		
Mtr11	Slitter	3725/5		X		X			
Mtr12	Trefilador a 1	18625/25	X			X	X		X
Mtr13	Trefilador a 2	14900/20			X			X	X
Mtr14	Trefilador a 3	11175/15						X	X
Mtr15	Trefilador a 4	18625/25	X			X	X	X	X
Mtr16	Trefilador a 5	14900/20		X				X	X
Mtr17	Trefilador a 6	22350/30	X			X	X	X	X
Mtr18	Bomba	3750/5				X			
Mtr19	Motorre ductor	7450/10	X						
Mtr20	Mallacri ba 3	2235/3		X					
Mtr21	Mallacri ba 4	2235/3							X
Mtr22	Mallacri ba 5	186.5/0.2 5						X	

Elaboración propia

El sistema de control se ha definido como se describe a continuación:

1. Se integra un sistema de control de arranque desarrollado con el software CADe-Simu (CADe-Simu, 2020) en cada una de las máquinas para poder identificar la operación de trabajo e integrarse al sistema de control, la cual consta de un sistema de relevadores, así como de botones de arranque y paro como lo muestra la Figura 60.

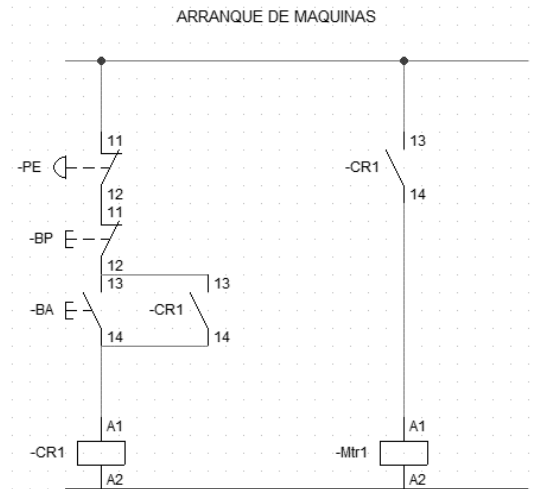


Figura 60. Control de arranque en cada una de las máquinas.
Elaboración propia

2. El diseño del control para analizar si se presenta una mejora en el factor de potencia se desarrolla de acuerdo con la necesidad de trabajo de los equipos como se describe en la tabla 16 (Columna a) para el caso que funcionan los siguientes equipos:

Arrastre ligero

Trefiladora 1

Trefiladora 4

Trefiladora 6

Motorreductor

El diseño de control se ha generado de tal manera que pueda integrar en el sistema únicamente el banco de capacitores (Energizando el Contactor CR5) como se observa en la Figura 61:



Figura 61. Control de arranque del banco de capacitores.
Elaboración propia

3. El diseño del control para analizar si se presenta una mejora en las fluctuaciones de tensión y corriente se desarrolla de acuerdo con la necesidad de trabajo de los equipos como se describe en la Tabla 16 (columna b) para el caso que funcionan los siguientes equipos:

Enderezadora 1

Dobladora

Compresor

Slitter

Trefiladora 5

Malla criba 3

El diseño de control se ha generado de tal manera que pueda integrar en el sistema únicamente el filtro de tensión y corriente (Energizando el Contactor CR7) como se observa en la Figura 62:

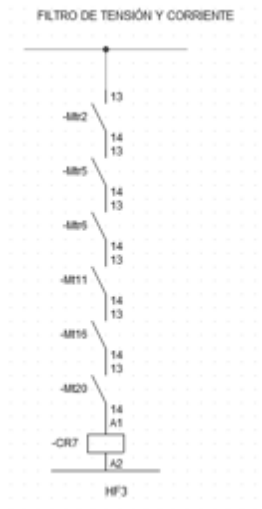


Figura 62. Control de arranque del filtro de tensión y corriente.
Elaboración propia

4. El diseño del control para analizar si se presenta una mejora en el consumo de energía eléctrica, se desarrolla de acuerdo con la necesidad de trabajo de los equipos como se describe en la Tabla 16 (columna c) para el caso que funcionan los siguientes equipos:

- Enderezadora 2
- Dobladora
- Arrastre Pesado
- Trefiladora 2

El diseño de control se ha generado de tal manera que pueda integrar en el sistema únicamente el sistema fotovoltaico (Energizando el Contactador CR8) como se observa en la Figura 63.



Figura 63. Control de arranque del sistema fotovoltaico.
Elaboración propia

5. El diseño del control para analizar si se presenta una mejora al integrar el banco de capacitores junto con el filtro de tensión y corriente, se desarrolla de acuerdo con la necesidad de trabajo de los equipos como se describe en la Tabla 16 (columna d) para el caso que funcionan los siguientes equipos:

Enderezadora 1
Arrastre Ligero
Slitter
Trefiladora 1
Trefiladora 4
Trefiladora 6
Bomba

El diseño de control se ha generado de tal manera que pueda integrar en el sistema ambos dispositivos, el banco de capacitores y el filtro de tensión y corriente (Energizando los Contactores CR5 y CR7) como se observa en la Figura 64:

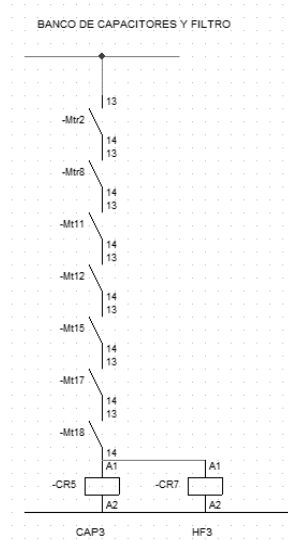


Figura 64. Control de arranque del banco de capacitores junto con el filtro de tensión y corriente.

Elaboración propia

6. El diseño del control para analizar si se presenta una mejora al integrar el banco de capacitores junto con el sistema fotovoltaico, se desarrolla de acuerdo con la necesidad de trabajo de los equipos como se describe en la Tabla 16 (Columna e) para el caso que funcionan los siguientes equipos:

- Arrastre Ligero
- Enderezado
- Enrolladora
- Trefiladora 1
- Trefiladora 4
- Trefiladora 6

El diseño de control se ha generado de tal manera que pueda desarrollar el sistema integrando ambos dispositivos el banco de capacitores y sistema fotovoltaico (Energizando los Contactores CR5 y CR8) como se observa en la Figura 65:

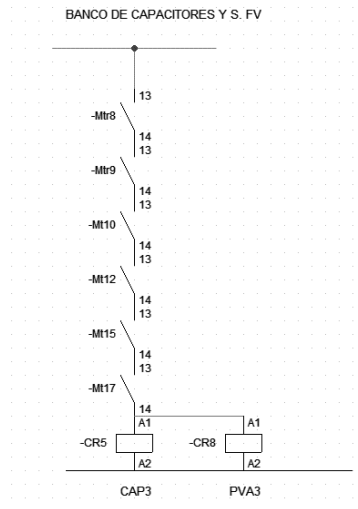


Figura 65. Control de arranque del banco de capacitores junto con el sistema fotovoltaico.
Elaboración propia

7. El diseño del control para analizar si se presenta una mejora al integrar el filtro de tensión y corriente junto con el sistema fotovoltaico, se desarrolla de acuerdo con la necesidad de trabajo de los equipos como se describe en la Tabla 16 (Columna f) para el caso que funcionan los siguientes equipos:

- Malla criba 2
- Compresor
- Trefiladora 2
- Trefiladora 3
- Trefiladora 4
- Trefiladora 5
- Trefiladora 6

El diseño de control se ha generado de tal manera que pueda desarrollar el sistema integrando ambos dispositivos el filtro de tensión y corriente y el sistema fotovoltaico (Energizando los Contactores CR7 y CR8) como se observa en la Figura 66:

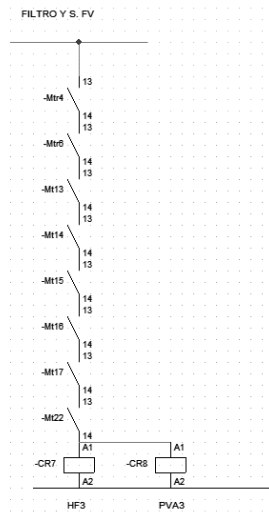


Figura 66. Control de arranque del filtro de tensión y corriente junto con el sistema fotovoltaico.

Elaboración propia

8. El diseño del control para analizar si se presenta una mejora al integrar los tres dispositivos el banco de capacitores, el filtro de tensión y corriente junto con el sistema fotovoltaico, se desarrolla de acuerdo con la necesidad de trabajo de los equipos como se describe en la Tabla 16 (Columna g) para el caso que funcionan los siguientes equipos:

- Malla criba 1
- Arrastre Ligero
- Trefiladora 1
- Trefiladora 2
- Trefiladora 3
- Trefiladora 4
- Trefiladora 5
- Trefiladora 6
- Malla criba 4

El diseño de control se ha generado de tal manera que pueda desarrollar el sistema integrando los tres dispositivos el banco de capacitores, el filtro de tensión y corriente y el sistema fotovoltaico (Energizando los Contactores CR, CR7 y CR8) como se observa en la Figura 67:

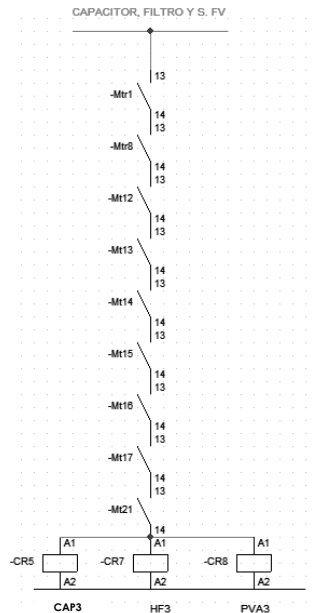


Figura 67. Control de arranque de los tres sistemas de regulación.
Elaboración propia

3.12. ESTRATEGIA METODOLÓGICA DE LA INVESTIGACIÓN

Se realiza una estrategia metodológica acerca de la presente investigación para desarrollar una serie de pasos a seguir que explican en secuencia las etapas de cada proceso para llevar a cabo el análisis de la calidad de la energía, así como los esquemas de control para mejorar las perturbaciones en la empresa como se describe a continuación:

1. Recolección de la Información.
 - a. Análisis del recibo de luz
 - b. Toma de datos eléctricos de placa en las máquinas y equipos instalados
 - c. Análisis de los sistemas de trabajo en la empresa (horarios, funcionamiento de máquinas, etc.)
 - d. Conexión de los instrumentos de medición e interpretación de variables
 - e. Desarrollo y análisis del diagrama unifilar general

2. Base de datos y desarrollo estadístico de la información.
 - a. Elaboración de gráficas para el análisis de consumos
 - b. Elaboración de gráficas e interpretación de variables en la conexión de instrumentos de medición
 - c. Análisis y desarrollo estadístico de variables (ANOVA) para determinar las variaciones del sistema eléctrico
 - d. Elaboración de gráficas para determinar los estadísticos residuales de cada variable

3. Diseño y cálculo de los elementos de regulación.
 - a. Cálculo del sistema eléctrico
 - b. Esquema de trabajo de las máquinas (horario, carga, tipo de arranque, etc.)
 - c. Selección de los elementos de regulación (banco de capacitores, filtros de tensión y corriente)
 - d. Diseño del sistema fotovoltaico
 - e. Incorporación en el diagrama unifilar general

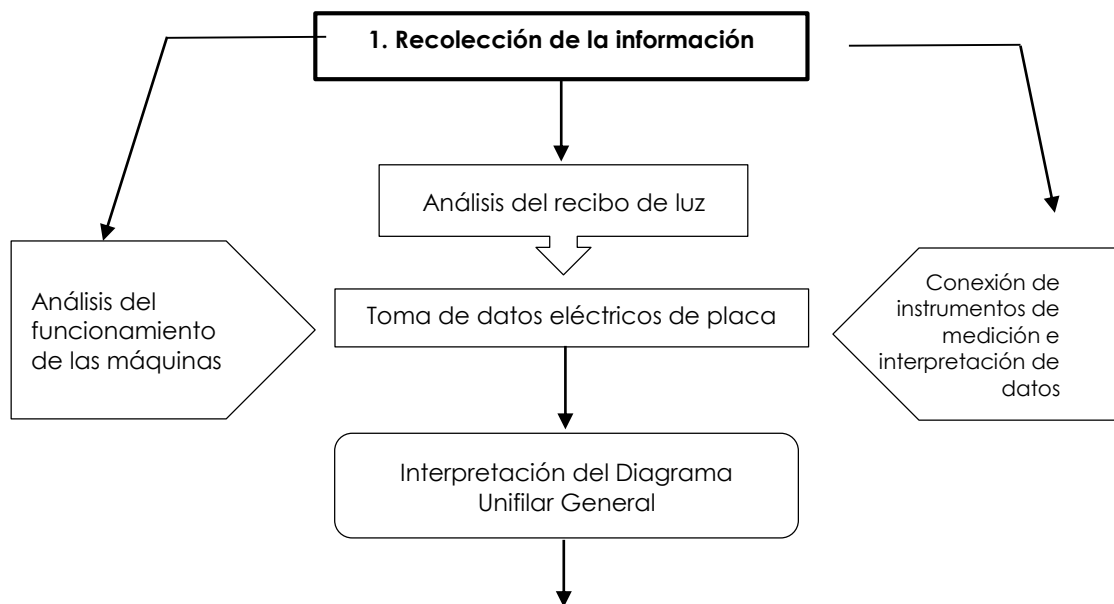
4. Elaboración del diagrama en el software de simulación.
 - a. Desarrollo y análisis del flujo de carga de cada sección
 - b. Análisis de coordinación de protecciones
 - c. Análisis del flujo de carga en la interpretación de los datos (factor de potencia, corriente, potencias, etc.)
 - d. Incorporación de los elementos de regulación en el esquema de simulación.

