Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riiit.com.mx

Diseño de un sistema de control para mejorar la calidad de la energía integrando elementos de regulación y un sistema fotovoltaico

Design of a control system to improve power quality by integrating control elements and a photovoltaic system

Murillo-Rodríguez, V.A.[a]*, Villa-Villaseñor, N.[b], Robles-Solís, J.M.[c], Guirette-Barbosa, O.A.[d]

[a] Posgrados CIATEQ A.C. San Agustín del retablo 150, constituyentes Fovissste, Santiago de Qro. 76150, México.
[b] Centro de Tecnología Avanzada CIATEQ A.C. C.P. 78395, San Luis Potosí, S.L.P.
[c] Universidad Politécnica de Zacatecas, Ingeniería Mecatrónica, C.P. 99056 Fresnillo, Zacatecas.
[d] Universidad Politécnica de Zacatecas, Ingeniería en Biotecnología. C.P. 99056 Fresnillo, Zacatecas.
vmurillo@upz.edu.mx*; noe.villa@ciateq.mx; jmrobles@upz.edu.mx; omarguirette@upz.edu.mx

Innovación tecnológica: El control de la calidad de la energía mediante la automatización de los sistemas de regulación.

Área de aplicación industrial: Diseño de un sistema de control y automatización de los elementos de regulación integrando sistemas fotovoltaicos en el sistema eléctrico para mejorar la calidad de la energía en la empresa.

Recibido: 26 diciembre 2022
Aceptado: 18 diciembre 2023

Abstract

This document examines the characteristics of the electrical variations in equipment within a company and their impact on the operation of manufacturing systems for steel mesh and armex. The rapid growth in the integration of new consumers to the electricity sector, particularly in the industrial sector, has called for better control over electricity supply and operational conditions of users to ensure adequate service quality. Unregulated disturbances in the electrical grid can result in failures, malfunctions and significant interruptions, leading to considerable expenses and economic losses. This research proposes a new solution through the automation of regulation elements to maintain optimal system quality, prevent damages and failures in equipment, while offering a cost-effective model. The proposed solution is

implemented by means of a control sequence, with respect to the operation needs of the plant´s equipment and is also evaluated by a reliable simulation in the *Etap software* [26] (*Model, analysis and optimization of energy systems*), which emulates the interaction of regulation elements and simulates the design of electric flow equipment operation. The results demonstrate improved system performance in the presence of disturbances when the automation schemes are implemented: i) Operating the capacitor bank alone, improves total current fluctuations of the system, as well as the power factor, from 85.83% to 93.42%. This scheme also enhances the waveform in the main power system. Ii) By operating the voltage and current filter simultaneously with the photovoltaic system the current fluctuations, power factor (from 85.83% to 94.81%), and waveform quality in the main power system are further improved.

Keywords: Power Quality, Capacitor Bank, Voltage and Current Filter, Photovoltaic System.

Resumen

Este documento examina las características de las variaciones eléctricas en los equipos de la compañía MACEP y su impacto en el funcionamiento de los sistemas de fabricación de mallas y armex de acero. El rápido crecimiento de la integración de nuevos consumidores al sector eléctrico, particularmente en el sector industrial, ha exigido un mejor control del suministro de electricidad y de las condiciones operativas de los usuarios para garantizar una calidad de servicio adecuada. Las perturbaciones no reguladas en la red eléctrica pueden dar lugar a fallos, averías e interrupciones significativas, lo que ocasiona gastos considerables y pérdidas económicas. Esta investigación propone un esquema de control mediante la automatización de los elementos de regulación del sistema eléctrico para mantener los parámetros en condiciones para una calidad óptima del sistema. La propuesta de solución se realiza mediante una secuencia de control, respecto a las necesidades de funcionamiento de los equipos de la planta, así mismo se evalúa mediante una simulación fiable en el software Etap [26] (Model, analysis and optimization of energy systems), 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 los esquemas de automatización. i) El funcionamiento exclusivo del banco de condensadores, mejora las fluctuaciones totales de corriente del sistema, así como el factor de potencia, del 85,83% al 93,42%. Este esquema también mejora la forma de onda en el sistema eléctrico principal. ii) El funcionamiento simultáneo del filtro de tensión y corriente junto con la instalación fotovoltaica mejora aún más las fluctuaciones de corriente, el factor de potencia del 85,83% al 94,81% y la calidad de la forma de onda en la red eléctrica principal.