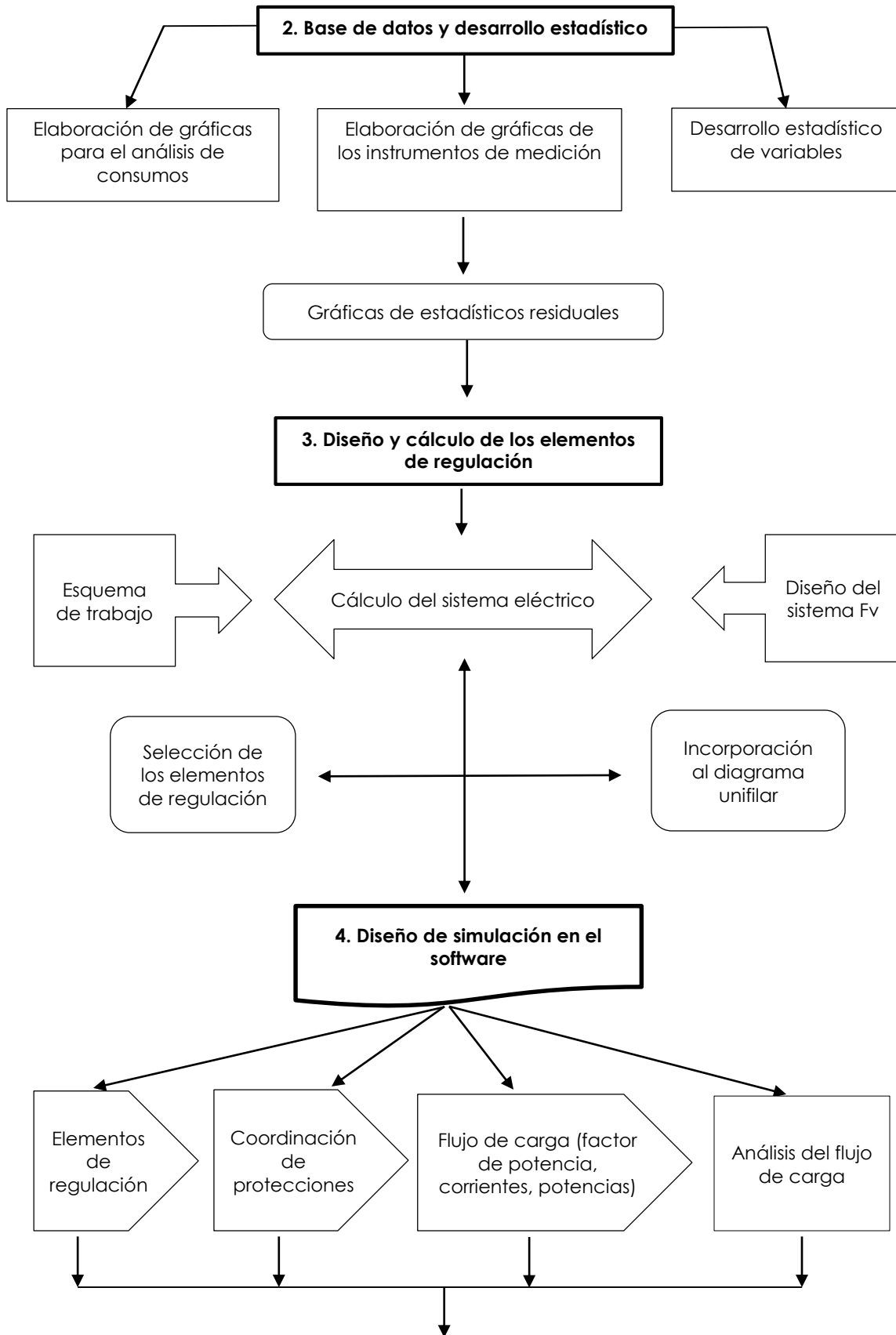
5. Diseño del sistema de control
 - a. Esquema de funcionamiento de la empresa para cada una de las máquinas
 - b. Diseño del sistema de control en relación con las condiciones de funcionamiento
 - c. Incorporación del diseño de control en el software de simulación

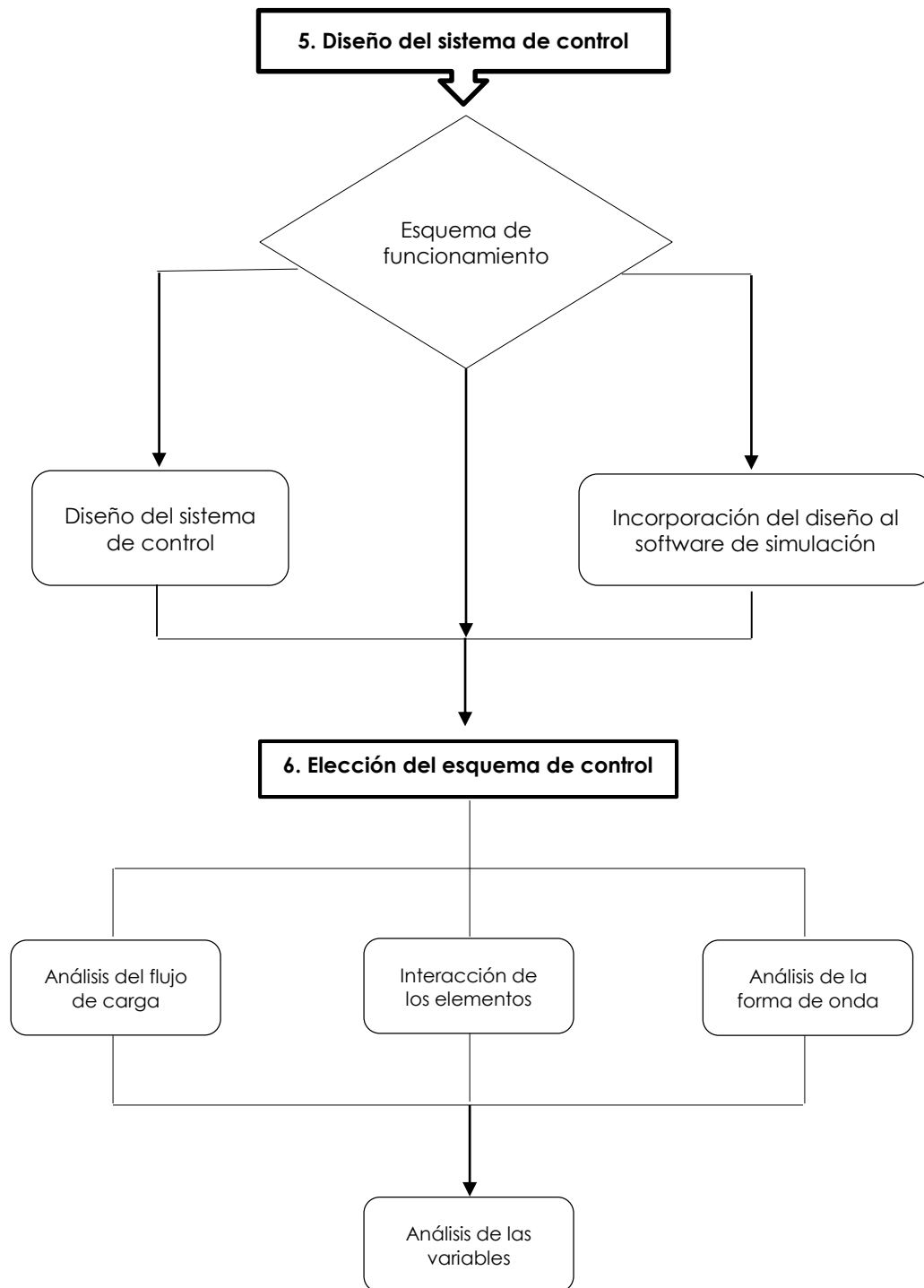
6. Elección del esquema de control en la simulación del sistema.
 - a. Análisis del flujo de carga
 - b. Interacción de los elementos de regulación en el flujo de carga
 - c. Análisis de la forma de onda para cada sección
 - d. Análisis de las cargas para cada sección en cuanto a factor de potencia, corriente y potencia

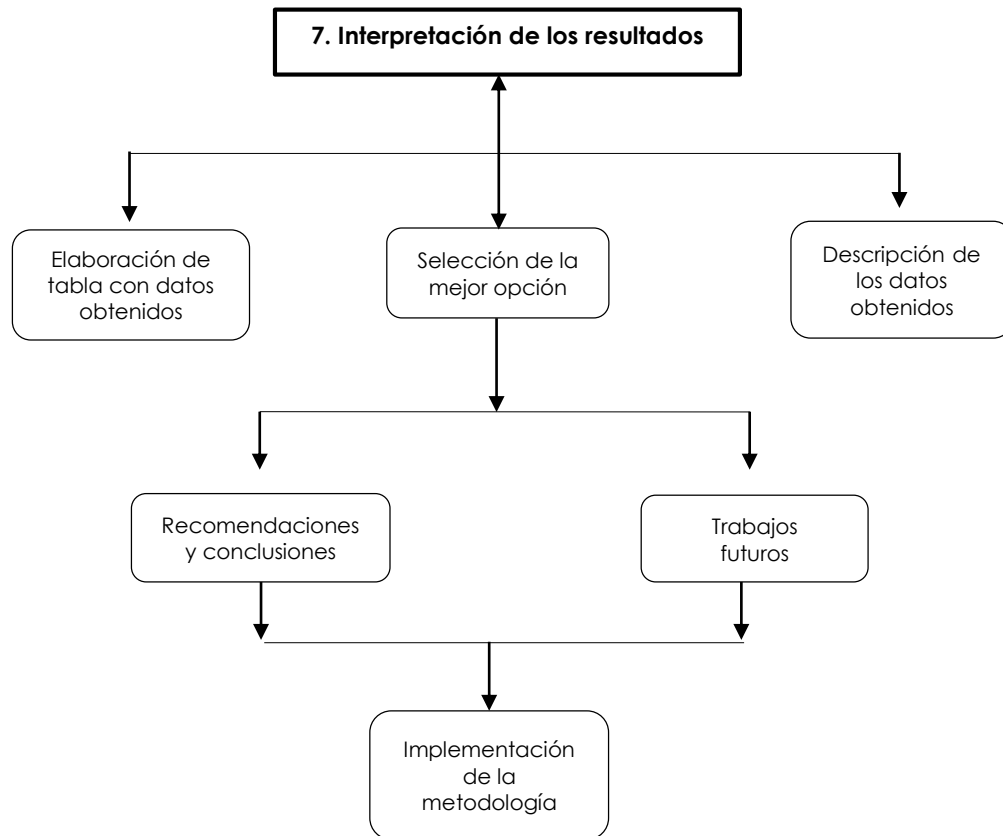
7. Interpretación de los resultados.
 - a. Elaboración de una tabla representando los datos obtenidos
 - b. Selección de la mejor opción en los resultados de cada esquema
 - c. Descripción de las observaciones obtenidas en base con los resultados obtenidos
 - d. Descripción de las recomendaciones y aportaciones de acuerdo con los datos obtenidos
 - e. Elaboración de trabajos futuros derivados de los resultados obtenidos
 - f. Implementación de la metodología

3.12.1. Diagrama de flujo de la estrategia metodológica de la investigación









4. RESULTADOS

4.1. SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

Para realizar el análisis en la simulación del sistema de regulación de la calidad de la energía y la automatización bajo el control de los equipos, se realiza el flujo de carga para la sección del bus principal (Bus 4) en cada una de las interacciones que desarrolla el sistema de automatización como se describe a continuación:

1. Simulación en el control para el bajo factor de potencia comenzando en el bus 4 energizando únicamente el banco de capacitores CAP 3, el cual se determinan los resultados podemos obtener una corriente de 12.9 Amp y un factor de potencia de -93.42%, así mismo los resultados en el lado de baja del transformador T1 obtenemos una corriente de 386.8 Amp y un factor de potencia de -92.17%, como lo muestra la Figura 68.

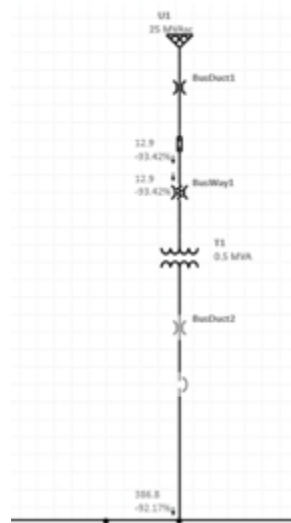


Figura 68. Simulación de control del banco de capacitores (CAP3) en el bus 4.
Elaboración propia

Al energizar únicamente el banco de capacitores (CAP 3), como se muestra en la Figura 69, obtenemos la corriente en el bus de 327.4 Amp lo que nos indica que hay más presencia de trabajo de carga de potencia reactiva, esto de acuerdo con el signo negativo de la carga presentada de -11.6%.

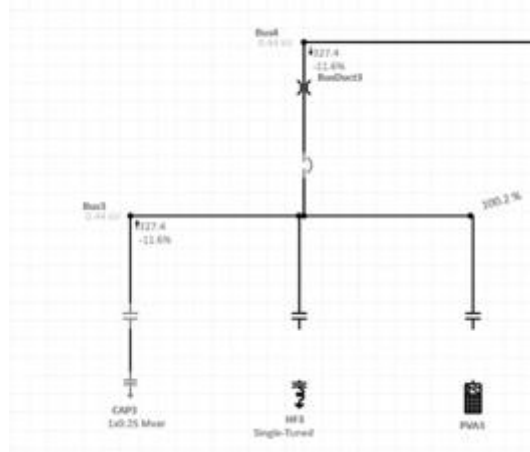


Figura 69. Simulación de control del banco de capacitores (CAP3).
Elaboración propia

También se han registrado los valores de la potencia real (kW) y la potencia reactiva (kVAr) en el lado de alta del transformador T1 se observa una potencia de $275.4-j105.1$ con el fin de analizar el comportamiento de las cargas predominantes en el sistema, así mismo se observa una potencia real de $272.3-j114.6$. (Ver Figura 70).

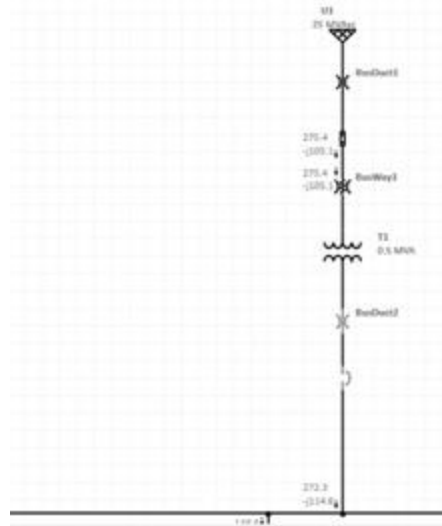


Figura 70. Simulación de potencias real y reactiva en bus 4.
Elaboración propia

2. Simulación de control en el filtro de armónicos HF3 comenzando en el bus 4, energizando únicamente el filtro de tensión y corriente HF3, podemos observar una corriente en el lado de alta del transformador T1 de 12.6 Amp y un factor de potencia de 90.06%, así mismo del lado de baja del transformador T1 se han

registrado los datos con una corriente de 377.9 Amp y un factor de potencia de 91.1%, el cual se determinan los resultados como se describe en la Figura 71:

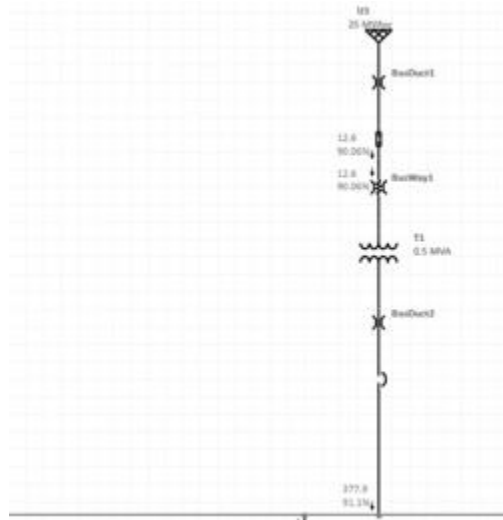


Figura 71. Simulación de control del filtro de tensión y control (HF3).
Elaboración propia

De igual manera se han tomado los datos de la potencia real (kW) y reactiva (kVAr) en el lado de alta del transformador principal T1 de $259.4+j152.2$, los datos en el lado de baja del transformador se han registrado de $256.4+j116.1$. Tomando en cuenta únicamente el filtro de tensión y corriente en el esquema de control como se observa en la Figura 72 se pueden obtener los datos de la potencia real y reactiva de $13.1-j17.7$ lo que indica que la aportación de potencias es muy baja.

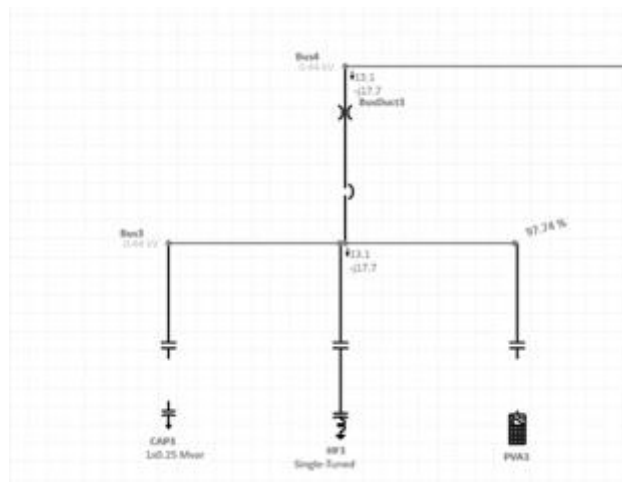


Figura 72. Simulación de control del filtro de tensión y corriente (HF3).
Elaboración propia

3. Simulación de control del sistema fotovoltaico (PVA3) comenzando en el bus 4, energizando únicamente el sistema, de acuerdo con el sistema de control cuando se cumplan las condiciones para energizar el sistema fotovoltaico, se obtiene los resultados con una corriente en el lado de alta del transformador T1 de 8.4 Amp y un FP de 89.94%, y en el lado de baja del transformador T1 con una corriente de 252.4 Amp y un FP de 90.63%, el cual se determinan los resultados como se describe en la Figura 73:

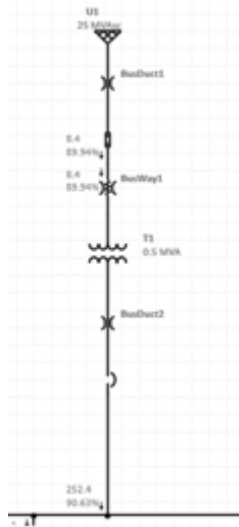


Figura 73. Simulación del sistema fotovoltaico (PVA3).
Elaboración propia

Al energizar únicamente el sistema fotovoltaico (PVA 3), como se muestra en la Figura 74, obtenemos la potencia real y reactiva de $71.6+j53.7$ lo que indica una presencia de trabajo de carga de potencia reactiva, esto de acuerdo con el signo de la carga presentada de 53.7%.

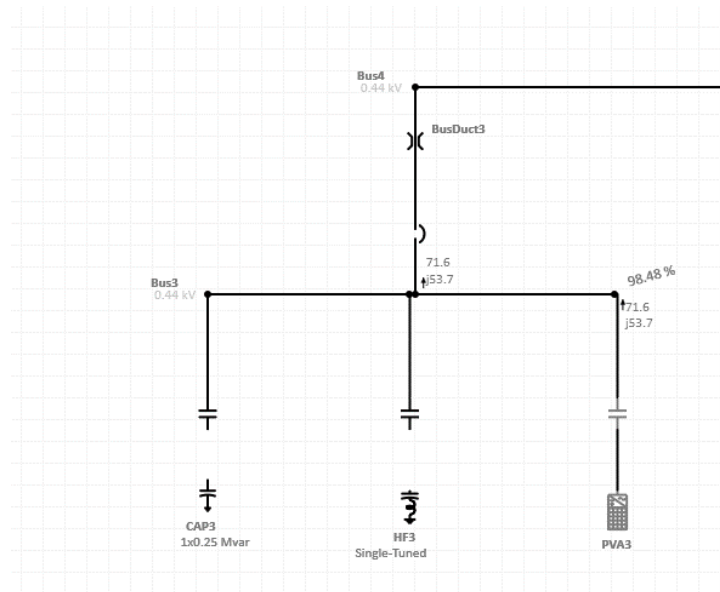


Figura 74. Simulación de control del sistema fotovoltaico (PVA3).
Elaboración propia

Se han tomado los datos también de las potencias real (kW) y reactiva (kVAr) de $173+j84.1$ esto en el lado de alta del transformador T1 así mismo se han tomado las lecturas en el lado de baja del transformador T1 de $171.7+j80.1$ (Ver Figura 75).

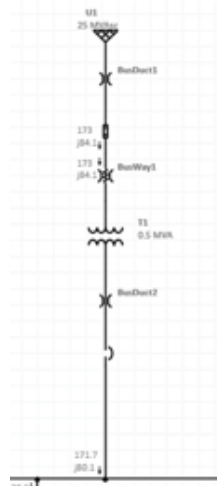


Figura 75. Potencias real y reactiva del sistema fotovoltaico (PVA3).
Elaboración propia

4. Simulación de control energizando los dos elementos al mismo tiempo el banco de capacitores CAP3 y el filtro de tensión y corriente HF3 simultáneamente, con el fin de analizar el comportamiento de las variables principales.

Los datos que se registran en la simulación podemos analizar primero la corriente en el lado de alta del transformador principal T1 de 13.8 Amp y un factor de potencia de -92.03%. Los datos registrados en el lado de baja del transformador T1 es de 413.2 Amp y -90.56% de factor de potencia indicando una mayor carga inductiva como se puede ver en la Figura 76.

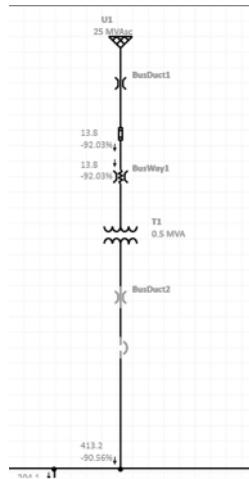


Figura 76. Simulación del sistema de control del banco de capacitores y el filtro de tensión y corriente.
Elaboración propia

Se han registrado los datos al energizar simultáneamente el sistema de regulación del banco de capacitores y el filtro de tensión y corriente tomando los datos de potencia real (kW) y potencia reactiva (kVAr) de 298.8-j123.2 de acuerdo con los datos obtenidos en la Figura 77.

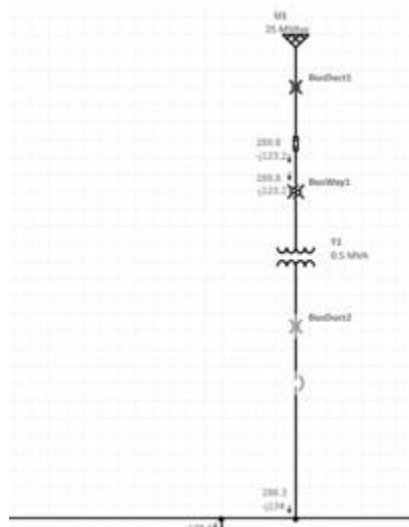


Figura 77. Simulación del banco de capacitores (CAP3) y el filtro de tensión y corriente (HF3).
Elaboración propia

Se muestra así mismo el diagrama de control en donde se integran los dos elementos de regulación el banco de capacitores y el filtro de tensión y corriente como lo muestra la Figura 78.

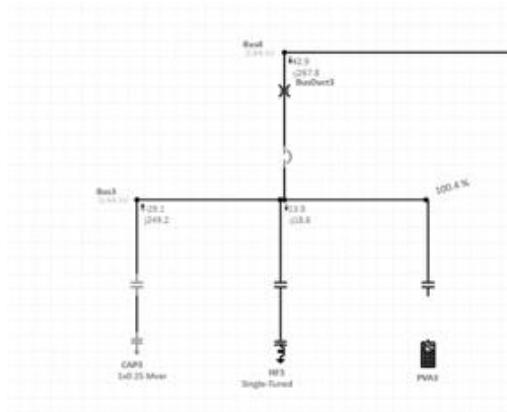


Figura 78. Simulación del capacitor (CAP3) y el filtro de tensión y corriente (HF3).
Elaboración propia

5. Simulación de control energizando los dos elementos al mismo tiempo el banco de capacitores CAP3 y el sistema fotovoltaico simultáneamente PVA3 con el fin de analizar el comportamiento de las variables principales.