Palabras Clave: Calidad de la Energía, Banco de Capacitores, Filtro de Voltaje y Corriente, Sistema Fotovoltaico.

1.- Introducción

En la actualidad la calidad del servicio de energía eléctrica tiene cada vez más trascendencia, debido al incremento de los equipos que son sensibles a las perturbaciones de las ondas de tensión y corriente; por lo cual, los usuarios o clientes que se ven afectados reclaman una adecuada

calidad en el servicio [1,2]. El escenario actual del sistema de distribución (SD) se encuentra en un proceso de transformación y adaptación debido al aumento significativo de cargas no lineales conectadas a la red eléctrica en todos los niveles de tensión, que a su vez comprometen la calidad de la energía eléctrica (CPE) de todo el sistema. Como, por ejemplo, cargas no lineales, podemos enumerar inversores en red, convertidores para controladores de máquinas, rectificadores controlados y no controlados, fuentes convencionales, entre otros [2-4].

La recopilación inadecuada de datos de voltaje y corriente también puede afectar las mediciones, por ejemplo, cuando la potencia trifásica se mide usando una conexión de dos componentes (llamada conexión Arón utilizada para determinar la potencia activa en sistemas trifásicos) [44-45] aunque esta conexión es adecuada para la evaluación de potencia activa midiendo la potencia reactiva y la potencia aparente, puede tener mayor incertidumbre que la especificada en la categoría de equipo [3-4].

Las corrientes armónicas se originan a partir de cargas no lineales que se propagan en las líneas de transmisión y distribución, lo que afecta el índice de calidad de la energía [12]. Además de los problemas de calentamiento en líneas de distribución y transformadores, puede ser peligroso para ciertos equipos y cargas sensibles (como dispositivos de protección, bancos de capacitores, motores, computadoras, etc.) [4]. El desequilibrio de variables trifásicas se refiere a la situación en la que las tres fases tienen diferencias en módulos y/o desplazamientos angulares entre fases que exceden los 120° de fase eléctrica [34]. Las variables trifásicas generalmente pueden ser: tensión fase-neutro, tensión de línea o corriente en un sistema trifásico [39-40]. La forma correcta de calcular el grado de desequilibrio de una variable trifásica es utilizar el componente de secuencia de la variable, por lo que se requiere la medición del módulo trifásico y la fase de la variable [5-7].

El suministro eficiente de electricidad a un coste asequible favorece la competitividad y la capacidad [60] de las empresas y la industria para ofrecer más y mejores productos y servicios en el mercado, el suministro eficiente de electricidad se relaciona directamente con el crecimiento económico [14]. Es decir, esos productos de mayor calidad pueden ofrecerse a su vez a menor precio, lo que redunda en una mejora de la competitividad de las empresas e industrias [8,9].

Los tipos de potencia eléctrica y el 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) [22-23] 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 [7-10]. El aumento de la generación de electricidad a partir de recursos renovables será superior al aumento de la demanda de electricidad entre 2022 y 2050 debido a la motivación para descarbonizar la red eléctrica [36-38]. La dependencia de la generación de electricidad a partir de gas natural y petróleo durante las horas punta se reducirá gracias al despliegue de capacidad de almacenamiento en baterías [17,18]. Las nuevas capacidades vendrán principalmente de la energía solar y eólica, a medida que se retiren las tecnologías nucleares y del carbón [38-40]. La generación de electricidad a partir de tecnologías solares fotovoltaicas *in situ* en los sectores residencial, industrial y comercial representará el 8% de la

electricidad total generada en 2050 [30], el doble que en 2021 [35], lo que indica una expansión significativa de las tecnologías solares fotovoltaicas [8,9]. Actualmente 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 competencia que existe en las empresas, ya que existe una relación proporcional entre productividad, eficiencia y calidad de energía [25,26].

Para la mejora de la productividad dentro de las empresas de acuerdo con el funcionamiento de los equipos se consideran varias características de impacto, tales como: la búsqueda e instalación de equipos que posean alta eficiencia, como motores modernos y sofisticados, bombas, etc. [14-16]. La necesidad de automatizar procesos con el uso de PLC's y dispositivos electrónicos; evitar pérdidas eléctricas debida a falsos contactos, mala selección de los equipos; así como reducir los costos de sistemas sobredimensionados y analizar el costo de las tarifas. Disminuir el desgaste de los equipos mediante un óptimo mantenimiento [29, 30].

Dos de las principales normas competentes hacen referencia al tema, la International Electrotechnical Commission (IEC) da la definición al término "Calidad de la Energía Eléctrica", como las características de la electricidad en un punto determinado de la red eléctrica, evaluadas en relación a un conjunto de parámetros IEC 61000-4-30 Internacional [9-11]. Los parámetros medibles dentro de la misma son: Frecuencia, Magnitud, *Flicker*, Armónicos, Fluctuaciones de tensión, Interrupciones, Desequilibrios [20,21]. Por otro lado, IEEE define el término "calidad de energía" como diversos fenómenos electromagnéticos en puntos específicos de la red [31-33]. Los parámetros medibles IEEE 1159/1995 incluyen: cambios en los valores rms de corriente y voltaje, perturbaciones transitorias y formas de onda perfectas [9-11].

2.- Materiales y Equipos

La metodología empleada, para el desarrollo de la presente investigación es del método cuantitativo, ya que se desarrollan técnicas de estudio en cada etapa del proceso del sistema de manufactura, tomando en cuenta el comportamiento en el funcionamiento de los equipos llevando a cabo los siguientes análisis:

- Se hace uso de los valores numéricos mediante los métodos de medición para observar su comportamiento.
- Fundamentar los fenómenos y la interpretación de los datos.
- Se enfoca en los procesos de la manufactura de la empresa ya que, de acuerdo con el esquema de trabajo en la fabricación de mallas, armex, varillas, etc.
- Interfiriendo directamente en los datos arrojados derivados de los esquemas de medición con el fin de conocer si los parámetros analizados se encuentran dentro de la normatividad y esquema de trabajo establecidos.
- Implementar esquemas de solución relacionando las características en común con el fin de establecer mejoras en las áreas de oportunidad.

La metodología de la presente investigación hace uso de diferentes mecanismos para llevar a cabo diferentes aspectos generales como: la observación, el experimento, la implementación y el análisis de los resultados.

2.1 El sistema eléctrico y sus características generales

El sistema eléctrico comprende el conjunto de medios y elementos útiles para la generación,

transporte y distribución de energía eléctrica [52], integrados por mecanismos de control, seguridad y protección. Las características del sistema eléctrico en la empresa estudiada en este trabajo incluyen dos transformadores en la subestación principal, uno de tipo poste de 150 kVA, tensiones de 13,200 Vac/220 Vac, otro transformador de tipo pedestal de 500 kVA, manejando tensiones de 13,200 Vac/440 Vac. Por lo tanto, el monitoreo y análisis [53] del comportamiento de la calidad de energía se realiza en la subestación principal de 500 kVA en el lado de alimentación a una tensión de 13,200Vac y en el lado de baja alimentación a una tensión de 440 Vac (Ver Figura 1). Se analiza el comportamiento tanto en el lado de alta como en el lado de baja del transformador principal para analizar las perturbaciones que se presentan tanto en las fluctuaciones de tensión-corriente como las variaciones del factor de potencia ya que puede afectar las condiciones en la acometida de CFE.

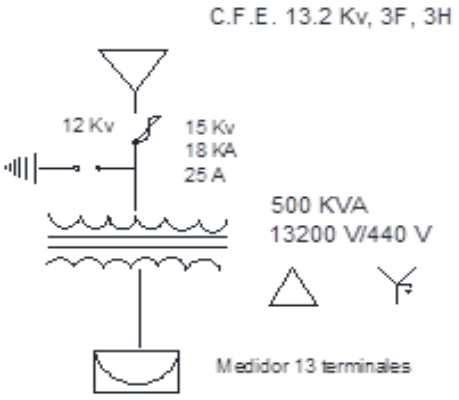


Figura 1. Subestación principal con transformador de 500 kVA.
Fuente: Elaboración propia.