Se han tomado en cuenta los datos registrados de acuerdo con la simulación mencionada con el fin de determinar la corriente primeramente en el lado de alta del transformador principal T1 tomando 11.5 Amp y un FP de -77.65% y en el bus 4 una corriente de 344.2 Amp y un f.p. de -75.87%. (Ver Figura 79).

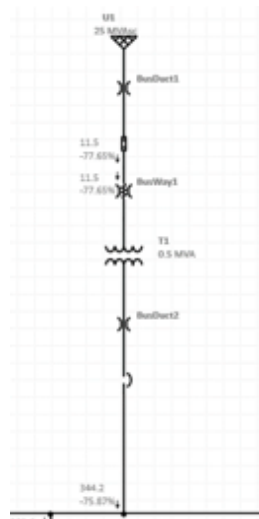


Figura 79. Simulación del banco de capacitores (CAP3) junto con el sistema fotovoltaico (PVA3), lado de alta del transformador.
Elaboración propia

Se han tomado los datos de la potencia real (kW) y la potencia reactiva (kVAr), en el lado de alta del transformador T1 de 203.7-j165.3, para el lado de baja del transformador T1 se ha registrado los valores en el Bus 4 de 201.2-j172.8. (Ver Figura 80).

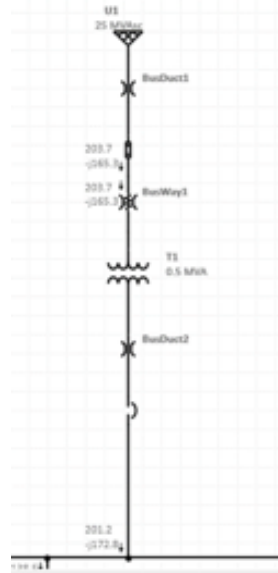


Figura 80. Simulación del banco de capacitores (CAP3) junto con el sistema fotovoltaico (PVA3), lado de baja del transformador.
Elaboración propia

Se muestra en la Figura 81 el sistema de control integrando los elementos de regulación y control del banco de capacitores CAP 3 y el sistema Fotovoltaico PVA 3 al energizarse al mismo tiempo.

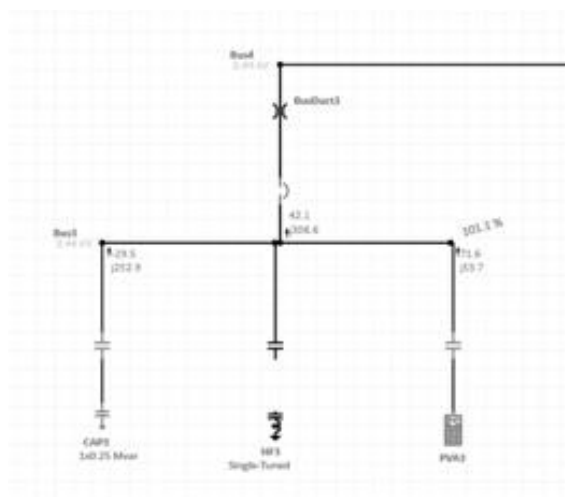


Figura 81. Simulación de control del banco de capacitores (CAP3) junto con el sistema fotovoltaico (PVA3).
Elaboración propia

6. Simulación de control energizando los dos elementos al mismo tiempo el filtro de tensión y corriente HF3 y el sistema fotovoltaico simultáneamente PVA3 con el fin de analizar el comportamiento de las variables principales.

Se han tomado en cuenta los datos de acuerdo con la simulación del control y regulación energizando ambos elementos al mismo tiempo el filtro de tensión y corriente HF3 y el sistema fotovoltaico PVA3 en cuanto a la potencia real (kW) y potencia reactiva (kVAr) de $186.5+j66.4$ esto en el lado de alta del transformador principal T1, y para el lado de baja del transformador T1 una potencia real (kW) y una potencia reactiva (kVAr) de $185.1+j62.1$. (Ver Figura 82).

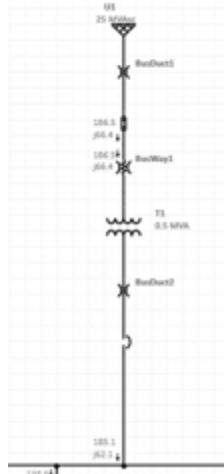


Figura 82. Simulación del filtro de tensión y corriente (HF3) junto con el sistema fotovoltaico (PVA3) en el lado de alta del transformador.

Elaboración propia

Al energizar al mismo tiempo los sistemas de regulación del filtro de tensión y corriente, así como el sistema fotovoltaico se puede obtener los datos de corriente y factor de potencia en el lado de alta del transformador T1 de 8.7 Amp y un FP de 94.21% y en el bus 4 de 259.7 Amp y un f.p. de 94.81%. (Ver Figura 83).

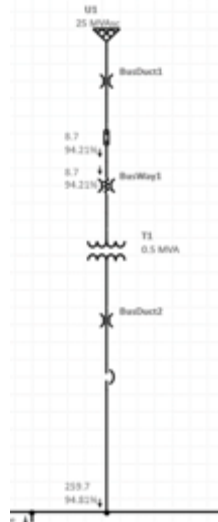


Figura 83. Simulación de control del filtro de tensión y corriente (HF3) y el sistema fotovoltaico (PVA3) tomando los valores de corriente y factor de potencia.
Elaboración propia

Se muestra en la Figura 84 el sistema de control integrando los elementos de regulación y control del filtro de tensión corriente HF3 y el sistema Fotovoltaico PVA 3 al energizarse al mismo tiempo.

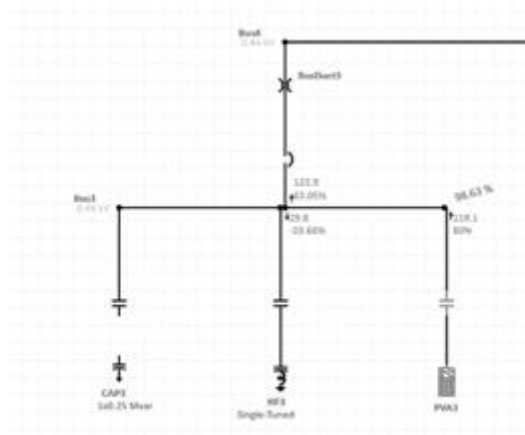


Figura 84. Simulación del filtro de tensión y corriente (HF3) y el sistema fotovoltaico (PVA3).
Elaboración propia

7. Simulación de control energizando los tres elementos al mismo tiempo el filtro de tensión y corriente HF3 y el sistema fotovoltaico simultáneamente PVA3 y Banco de capacitores con el fin de analizar el comportamiento de las variables principales.

Se han tomado en cuenta los datos en el lado de alta del transformador principal T1 de acuerdo con el sistema de simulación energizando los tres elementos, los cual para la potencia real (kW) y la potencia reactiva (kVAr) son de 218.3-j183.6 así mismo se han tomado en cuenta los datos en el lado de baja del transformador T1 de 215.5-j192.6. (Ver Figura 85).

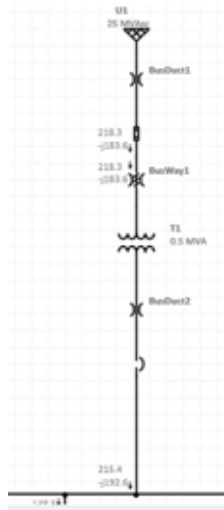


Figura 85. Simulación de los tres elementos, el filtro de tensión y corriente (HF3), sistema fotovoltaico (PVA3) y el banco de capacitores (CAP3).
Elaboración propia

Una vez energizados los tres elementos de control se ha tomado la lectura de corriente y factor de potencia del lado de alta del transformador T1 de 12.5 Amp y un f.p. de -76.52%, de igual manera se han tomado los datos en el lado de baja del transformador T1 de 374.3 Amp y un f.p. de -74.56%. (Ver Figura 86).

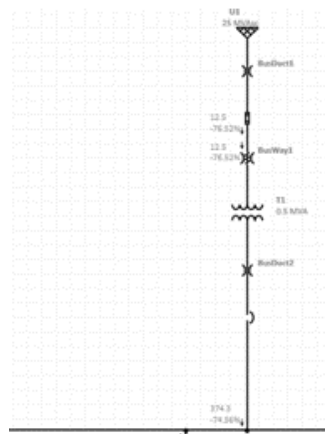


Figura 86. Simulación de los tres elementos, el filtro de tensión y corriente (HF3), el sistema fotovoltaico (PVA3) y el banco de capacitores (CAP3) en el lado de alta del transformador T1.
Elaboración propia

Se muestra en la Figura 87 el sistema de control integrando los tres elementos de regulación y control del filtro de tensión corriente HF3, el sistema Fotovoltaico PVA 3 y el banco de capacitores CAP 3 al energizarse al mismo tiempo.

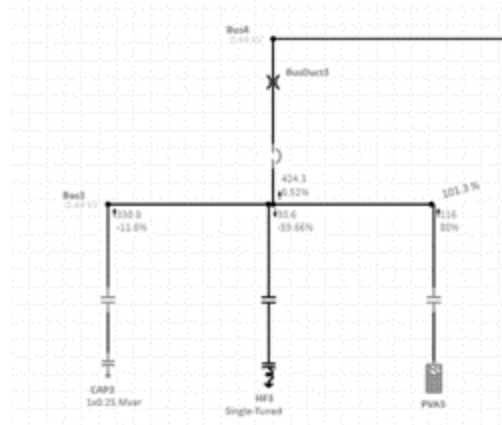


Figura 87. Simulación de los tres elementos de regulación.
Elaboración propia

4.2. GENERACIÓN DE LA FORMA DE ONDA

Una vez que se ha desarrollado el sistema de automatización y control de los dispositivos de regulación se genera la simulación mediante el programa de sistemas eléctricos en cuanto a la formación de onda relacionando los diferentes esquemas de conexión y control, generando las formas de onda en el transformador principal y en el bus general (Bus 4).

Generación de la forma de onda en el Bus general (Bus 4) cuando se conecta el banco de capacitores (CAP3) esto con el fin de determinar su atenuación mostrando un comportamiento más regular en la formación de la perturbación periódica presentando buenos niveles de regulación como se observa en la Figura 88.

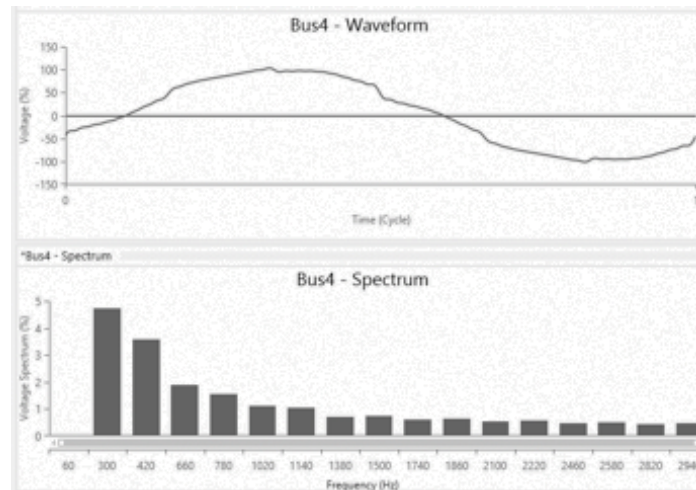


Figura 88. Forma de onda del banco de capacitores en el bus 4.
Elaboración propia

Generación de la forma de onda en el Bus general (Bus 4) cuando se conecta el filtro de tensión y corriente (HF3) esto con el fin de determinar su atenuación mostrando un comportamiento irregular en la perturbación periódica presentando alteraciones importantes en los niveles de regulación como se observa en la Figura 89.

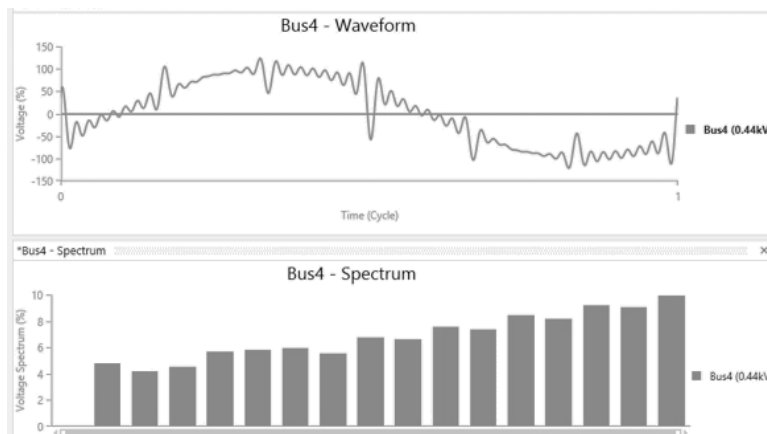


Figura 89. Forma de onda del filtro de tensión y corriente en el bus 4.
Elaboración propia

Generación de la forma de onda en el bus general (Bus 4) cuando se conecta sistema fotovoltaico (PVA3) esto con el fin de determinar su atenuación mostrando un comportamiento irregular en la perturbación periódica presentando alteraciones importantes en los niveles de regulación como se observa en la Figura 90.