Como primer paso se procedió a realizar el análisis en el centro de carga general en donde se encuentran conectados todas las máquinas de la empresa, con dispositivos de medición con el analizador de redes *Fluke* 434-II, se analizaron las diferentes líneas o fases que integra el sistema, se procedió a identificar el neutro y tierra de tierra, finalmente se analizó los diferentes dispositivos o maquinaria conectada a los centros de carga. Cabe mencionar que dentro de la empresa se manejan 2 diferentes voltajes con el suministro diferente respecto a cada transformador, el sistema trifásico a 4 hilos con un voltaje de 220 Vac, y en otro transformador en acometida diferente con un voltaje 440 Vac, trifásico a 4 hilos los cuales se alimentan de dos diferentes subestaciones para cada uno, se conecta el analizador de redes en el centro de carga más adecuado para cada uno de los casos para realizar las mediciones necesarias.

La empresa MACEP se integra dentro del análisis de la Tarifa en Gran Demanda Media Tensión Horaria (GDMTH) [54] es una de las 12 tarifas establecidas por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) [55] y en su caso específico, utilizada para el sector industrial mexicano ya que es aplicada a servicios cuya demanda es igual o superior a los 100 kilowatt (kW). Este tipo de tarifa tiene la particularidad de gestionar diferentes costos de kWh ya que el precio dependerá de los horarios en que es consumida la energía, la tarifa se aplicará a los servicios que asignen energía a cualquier uso, suministrada en media tensión como se describe:

De lunes a viernes

Nivel Base: 0:00 a 6:00
Nivel Intermedio: 6:00 a 20:00 y 22:00 a 0:00 o 24:00
Nivel Punta: 20:00 a 22:00

Sábados

Nivel Base: 0:00-8:00
Nivel Intermedio: 8:00-19:00 y 21:00 a 0:00 o 24:00
Nivel Punta: 18:00- 21:00

Domingos y días festivos

Nivel Base: 0:00-18:00
Nivel Intermedio: 18:00 – 0:00 o 24:00

Debido a este esquema, el recibo de luz emitido por la CFE reflejará 3 montos diferentes que dependerán del consumo bimestral de acuerdo a los horarios.

El análisis del consumo de energía se ha realizado tomando la lectura en cada uno de los meses en el lapso de un año llegando a incrementar su consumo hasta un máximo de 35,371 kWh y un consumo mínimo de 4,825 kWh (Ver Figura 2), así mismo se realizó la medición del factor de potencia como su definición lo menciona el factor de potencia es una medida de la eficiencia o rendimiento de nuestro sistema eléctrico. Este indicador mide el aprovechamiento de la energía (la cantidad requerida para transformar en trabajo). Como bien sabemos, los receptores eléctricos convierten la energía eléctrica en algún otro tipo de energía como la mecánica, luminosa, calorífica, etc. El detalle es que estos receptores no logran transformar toda la energía demandada en energía útil. A la energía demandada por nuestra maquinaria se le conoce como "energía absorbida" o "potencia aparente", siendo la que nuestro sistema requiere para realizar la acción deseada. De la potencia aparente, a la energía que realmente se convierte en energía útil para el proceso se le conoce como "energía útil" o "potencia activa". Pero, dentro del proceso de conversión de energía, hay una cantidad que no se convierte en energía útil, si no que se pierde dentro del proceso al generar campos magnéticos para la producción de energía útil, a esta energía se le llama "potencia perdida" o "potencia reactiva". El factor de potencia es la relación existente entre la potencia aparente y la potencia activa, tratando siempre de que la potencia activa se acerque lo más posible a la potencia aparente. Es decir: a mayor potencia activa y menor potencia reactiva, tendremos un factor de potencia más cercano a 1 (el ideal), Las consecuencias de operar con un bajo factor de potencia (hay que mantenerlo en un mínimo de 0.95) pueden afectar la producción y la eficiencia del sistema de forma considerable, sin mencionar que pueden llegar a ser muy costosas.

Sobrecalentamiento de los conductores
Sobrecarga en líneas de distribución
Reducción de vida útil en los equipos
Caídas de tensión
Aumento en la factura de consumo eléctrico

Esta última sucede ya que tener un bajo factor de potencia produce defectos en la generación y distribución de la energía eléctrica. De acuerdo a los conceptos de potencia aparente, potencia activa y potencia reactiva, un bajo factor de potencia bajo significa que existe una gran cantidad de potencia reactiva, lo que hace que la potencia activa sea menor a la que requiere el sistema. Por lo que dentro de las mediciones en la empresa se ha obteniendo un promedio de 85.83%, lo cual indica, que se encuentra por debajo del nivel permitido, según lo establecido por la Comisión Federal de Electricidad (CFE L0000-70), [13] para contribuir a la mejora de la calidad de la energía [56].

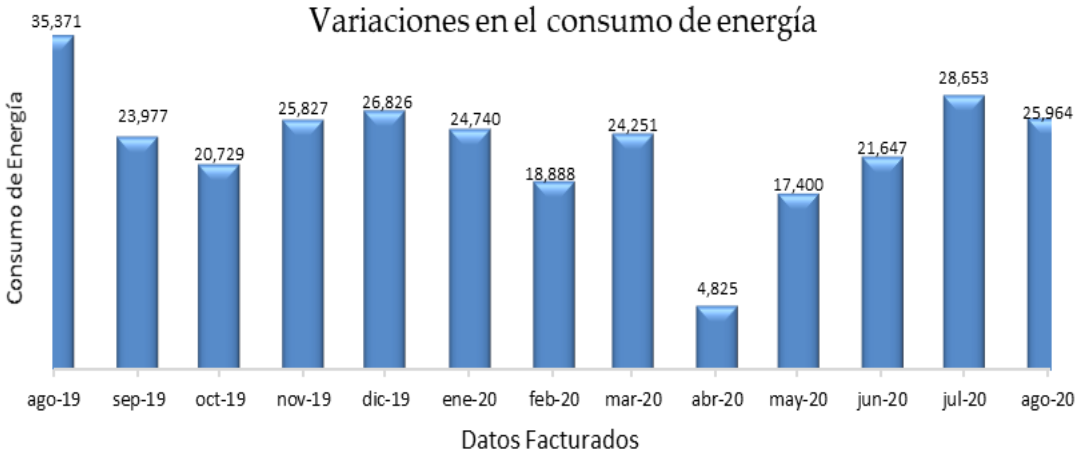


Figura 2. Consumo de electricidad en la empresa.
Fuente: Elaboración propia.

2.2 Conexión del sistema eléctrico a un analizador de redes.

Se procedió a conectar el analizador de redes *Fluke* 434-II [42], como descripción el analizador de redes eléctricas, también denominados registradores de red, en una herramienta indispensable como soporte. Se muestran los siguientes análisis:

Estudios de carga – permite verificar la capacidad de la red eléctrico antes de agregar nuevas cargas, o bien, para ajustar la potencia de su suministro. Posibilita también conocer el factor de utilización de un equipo o subsistema.

Evaluaciones de energía – posibilita conocer el consumo de energía antes y después de realizar mejoras en su instalación, para medir y verificar el ahorro de energía obtenido.

Mediciones de armónicas – permite descubrir problemas con las armónicas que pueden causar daños o perturbar a equipos críticos.

Captura de sucesos de voltaje – monitorice la existencia de huecos de voltaje y sobretensiones que causan restablecimientos espurios o activación inexplicada de disyuntores [51].

Por lo que se ha conectado en el tablero de alimentación principal de voltaje a 440 Vac, como se muestra en la Figura 3, previamente ya se configuró con las diferentes características eléctricas de la empresa, el analizador de redes cuenta con conectores tipo gancho o sondas amperimétricas y conectores tipo cocodrilo, para realizar las conexiones, primero se tuvo que retirar la carcasa del centro de carga, posteriormente se realizó la conexión del analizador de redes de la siguiente manera: primero se realizó la conexión a tierra, ya que una correcta conexión del sistema de tierras es importante para:

El personal: para cualquier persona que puede ponerse en contacto con altas tensiones debido a un fallo eléctrico.

El equipo: garantiza que todo el equipo esté protegido en caso de fallo.

Control de ruido: ayuda a eliminar los

transitorios, que pueden causar problemas desde la ruptura del aislante hasta fallas en el equipo.

Posteriormente se conectaron las pinzas de tensión con sus colores y líneas como se muestra en la Figura 3, se conectaron las sondas amperimétricas respetando el código de colores en cada una de las líneas, se registraron los datos a través de la opción de monitoreo en el analizador de redes [57].