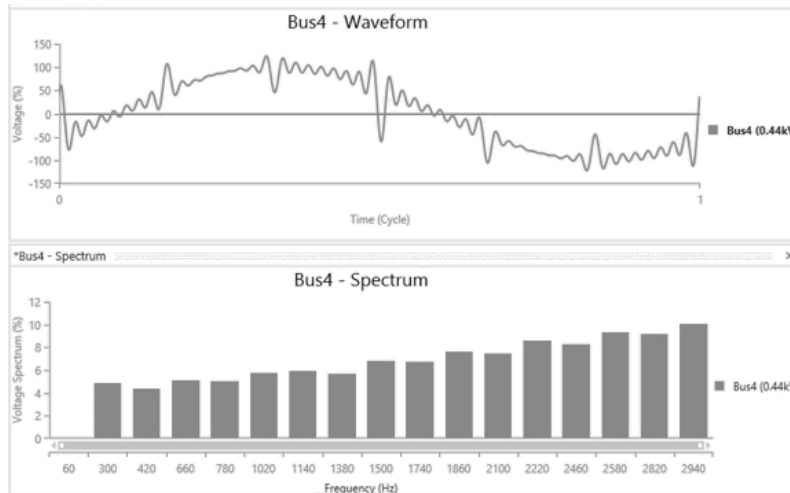


Figura 90. Forma de onda del sistema fotovoltaico en el bus 4.
Elaboración propia

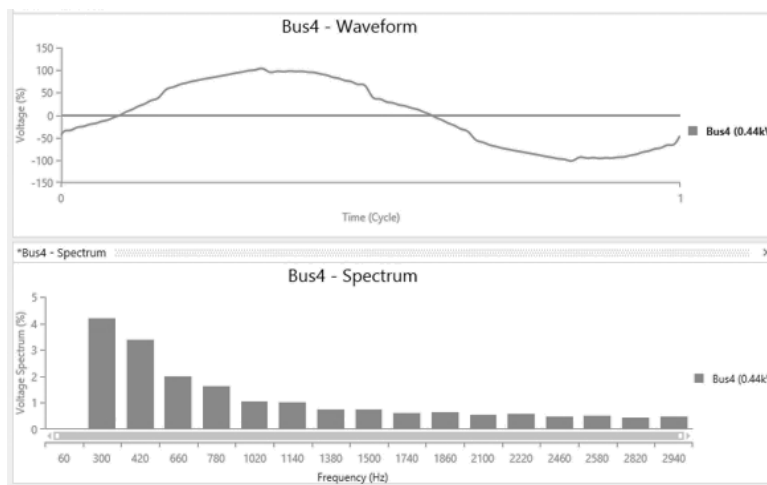


Figura 91. Forma de onda del banco de capacitores (CAP3) junto con el filtro de tensión y corriente (HF3) en el bus 4.
Elaboración propia

Generación de la forma de onda en el bus general (Bus 4) cuando se conecta el banco de capacitores (CAP3) junto con el sistema fotovoltaico (PVA3) esto con el fin de determinar su atenuación mostrando un comportamiento más regular en la formación de la perturbación periódica presentando buenos niveles de regulación como se observa en la Figura 92.

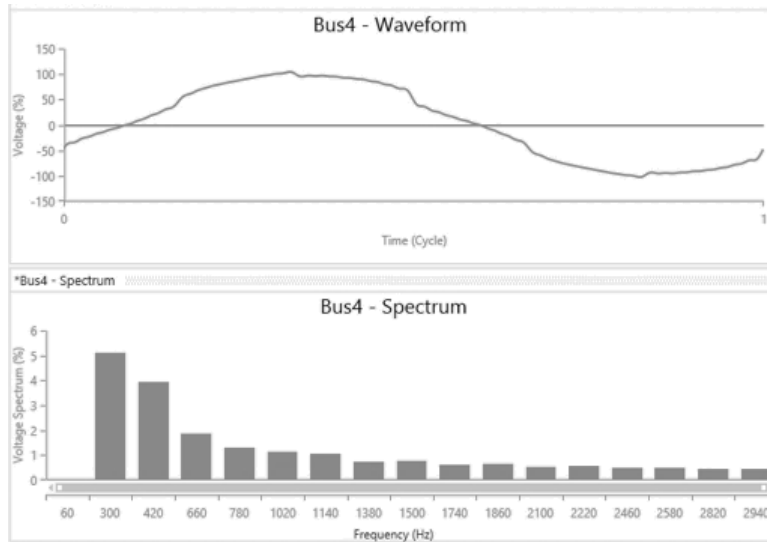


Figura 92. Forma de onda del banco de capacitores (CAP3) junto con el sistema fotovoltaico (PVA3) en el bus 4.
Elaboración propia

Generación de la forma de onda en el bus general (Bus 4) cuando se conecta el filtro de tensión y corriente (HF3) junto con el sistema fotovoltaico (PVA3) esto con el fin de determinar su atenuación mostrando un comportamiento más regular en la formación de la perturbación periódica presentando buenos niveles de regulación como se observa en la Figura 93.

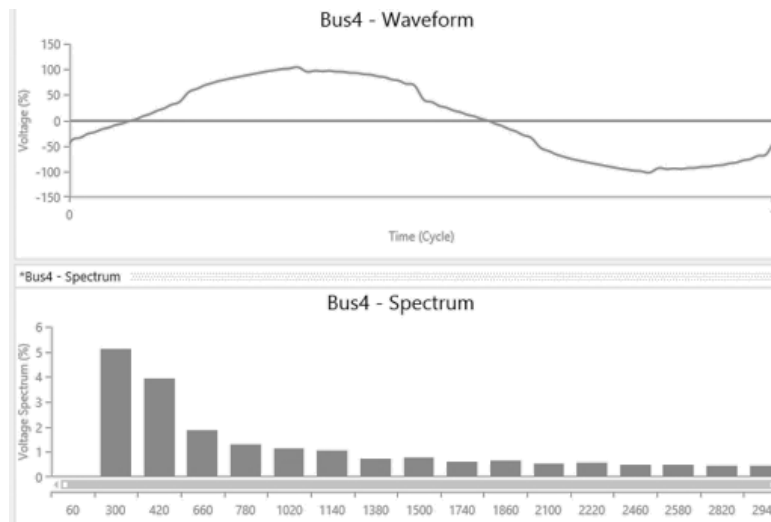


Figura 93. Forma de onda del filtro de tensión y corriente junto con el sistema fotovoltaico (PVA3) en el bus 4.
Elaboración propia

Generación de la forma de onda en el bus general (Bus 4) cuando se conectan los tres dispositivos de regulación, el filtro de tensión y corriente (HF3), banco de capacitores y el sistema fotovoltaico (PVA3) esto con el fin de determinar su atenuación mostrando un comportamiento más regular en la formación de la perturbación periódica presentando buenos niveles de regulación como se observa en la Figura 94.

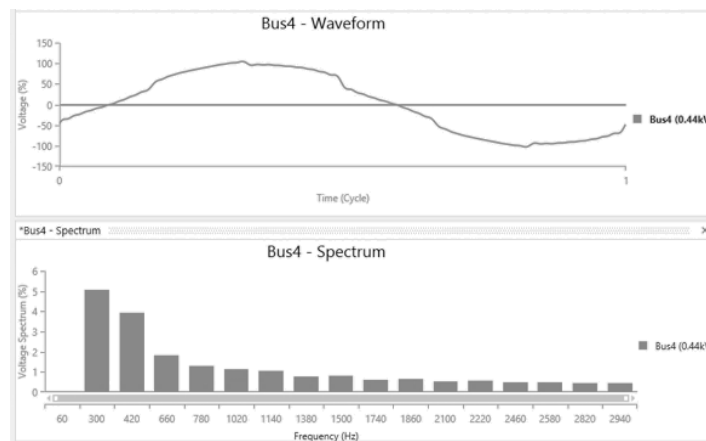


Figura 94. Forma de onda del filtro de tensión y corriente (HF3), banco de capacitores (CAP3) y sistema fotovoltaico (PVA3) en el bus 4.
Elaboración propia

La generación de la forma de onda en el transformador general (T1, 13.2 kV) cuando se conecta el sistema fotovoltaico (PVA3) analizando la atenuación ha mostrado un comportamiento irregular en la formación de la perturbación periódica presentando alteraciones en niveles de regulación como se observa en la Figura 95.

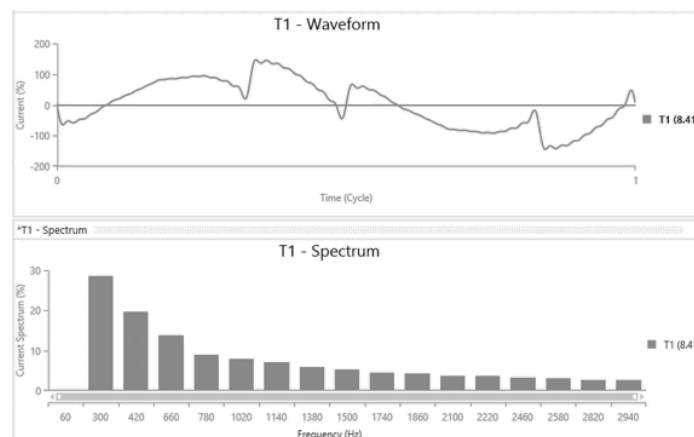


Figura 95. Forma de onda en el transformador general (T1, 13.2 kV) cuando se conecta el sistema fotovoltaico (PVA3).
Elaboración propia

Generación de la forma de onda en el transformador general (T1, 13.2 kV) cuando se conectan los tres dispositivos, filtro de tensión y corriente, banco de capacitores y el sistema fotovoltaico (PVA3) esto con el fin de determinar su atenuación mostrando un comportamiento irregular en la formación de la perturbación periódica presentando alteraciones en los niveles de regulación como se observa en la Figura 96.

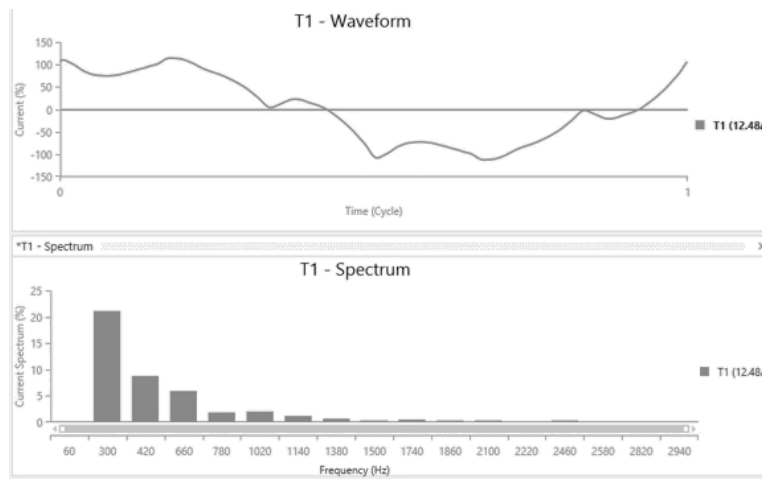


Figura 96. Forma de onda en el transformador general (t1, 13.2 kV) cuando se conectan los tres dispositivos, filtro de tensión y corriente (HF3), banco de capacitores (CAP3), y el sistema fotovoltaico (PVA3).
Elaboración propia

Generación de la forma de onda en el transformador general (T1, 13.2 kV) cuando se conecta el banco de capacitores esto con el fin de determinar su atenuación mostrando un comportamiento irregular en la formación de la perturbación periódica presentando alteraciones en los niveles de regulación como se observa en la Figura 97.