Figura 3. Conexión del analizador de redes en el tablero principal.
Fuente: Elaboración propia.

El análisis de la corriente en el tablero principal de potencia a 440 Vac en el cual se han presentado fluctuaciones de corriente en las tres fases que van desde 105 A como máximo y como mínimo 8 A, como se muestra en la Figura 4, este análisis se ha registrado en un periodo 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 se deben mantener en condiciones en valores óptimos para no presentar mayores perturbaciones en el sistema eléctrico de la planta.

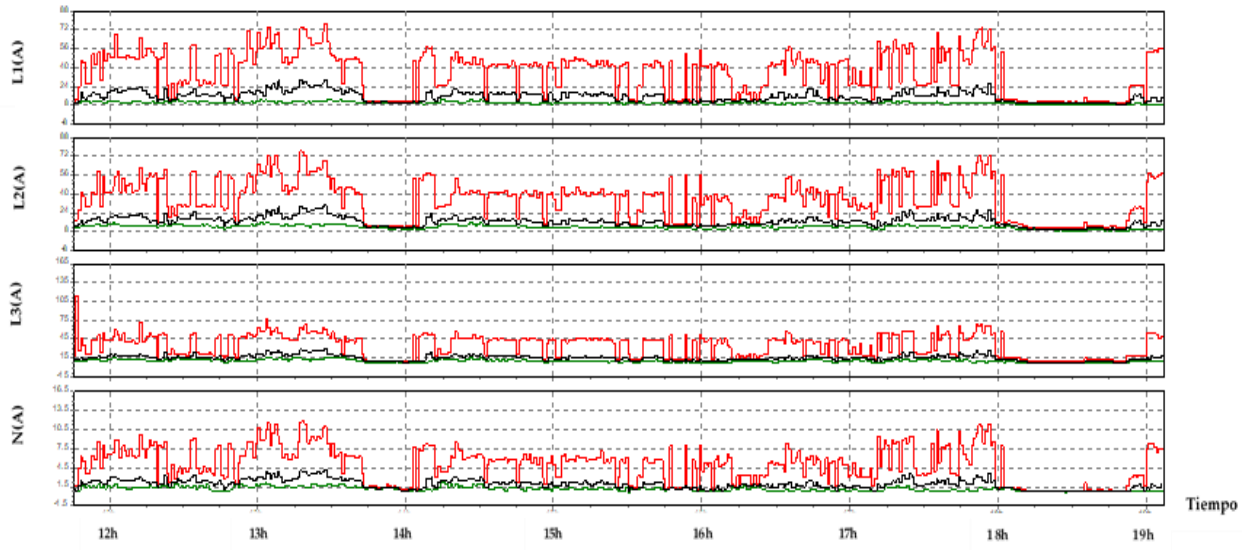


Figura 4. Análisis de la corriente en el panel general.
Fuente: Elaboración Propia.

Las fluctuaciones de corriente se presentan debido al trabajo de los equipos de mayor potencia que son las seis trefiladoras con una potencia de 25 HP hasta los 30 HP los cuales funcionan de manera simultánea en periodos largos de tempo.

2.3 Análisis Estadístico del Sistema Eléctrico

Para encontrar el desempeño óptimo de acuerdo con las fluctuaciones de corriente mostradas en el sistema eléctrico y obtener una referencia en el comportamiento de la calidad de la energía, las fluctuaciones de corrientes debido a cambios en las potencias (real, aparente y reactiva) que causan fluctuaciones [3], se desarrolló un estudio estadístico para determinar el comportamiento de los valores de la corriente.

Para efectos de este estudio se consideraron las variables de los datos de [58] Potencia Real (kW), Potencia Aparente (kVA) y Potencia Reactiva (kVAr) tomando en cuenta los valores de corriente en un tiempo de 5 meses, analizando las variaciones a través del tiempo, esto para cada una de las potencias mencionadas, de acuerdo con las fluctuaciones de corriente, se puede observar (Figura 5) una desviación estándar de 26,76 A de los valores de corriente promedio así mismo la distribución de los datos muestran una función asimétrica de los valores teniendo una tendencia de alejarse de cero lo que indica que presenta una anormalidad de la corriente presentándose fluctuaciones fuera de lo esperado. Los histogramas muestran la forma de sus datos. El eje horizontal muestra sus valores de datos, con cada barra correspondiendo a un rango de valores. El eje vertical muestra cuántos puntos de datos tienen valores en el rango de cada barra. En el histograma de la figura 1, las barras muestran el conteo de cada rango. Por ejemplo, la primera barra corresponde al conteo de valores que están entre 30 y 35.

El histograma revela que el centro de los datos cae cerca del 4% (valores de corriente y que la extensión de los mismos va de unos -8 a 6. También revela que la forma de los datos tiene una discontinuidad muy marcada. Esta forma es una forma visual de que probablemente los datos tengan una distribución anormal.

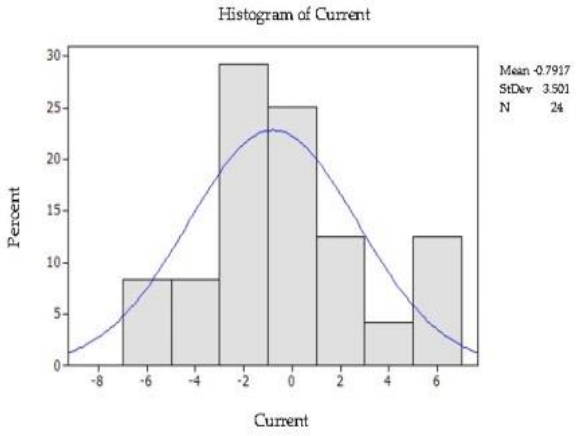


Figura 5. Histograma del comportamiento actual.
Fuente: Elaboración propia.

El comportamiento de las variaciones residuales en las fluctuaciones de la corriente se puede observar en el gráfico (Figura 6) variaciones importantes con respecto al promedio, lo que indica que la respuesta de la corriente genera tendencias muy marcadas, variando las condiciones de corriente normales. Al utilizar la gráfica de residuos vs orden para verificar el supuesto de que los residuos son independientes entre sí como la tendencia de las variaciones de corriente. Los residuos independientes no muestran tendencias ni patrones cuando se muestran en orden cronológico como los son las diferentes potencias (Real, Activa y Reactiva). Los patrones en los puntos podrían indicar que los residuos que están cercanos entre sí podrían estar correlacionados y, por lo tanto, podrían no ser independientes por lo que se puede observar que no hay una correlación y una tendencia de controlar la corriente generando

muchas fluctuaciones. Lo ideal es que los residuos que se muestran en la gráfica se ubiquen aleatoriamente alrededor de la línea central.

De acuerdo con los datos establecidos en la tabla, se realizó el análisis de varianza [59] (Ver Tabla 1) con el software estadístico Minitab [46]

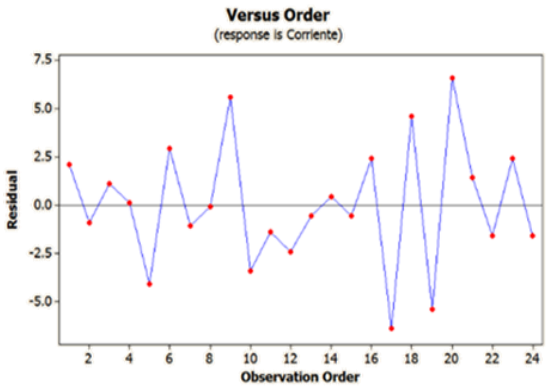


Figura 6. Análisis residual del comportamiento actual.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1. Análisis de la varianza (ANOVA).

Análisis de Varianza de Corriente, usando ajustado SS para prueba						
Fuente	***DF***	***Seg.SS***	***Adj.SS***	***Adj.MS***	***F***	***P***
Potencia Real	*2*	*4.00*	*4.00*	*2.00*	*0.16*	*0.853*
Potencia Reactiva	*1*	*4.17*	*4.17*	*4.17*	*0.33*	*0.571*
Potencia Aparente	*1*	*6.00*	*6.00*	*6.00*	*0.48*	*0.497*
Error	*19*	*237.83*	*237.83*	*12.52*		
Total	*23*	*252.00*				

Fuente: Elaboración Propia.