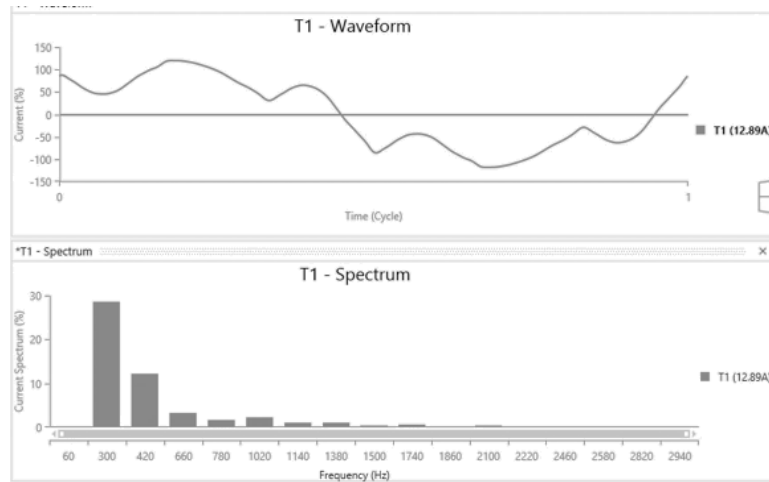


Figura 97. Forma de onda en el transformador general (T1, 13.2 kV) cuando se conecta el banco de capacitores (CAP3).
Elaboración propia

Generación de la forma de onda en el transformador general (T1, 13.2 kV) cuando se conecta el filtro de tensión y corriente esto con el fin de determinar su atenuación mostrando un comportamiento irregular en la formación de la perturbación periódica presentando alteraciones en los niveles de regulación como se observa en la Figura 98.

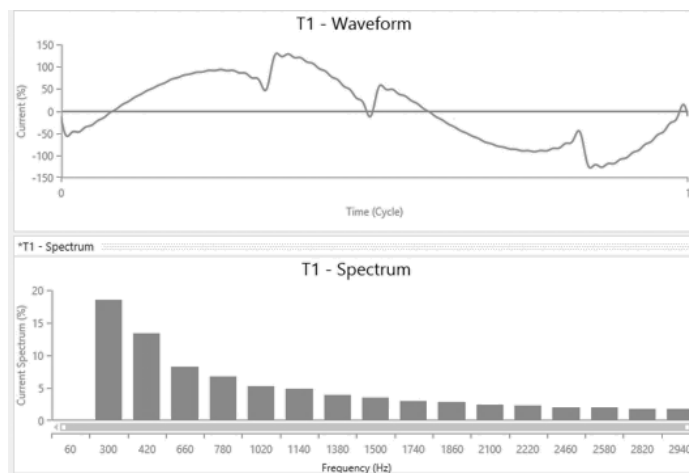


Figura 98. Forma de onda en el transformador general (T1, 13.2 kV) en el filtro de tensión y corriente (HF3).
Elaboración propia

Generación de la forma de onda en el transformador general (T1, 13.2 kV) cuando se conecta el filtro de tensión y corriente y el banco de capacitores esto con el fin de determinar su atenuación mostrando un comportamiento irregular en la

formación de la perturbación periódica presentando alteraciones en los niveles de regulación como se observa en la Figura 99.

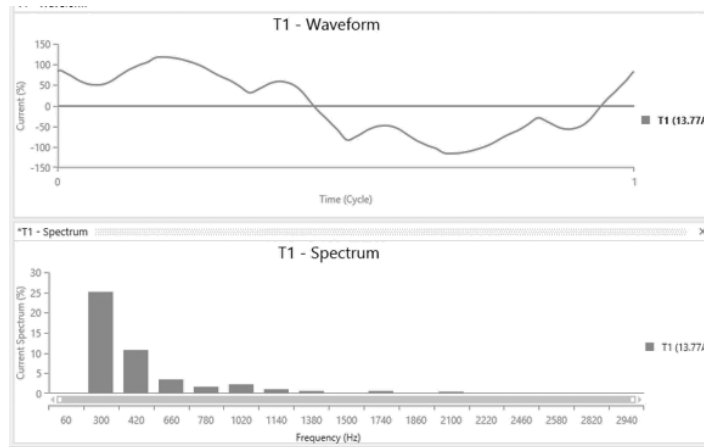


Figura 99. Forma de onda en el transformador general (T1, 13.2 kV) en el filtro de tensión y corriente HF3) junto con el banco de capacitores (CAP3).
Elaboración propia

Generación de la forma de onda en el transformador general (T1,13.2 kV) cuando se conecta el banco de capacitores y el sistema fotovoltaico esto con el fin de determinar su atenuación mostrando un comportamiento irregular en la formación de la perturbación periódica presentando alteraciones en los niveles de regulación como se observa en la Figura 100.

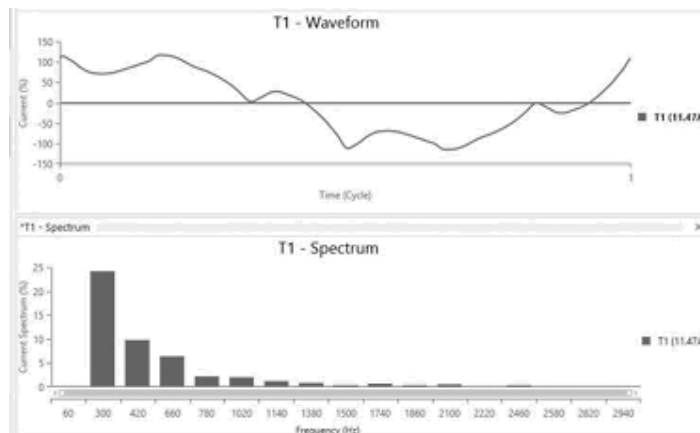


Figura 100. Forma de onda en el transformador general (T1, 13.2 kV) en el banco de capacitores (CAP3) y el sistema fotovoltaico (PVA3).
Elaboración propia

Generación de la forma de onda en el transformador general (T1, 13.2 kV) cuando se conecta el filtro de tensión y corriente y el sistema fotovoltaico esto con el fin de determinar su atenuación mostrando un comportamiento irregular en la formación de la perturbación periódica presentando alteraciones en los niveles de regulación como se observa en la Figura 101.

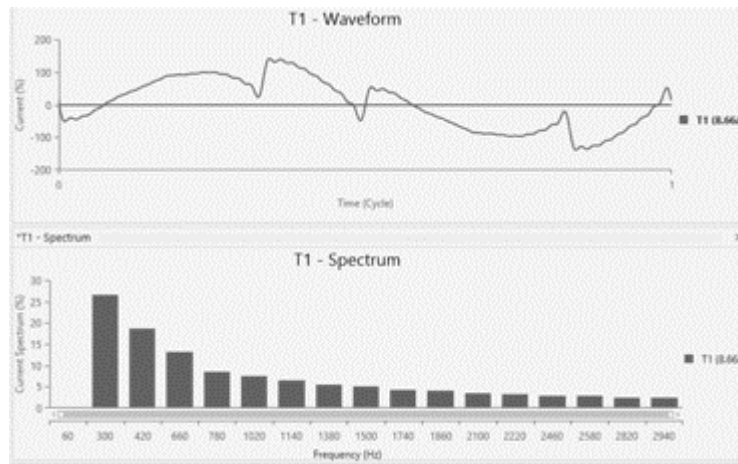


Figura 101. Forma de onda en el transformador general (T1, 13.2 kV) en el filtro de tensión y corriente (HF3) junto con el sistema fotovoltaico (PVA3).
Elaboración propia

Una vez que se ha desarrollado el sistema de automatización y control de los dispositivos de regulación se genera la simulación mediante el programa de sistemas eléctricos en cuanto a la formación de onda relacionando los diferentes esquemas de conexión y control, generando las formas de onda en el transformador principal y en el bus general (Bus 4).

De igual manera se registran los resultados en la Tabla 17, los cuales muestran los valores de corriente, factor de potencia y forma de onda de las diferentes configuraciones seleccionadas en el sistema de control.

Tabla 17. Resultados de acuerdo con la interacción de los dispositivos de control.

Equipo	Corriente		Factor de Potencia		Características Forma de Onda	
	Transformador T1 Lado de Alta	Transformador lado de baja (Bus 4)	Transformador T1 Lado de Alta	Transformador lado de baja (Bus 4)	Transformador T1 Lado de Alta	Transformador Lado de Baja (Bus 4)
Banco de Capacitores (CAP3)	12.9	386.8	-93.42	-92.17	Regular	Bien
Filtro Tensión-Corriente (HF3)	12.6	377.9	90.06	91.1	Mal	Mal
Arreglo Sistema Fotovoltaico (PVA3)	8.4	252.4	89.94	90.63	Regular	Mal
Banco de capacitores (CAP3) and Filtro de Tensión-Corriente (HF3)	12.5	374.3	-76.52	-74.56	Regular	Bien
Banco de capacitores (CAP3) y arreglo del Sistema Fotovoltaico (PVA3)	11.5	344.2	-77.65	-75.87	Regular	Bien
Arreglo del Sistema Fotovoltaico (PVA3) y Filtro de Tensión-Corriente (HF3)	8.7	259.7	94.21	94.81	Mal	Bien
Sistema Fv-Capacitor y Filtro de tensión-corriente	12.5	374.3	-76.52	-74.56	Regular	Regular

Elaboración propia

CONCLUSIONES

De acuerdo con el análisis desarrollado en la simulación del sistema eléctrico integrando el control de calidad de energía con la automatización de los equipos, respecto a la simulación y siguiendo el flujo de carga para cada caso, se han generado las siguientes observaciones:

1. Cuando sólo funcionaba el banco de capacitores, el factor de potencia mejoró hasta el 93,42%. Esta mejora del factor de potencia también permitió controlar las características de las fluctuaciones de corriente.
2. Cuando funcionan ambos sistemas de control, el sistema fotovoltaico junto con el filtro de tensión y corriente mejora el factor de potencia hasta el 94,21%, reduciendo las fluctuaciones de tensión y corriente, lo que da lugar a una forma de onda más estable en el bus 4.
3. Una de las aportaciones significativas del análisis reside en la interacción del esquema de control. Una mejora importante, en comparación con otras contribuciones de investigación, se consigue energizando los sistemas de control de tensión y filtro de corriente simultáneamente con el sistema fotovoltaico. Este enfoque integrado conduce a resultados notables, como una corriente de 8,7 A y un factor de potencia del 94,21% en el lado de alta del transformador T1 y una corriente de 259,7 A y un factor de potencia del 94,81% en el bus La formación de la forma de onda final es regular, lo que indica que este esquema operativo es una de las contribuciones más eficaces al control del sistema.

Una vez desarrollada la automatización de los dispositivos de control, se observa que la interacción de los sistemas de control produce mejoras en las perturbaciones del sistema de potencia, incluyendo las siguientes:

1. Las variaciones de corriente fuera del rango especificado en el sistema tienen un impacto significativo en las perturbaciones del sistema eléctrico.

2. Las variaciones constantes de tensión en los valores pueden provocar importantes perturbaciones y fallos en el sistema.
3. Los niveles de factor de potencia pueden estar por debajo de los límites permitidos debido a una insuficiente compensación de potencia en el funcionamiento de los equipos.
4. La integración de sistemas fotovoltaicos con inversores introduce armónicos en el sistema eléctrico.

Una conclusión importante es el método de estudio de la investigación ya que es una herramienta muy valiosa y su fortaleza radica en que a través del mismo se mide y registra el comportamiento de los sistemas eléctricos en la empresa de acuerdo con el fenómeno estudiado y son obtenidos de una variedad de fuentes de información importantes, la metodología como se ha descrito en el presente documento se enfoca en proporcionar las herramientas y pasos a seguir para el desarrollo del estudio sistemático de la calidad de la energía en una empresa que se encuentra integrada en la tarifa Gran Demanda Media Tensión Horaria (GDMTH) junto con los estudios realizados en campo con los instrumentos de medición, toma de lectura de equipos eléctricos, sistemas de trabajo de la planta, desarrollo del diagrama unifilar. La propuesta importante del diseño del sistema de control aunado con la metodología es desarrollada en base al software de simulación con el fin de obtener resultados mediante los elementos de regulación y conocer las áreas de oportunidad en las perturbaciones del sistema como el factor de potencia, fluctuaciones del voltaje y corriente, integrándose al diseño, sistemas fotovoltaicos para seleccionar la mejor opción con el fin de mejorar la calidad de la energía.

RECOMENDACIONES

La innovación desarrollada en esta investigación es que, a través de la simulación de sistemas eléctricos que integran sistemas fotovoltaicos a la red, así como la automatización de los elementos de control, se puede realizar las condiciones de operación de la calidad de la energía para identificar áreas de oportunidad de mejora en el sistema eléctrico e implementar acciones correctivas. Mediante la identificación de acciones de mejora, se puede reducir los costes de consumo de energía, así como optimizar el funcionamiento de los equipos y mejorar el mantenimiento. El análisis de la bibliografía se centró en otros temas de mejora, como la optimización interna de los filtros de tensión y corriente, la mejora de los inversores conectados a la red de los sistemas fotovoltaicos y la supervisión en tiempo real del sistema.

Se recomienda para trabajos futuros, realizar el análisis de control para generar e iniciar investigaciones con el desarrollo en la automatización de los sistemas de control eléctrico en tarifas de Gran Demanda Media Tensión Horaria (GDMTH) y generar nuevas metodologías para analizar la optimización en el consumo de energía eléctrica y mejorar las condiciones de funcionamiento de los equipos monitoreando en todo momento la calidad de la energía.

Las empresas que estén integradas en las tarifas de Gran Demanda media tensión Horaria se recomienda implementar un sistema de control que integre elementos de regulación de acuerdo con las necesidades de funcionamiento de los equipos para mejorar las perturbaciones generadas en el sistema eléctrico realizando previamente estudios con un analizador de redes para comprender las características de variaciones del sistema, pudiéndose someter al análisis de flujos de carga el equipo eléctrico, ya que el diseño propuesto en su arquitectura y estructura es única y confiable.

APORTACIÓN DE LA TESIS

La principal aportación de esta tesis, es la metodología en la automatización de los sistemas eléctricos basada en la mejora de la calidad de la energía para poder predecir la generación de las perturbaciones de tensión-corriente, factor de potencia y la contribución de las energías renovables como los sistemas fotovoltaicos sustentado en sistemas de simulación considerando todas las variables respecto a la mejora de los límites permitidos en las perturbaciones de la energía eléctrica. En la empresa MACEP aceros ha considerado que estos estudios realizados con las condiciones reales analiza un panorama más amplio en la aplicación de las nuevas tecnologías con el fin de optimizar el uso eficiente de la energía eléctrica al momento de desarrollar las actividades de mantenimientos correctivos y preventivos así como el uso de fuentes alternas de energía mejorando la calidad en el funcionamiento de los equipos y la importancia de reducir el costo en el consumo de la energía eléctrica.

APORTACIÓN SOCIAL DE LA TESIS

Con la metodología propuesta en este trabajo de tesis, se proporcionará una nueva herramienta de control para analizadores y proyectistas de los sistemas eléctricos en tarifas de Gran demanda Media Tensión Horaria, que se desarrollen en la industria y en empresas integradas en la misma tarifa generando sistemas innovadores haciendo técnicamente los sistemas más precisos y económicamente rentables.

REFERENCIAS

- Ali, T., Malik, S., Daraz, A., Adeel, M., Aslam, S., & Herodotou, H. (2023). Load frequency control and automatic voltage regulation in four-area interconnected power systems using a gradient-based optimizer. *Energies*, 16(5), 2086. doi:<https://doi.org/10.3390/en16052086>
- Alvarado Perusquía, H., & Ramírez Sánchez, J. (2010). *Metodología para el análisis de propagación y filtrado de armónicos en sistemas eléctricos [Tesis para obtener el grado de Ingeniero Electricista]*. México D.F.: Instituto Politécnico Nacional. Obtenido de <https://tesis.ipn.mx/jspui/handle/123456789/6514>
- Amaya Vásquez, L., & Inga Ortega, E. (2022). Localización de distorsiones armónicas en sistemas eléctricos usando sensado comprimido. *Ingeniería y Competitividad*, 24(1), 2-15. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/2913/291371829032/html/>
- Ángel Silva, M. Á., & Ordoñez Plata, G. (2005). Calidad de la energía eléctrica: diseño y construcción de un prototipo como alternativa para la monitorización de interrupciones y caídas de tensión. *UIS Ingenierías*, 4(2), 75-83. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=553756895005>
- Arellano Martínez, A., Mireles Huerta, D., & Samayoa Castillo, R. D. (2012). *Mejora de la confiabilidad en el edificio Valdés Vallejo de la UNAM [Tesis para obtener el grado de Ingeniero Eléctrico - Electrónico]*. México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México. Obtenido de <https://ru.dgb.unam.mx/handle/20.500.14330/TES01000671448>
- Argüello Avilés, D. A. (2012). *Diseño de un sistema integral para la aplicación de los precios de transferencia en empresas importadoras de materia prima para la elaboración de materiales en acero [Tesis para obtener el grado de Ingeniero Comercial]*. Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/4067>
- Asociación Española de Normalización y Certificación. (2007). *Uso y referencia a normas ISO e IEC en la reglamentación técnica*. Madrid, España: AENOR. Obtenido de https://www.une.org/normalizacion_documentos/referencia_normas_iso_iec_reg_tecnica.pdf

- Astudillo Mora, L., Vásquez Vega, A., & Rojas Serrano, J. (2016). Implementación de un filtro pasivo para compensación armónica y corrección del factor de potencia. *Científica*, 20(1), 3-11. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/614/61447568001/>
- Atienza Riera, J. M. (2001). *Tensiones residuales en alambres de acero trefilados [Tesis para obtener el grado de Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos]*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. doi:<https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.139>
- Beltrán Tellas, A., López Monteagudo, F. E., Beltrán González, C. A., Reta Hernández, M., & Morera Hernández, M. (2020). Análisis de calidad de la energía de inversor de puentes H y control SPWM. *Ingeniería Energética*, 41(1), 2-11. Obtenido de <https://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE/article/view/578>
- Berenguer Ungaro, M. R., Hernández Rodríguez, N. R., Conde García, R. E., Arias Gilart, R., & Deás Yero, D. (2018). Gestión de la calidad de la energía eléctrica. *Ingeniería Energética*, XXXIX(1), 62-68. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/3291/329158888009/>
- Borges Vasconcellos, D., Pérez Abril, I., & León Martínez, V. (2012). Modelación de los efectos de la compensación de potencia reactiva en sistemas de suministro eléctrico. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 20(2), 160-169. doi:[doi:https://doi.org/10.4067/S0718-33052012000200003](https://doi.org/10.4067/S0718-33052012000200003)
- Cabrera Escobar, J., & Cabrera Escobar, R. (2018). Determinación de la velocidad óptima para la soldadura MIG de la aleación 5086-H116, mediante ensayo de dureza, prueba de tracción y examen metalográfico para la fabricación de tanqueros de aluminio. *Enfoque UTE*, 9(3), 42-49. doi:<https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v9n3.215>
- CADe-Simu. (5 de septiembre de 2020). CADe-Simu.com. Sarasota, Florida, Estados Unidos. Obtenido de CADe-Simu.com: <https://cade-simu.com/>
- Calsider. (2008). *Calidad siderúrgica*. Obtenido de Calidad siderúrgica: <http://www.calsider.es/>
- Carreño Perez, J., & Espinel Ortega, Á. (2020). Identificación de activos y ciberactivos críticos en sistemas de transmisión de energía eléctrica. *Tecnura*, 24(65), 27-38. doi:<https://doi.org/10.14483/22487638.15388>

- Cervantes de la Rosa, J. P., Gutiérrez Flores, A., Domínguez Ramírez, M. Á., & Muñoz Mata, J. L. (2022). Análisis energético y propuesta de ahorro de energía en la empresa ISGO Puebla. *Revista Electrónica sobre Tencología, Educación y Sociedad*, 9(17), 1-15. Obtenido de <https://www.ctes.org.mx/index.php/ctes/article/view/776>
- Chahine, K., Tarnini, M., Moubayed, N., & El Ghaly, A. (2023). Power quality enhancement of grid-connected renewable systems using a matrix-pencil-based active power filter. *Sustainability*, 15(1), 887. doi:<https://doi.org/10.3390/su15010887>
- Chaj Ramírez, E. E. (2008). *Análisis de sobretensiones debido a transitorios por maniobras en sistemas eléctricos de potencia mayores a 300 KV [Tesis para obtener el grado de Ingeniero Electricista]*. Universidad de San Carlos de Guatemala. Obtenido de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0667_EA.pdf
- Cidrás, J., & Carrillo, C. (s. f.). *El fenómeno del parpadeo*. España: Universidad de Vigo. Grupo de Investigación de Energía Eléctrica. Obtenido de https://grupo_ene.webs.uvigo.es/wordpress/publicaciones/Apuntes_Flicker_prot.pdf
- Colino Martínez, A., & Caro, R. (2010). Fuentes energéticas. En *La nueva geopolítica de la energía (Serie Monografías del CESEDEN)* (Vol. 114, págs. 21-34). Madrid: España. Ministerio de Defensa. Instituto Español de Estudios Estratégicos. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4548648>
- CONERMEX. (2022). *Catálogo de productos 2022*. Obtenido de CONERMEX Soluciones de energía renovable: <https://www.conermex.com.mx/catalogo-conermex-2022.pdf>
- Cosco Grimaney, J. (2011). *Controles eléctricos y automatización: controladores*. Perú: Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Química y Textil. Obtenido de <https://www.academia.edu/download/38004023/1354723923.2-controladores.pdf>
- Crismatt Campillo, Y. M., & Barón Martínez, E. M. (2010). *Análisis de la calidad de*

- energía y diseño del banco de condensadores para la corrección del factor de potencia en la subestación de la Universidad Tecnológica de Bolívar sede Ternera [Tesis para obtener el grado de Ingeniero Electricista].* Cartagena de Indias, Colombia: Universidad Tecnológica de Bolívar. Obtenido de <https://repositorio.utb.edu.co/handle/20.500.12585/435>
- Das, C. K., Bass, O., Kothapalli, G., Mahmoud, T. S., & Habibi, D. (2018). Overview of energy storage systems in distribution networks: Placement, sizing, operation, and power quality. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 1205-1230. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.068>
- Daza Urrego, A., Buriticá Arboleda, C. I., & Garzón Rodríguez, Y. (2015). Estudio experimental de potencias, factor de potencia y energía eléctrica en cargas industriales tomando como referencia la norma IEEE Std 1459-2010. *Tecnura*, 19, 41-54. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=257059815003>
- De Oliveira, V., Vilela Ferreira, D., & Vilela Ferreira, T. (2022). Un estudio sobre la anatomía de las pérdidas en la distribución de la energía eléctrica. *Ingeniería energética*, 14-23,. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=329170676002>
- Delgado Contreras, N. R. (2018). *Programa de desarrollo del sector eléctrico nacional*. México: SENER. Obtenido de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/331770/PRODESEN-2018-2032-definitiva.pdf>
- Erausquin Marsal, A. D. (2019). *Calidad del suministro eléctrico [Tesis para obtener el grado de Ingeniera en Tecnologías Industriales]*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/187513>
- Erazo Ávila, L. A., & Guamán Segarra, J. C. (2022). Análisis de la eficiencia energética en los sistemas de distribución de bajo voltaje por medio de la reducción de armónicos. *Sapienza: International Journal of Interdisciplinary Studies*, 3(6), 154-163. doi:<https://doi.org/10.51798/sijis.v3i6.505>
- Erazo Plasencio, R. O., & Quevedo Moreira, P. D. (2018). *Análisis de calidad de energía y rediseño del sistema eléctrico en la planta industrial corporación*

- de proyectos múltiples multiproyectos S.A. [Tesis para obtener el grado de Ingeniero Eléctrico]. Guayaquil, Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana. Obtenido de <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/16515>
- Etap Operation Technology. (23 de marzo de 2023). *etap.com*. Obtenido de Soluciones de gestión de la energía para diseñar, explotar y automatizar sistemas eléctricos: <https://etap.com/es>
- Fernández Morales, F. H., & Enrique Duarte, J. (2015). Automatismo para el monitoreo y control de un grupo electrógeno con arranque eléctrico. *Entramado*, 11(2), 262-271. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=265443638020>
- FernandezFica. Soluciones en Calidad de Energía. (s. f.). *Perturbaciones de la red eléctrica*. Obtenido de <https://www.fernandezfica.cl/img/articulos/perturbaciones.pdf>
- Fluke . (2012). *Fluke 434-II/435-II/437-II. Analizador trifásico de energía y calidad de la energía: manual de uso*. España: Fluke Corporation. Obtenido de <https://docs.rs-online.com/2119/0900766b815db111.pdf>
- Fronius. (15 de agosto de 2022). *Fronius Tauro Eco*. Obtenido de [fronius.com: https://www.fronius.com/es/latin-america/energia-solar/instaladores-y-socios/datos-tecnicos/todos-los-productos/inversor/fronius-tauro-eco/tauro-eco-50-3-d](https://www.fronius.com/es/latin-america/energia-solar/instaladores-y-socios/datos-tecnicos/todos-los-productos/inversor/fronius-tauro-eco/tauro-eco-50-3-d)
- García Torres, E. M. (2020). Estimated cost of electricity with time horizon for micro grids based on the policy response of demand for real price of energy. *Enfoque UTE*, 11(1), 42-55. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/5722/572262052005/html/>
- Gobierno de México. Comisión Federal de Electricidad. (2009). *Calidad de la energía: características y límites de las perturbaciones de los parámetros de la energía eléctrica*. México: Comisión Federal de Electricidad. Obtenido de <https://lapem.cfe.gob.mx/normas/pdfs/c/10000-70.pdf>
- Gobierno de México. Secretaría de Energía. (2012). *Prospectiva del sector eléctrico 2012-2026*. México: Secretaría de Energía. Obtenido de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/62958/Prospectiva_del_Sector_El_ctrico_2012-2026.pdf

- Gobierno de México. Secretaría de Energía. (2021). 4. Demanda y consumo: 2021-2035. En S. d. México, *Programa de desarrollo del sistema eléctrico* (págs. 35-78). México: SENER. Obtenido de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/649612/PRODESEN_CAP_TULO-4.pdf
- Gobierno de México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, e Instituto Nacional de Ecología y Cambio. (2022). *Inventario nacional de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero 1990-2019*. México: SEMARNAT, INECC. Obtenido de <https://www.gob.mx/inecc/documentos/investigaciones-2018-2013-en-materia-de-mitigacion-del-cambio-climatico>
- Gondoman, F. H., Ahmadi, A., Sharaf, A. M., Siano, P., Pou, J., Hredzak, B., & Angelidis, V. G. (2018). Review of FACTS technologies and applications for power quality in smart grids with renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(pte. 1), 502-514. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.062>
- González G., R., Jiménez G., H. R., & Lagunas M., J. (2003). Sistemas fotovoltaicos conectados a red. *Boletín IIE*, 5 p. Obtenido de <https://ecotec.unam.mx/wp-content/uploads/Sistemas-Fotovoltaicos-conectados-a-la-red.pdf>
- González Sua, G. E., Ordóñez Plata, G., Barrero Pérez, J. G., Duarte Gualdrón, C. A., & Bautista Morantes, A. d. (2009). Medición de las magnitudes de potencia y energía eléctrica bajo las nuevas condiciones de los sistemas eléctricos. *UIS Ingenierías*, 8(1), 9-19. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=553756880002>
- Google Maps. (22 de febrero de s. f.). [*Mapa de MACEP Aceros en Google maps*]. Obtenido de Google maps: <https://www.google.com/maps/place/MACEP+Aceros/@23.07696,-102.717222,15z/data=!4m6!3m5!1s0x8683a73b091e05fb:0xf7d8c0630136e4f0!8m2!3d23.07696!4d-102.717222!16s%2Fg%2F11tgdcztpq?entry=ttu>
- Guevara Gómez, M. L. (2023). *Clasificación de eventos de calidad de energía utilizando redes neuronales convolucionales profundas en el marco de la industria 4.0 [Tesis para optar por el grado de Maestra en Ingeniería*

- Eléctrica*]. Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira. Obtenido de <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/cdb4d345-6e49-479f-8428-0c857128ac2b/content>
- IEEE. (2022). *IEEE Standard for harmonic control in electric power systems (IEEE 519:2022)*. doi:<https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2022.9848440>
- Issouribehere, P. E., Barbero, J. C., & Barrera, G. A. (2009). Estudio comparativo de las diferentes definiciones de voltaje y corriente en los factores de desbalanceo en un sistema trifásicos. *XIII ERIAC. Décimo Tercer Encuentro Regional Iberoamericano de CIGRÉ (24 al 28 de mayo de 2009)*. XIII, págs. 1-8. Puerto Iguazú, Argentina: CIGRÉ. Obtenido de http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/36357/Documento_completo.pdf?sequence=1
- JACOM Strategic Allies. (7 de abril de 2021). JACOM. Obtenido de Bienvenidos a JACOM: <https://jacomgroup.com/>
- Jaramillo Arteaga, D. (2020). *Sistema de entrenamiento de realidad virtual para el monitoreo de indicadores de calidad de la energía en subestación eléctrica [Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias (Mecatrónica)]*. Querétaro, México: Universidad Autónoma de Querétaro. Obtenido de <https://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/2797>
- Jasinski, M., Borkowski, K., Sikorski, T., & Kostvla, P. (2018). Cluster analysis for long-term power quality data in mining electrical power network. *Progress in Applied Electrical Engineering (PAEE)* (págs. 1-5). Koscielisko, Polonia: IEEE. doi:10.1109/PAEE.2018.8441089
- Játiva Ibarra, J., Constante Flores, G., & Cabrera Celi, G. (2014). Flujo de potencia por Newton-Raphson con el jacobiano calculado en las ecuaciones de errores de potencia. *Revista Politécnica*, 33(1), 1-7. Obtenido de https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/157
- Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2008). *Manufactura, ingeniería y tecnología* (5 ed.). México: Pearson Educación.
- Kulikov, A., Ilyushin, P., Loskutov, A., Suslov, K., & Filippov, S. (2022). WSPRT methods for improving power system automation devices in the conditions of

- distributed generation sources operation. *Energies*, 15(22), 8448. doi:<https://doi.org/10.3390/en15228448>
- Loeza Salcedo, F. A., Ramiro Carmona, C., & Tenorio Cesalin, J. C. (2012). *Metodología de un sistema fotovoltaico conectado a red para uso en luminarias del edificio 3 de la ESIME Zacatenco [Tesis para obtener el grado de Ingeniero Electricista]*. México D.F.: Instituto Politécnico Nacional. Obtenido de <https://tesis.ipn.mx/handle/123456789/10766>
- Marcos de Oliveira, F., Santos Mariano, A. C., Salvadori, F., & Ando Junior, O. H. (2022). Power quality and management system applied to a single-phase nanogrid. *Energies*, 15(19), 2-15. doi:<https://doi.org/10.3390/en15197121>
- Marin Ruiz, E. E., & Teodoro Romero, J. L. (2016). *Estudio de la redistribución de las cargas eléctricas del campus de la Universidad Nacional del Santa [Tesis para obtener el grado de de Ingeniero en Energía]*. Perú: Universidad Nacional del Santa. Obtenido de <https://repositorio.uns.edu.pe/handle/20.500.14278/2654>
- Marmolejo Duarte, C., & Chen, A. (2019). The uneven price impact of energy efficiency ratings on housing segments. Implications for public policy and private markets. *Sustainability*, 11(2), 372. doi:<https://doi.org/10.3390/su11020372>
- Medina Álvarez, J. S. (2020). *Perfeccionamiento del modelamiento eléctrico con flujo de potencia, cortocircuito y arco flas, utilizando el software ETAP para una faja transportadora de metales, año 2019 [Tesis para obtener el grado de Ingeniero Electricista]*. Lima, Perú: Universidad Continental. Obtenido de <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/9437>
- Mercado Polo, V., Peña, J. B., & Pacheco, L. (2017). Calidad de la energía bajo la perspectiva de los sistemas de puesta a tierra. *Ciencia e Ingeniería*, 38(2), 1-8. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=507555007009>
- Minitab. (23 de junio de 2020). minitab.com. PA, United States. Obtenido de minitab.com: <https://www.minitab.com/en-us/products/minitab/free-trial/2020>
- Mulenga, E. (2022). Solar PV stochastic hosting capacity assement considering epistemic (E) probability distribution function (PDF). *Electricity*, 3(4), 586-599.

doi:<https://doi.org/10.3390/electricity3040029>

Narula, S., Singh, B., & Bhuvanewari, G. (2016). Improved power-quality-based welding power supply with overcurrent handling capability. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(4), 2850-2859.

doi:<https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2454994>

Nguyen, H. L. (1997). Newton-Raphson method in complex form [power system load flow analysis]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 12(3), 1355-1359.

doi:<https://doi.org/10.1109/59.630481>

Ordóñez Sánchez, D. J., & Resabala Lara, V. F. (2020). *Control eléctrico industrial: análisis, diseño y ejercicios resueltos*. España: Editorial Académica Española.

QuimiNet. (18 de 03 de 2021). *El proceso de estirado en frío para la creación de perfiles estructurales*. Obtenido de QuimiNet: <https://www.quiminet.com/articulos/el-proceso-de-estirado-en-frio-para-la-creacion-de-perfiles-estructurales-2662473.htm>

Ramírez Castaño, S., & Cano Plata, E. A. (2006). *Calidad del servicio de energía eléctrica*. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/8445>

Ramos Ramos, E. D., & Riveros Arcaya, S. E. (2018). *Análisis de la eficiencia energética y calidad de la energía eléctrica en la planta industrial de procesamiento de alimentos agroindustrias CIRNMA S.R.L. en la región Puno [Tesis para obtener el grado de Ingeniero Mecánico Electricista]* (168 p. ed.). Puno, Perú: Universidad Nacional del Altiplano. Obtenido de <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/8910>

Rauch, J., & Brückl, O. (2023). Achieving optimal reactive power compensation in distribution grids by using industrial compensation systems. *Electricity*, 4(1), 78-95. doi:<https://doi.org/10.3390/electricity4010006>

Salazar López, E. A. (2009). *Análisis de disturbios eléctricos en la industria siderúrgica [Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Energética]*. Monterrey, N. L., México: Tecnológico de Monterrey. Obtenido de <http://hdl.handle.net/11285/569373>

Saribulut, L., & Ameen, A. (2023). Voltage sag detection and compensation signal extraction for power quality mitigation devices. *Energies*, 16(16), 1-15.

doi:<https://doi.org/10.3390/en16165999>

- Saucedo Martínez, D. A., Taxis Villagran, J. L., & Flores Carrera, Z. C. (2008). *Factores que afectan la calidad de la energía y su solución [Tesis para obtener el grado de Ingeniero Electricista]*. México, D.F.: Instituto Politécnico Nacional. Obtenido de <https://tesis.ipn.mx/handle/123456789/429>
- Serra, J. (2009). *Guía técnica de eficiencia energética (3 ed.)*. España: Circutor. Obtenido de https://circutor.com/docs/GUIA_EEE_SP-LR.pdf
- Siemens. (2021). *Catálogo de baja tensión, distribución y control*. México: Siemens. Obtenido de <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:1ef1077a-c993-4007-8239-5601972a117b/bajatension.pdf>
- Singh, B., Shahani, D. T., & Kumar Verma, A. (2012). Power balance theory based control of grid interfaced solar photovoltaic power generating system with improved power quality. *2012 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), (december 16-19, 2012)*, (págs. 1-7). Bengaluru, India. doi:<https://doi.org/10.1109/PEDES.2012.6484359>
- Soberanis Garfias, A. (2008). *Diseño y construcción de un analizador de espectros usando una plataforma basada en FPGA [Tesis para obtener el grado de Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica]*. México D.F.: Instituto Politécnico Nacional. Obtenido de <https://tesis.ipn.mx/handle/123456789/456>
- Solaris. (25 de 10 de 2021). *Mapas de recursos solares de Mexico*. Obtenido de Solaris.com: <https://solargis.com/es/maps-and-gis-data/download/mexico>
- Sousa Santos, V., & Gómez Sarduy, J. (2020). Análisis de calidad de la energía y estado de carga en un puesto de seccionamiento y transformación de energía. *IJMSOR International Journal of Management Science & Operations Research*, 4(1), 27-32. Obtenido de <https://repositorio.cuc.edu.co/handle/11323/6565>
- Suárez, J. A., Di Mauro, G. F., Anaut, D., & Agüero, C. (2005). Análisis de la distorsión armónica y los efectos de la atenuación y la diversidad residencial. *IEEE Latin America Transactions*, 3(5), 429-435.
- Sucameli, M., & Adragna, C. (2023). LLC resonant converters as Isolated power

- factor corrector pre-regulators: analysis and performance evaluation. *Energies (Special Issue Advanced DC-DC Power Converters and Switching Converters II)*, 16(20), 1-31. doi:<https://doi.org/10.3390/en16207114>
- Tansinchana Cadena, C. P. (2021). *Propuesta técnica económica para un sistema de generación solar fotovoltaico conectado a red para el Supermercado Mi Rey ubicado en la ciudad de Ibarra [Tesis para obtener el grado de grado de Ingeniero en Mantenimiento Eléctrico]*. Ibarra, Ecuador: Universidad Técnica del Norte. Obtenido de <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/11274>
- Tello Maita, J., & Marulanda Guerra, A. (2017). Optimization models for power systems in the evolution to smart grids: a review. *DYNA*, 84(202), 102-111. Obtenido de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/63354>
- Trejo, M. M. (2013). *Determinación de armónicos en un banco de transformadores conexión trifásica [Tesis para obtener el grado de Ingeniero Electricista]*. México, D.F.: Instituto Politécnico Nacional. Obtenido de <https://tesis.ipn.mx/handle/123456789/12673>
- Valtierra Rodriguez, M., Romero Troncoso, R. d., Osornio Rios, R. A., & Garcia Perez, A. (2014). Detection and classification of single and combined power quality disturbances using neural networks. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(5), 2473-2482. Obtenido de <https://doi.org/10.1109/TIE.2013.2272276>
- Veiga de Cabo, J., De la Fuente Díez , E., & Zimmermann Verdejo, M. (2008). Modelos de estudios en investigación aplicada: conceptos y criterios para el diseño. *Medicina y Seguridad del Trabajo*, 54(210), 81-88. Obtenido de http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0465-546X2008000100011&lng=es&nrm=iso
- Vélez Moreno, L. M. (15 de marzo de 2021). *El acero*. Obtenido de Materiales de Construcción: <http://materialesparaconstruir.blogspot.com/2009/03/el-acero.html>