Según la matriz ANOVA (Análisis de Varianza) es analizar la correlación que existe entre las variables (Potencias real, activa y reactiva) y la fluctuación de corriente en el funcionamiento de los equipos se toma en cuenta la relación que guarda la variable potencia en las mediciones que posiblemente presenten, una variación importante se encuentra entre la potencia real y la potencia aparente ya que existe mucha diferencia entre la correlación no deseada lo que indica que ambas variables se encuentran fuera del control esperado produciendo fluctuaciones de corriente anormales, de igual manera se observa que debido al funcionamiento de los equipos los cuales se encuentra un desequilibrio de trabajo entre la potencia real y la potencia reactiva lo que indica que hay muchos equipos instalados como motores, compresores, etc., los cuales no trabajan de manera continua, así mismo la capacidad del transformador es mayor que la capacidad instalada de los equipos, lo que causa que un desfasamiento de corriente obteniendo fluctuaciones considerables, también causa un bajo factor de potencia.

2.4 Selección de los elementos de control de la calidad de la energía.

2.4.1 Cálculo de la selección de la batería de condensadores

La medición de energía eléctrica es una tarea en el proceso de distribución de energía. Esta operación incluye importantes parámetros eléctricos como potencia activa (P), potencia

reactiva (Q), potencia aparente (S) y factor de potencia (PF); electricidad para fines comerciales Variables de costos [44].

Conociendo la potencia real (kW) y el factor de potencia (Cos θ1) del dispositivo, es muy sencillo determinar la potencia reactiva (kVAr) del condensador necesaria para aumentar el factor de potencia a un nuevo valor (Cos θ2) [49].

$$Qc = P * (tg\theta 1 - tg\ \theta 2) \qquad \textbf{Ec. 1}$$

$$Cos\theta = \frac{Wa}{\sqrt{Wa^2 + Wr^2}} \qquad \textbf{Ec. 2}$$

Wa= Cantidad registrada por el contador de energía activa (kWh).
Wr= Cantidad registrada por el contador de energía reactiva (kVArh) [61].

Para determinar la capacidad del banco de capacitores [47] se toma el dato general de la potencia real (189.44 kW) así como el factor de potencia que se ha generado por parte de la empresa (85.83%) y se considera el factor de potencia deseado (90%) como lo indica en la ecuación 1. Para obtener los valores de la ecuación dos se analiza el recibo de luz, la energía generada (kWh) y la energía reactiva (kVAr) obtenidos en el periodo de análisis.

Se ha tomado en cuenta el factor de potencia promedio de acuerdo con el recibo de energía eléctrica de la empresa (CFE) [13], encontrándose por debajo del valor nominal permitido de 85.83%, y se ha determinado que la capacidad máxima de la potencia real del sistema eléctrico es de 189,442 kW.

$$Cos\ \theta = 0.8583;\ \theta = Cos^{-1}\ 0.8583 = 30.87\ ° \qquad \textbf{Ec. 3}$$

$$Cos\ \theta = 0.9;\ \theta = Cos^{-1}\ 0.9 = 25.84\ ° \qquad \textbf{Ec.4}$$

$$Tan\ 30.87 = 0.577 \qquad \textbf{Ec.5}$$

$$Tan\ 25.84 = 0.484 \qquad \textbf{Ec.6}$$

$$Qc = P\ (Tan\ 1 - Tan\ 2) \qquad \textbf{Ec.7}$$

$$Qc = 189.442\ (0.599 - 0.4842) = 21.74\ \ kVAr \qquad \textbf{Ec.8}$$

En donde:

Cos υ = Factor de potencia (%)
Qc = Banco de capacitores (kVAr)

Por lo tanto, se ha seleccionado un banco de capacitores de 25 kVAr [27].

2.4.2 Método de cálculo del filtro de tensión y corriente.

Las cargas no lineales pueden provocar la propagación de corrientes armónicas en las líneas de transmisión y distribución, afectando así el índice de calidad del suministro eléctrico. Además de los problemas de calentamiento causados por las líneas de distribución y los transformadores, también puede ser peligroso para ciertos equipos y cargas sensibles.

Una de las métricas más utilizadas es la denominada tensión armónica total [62], que se aplica tanto a la corriente como a la tensión. Las cargas no lineales pueden crear corrientes armónicas que se propagan a la red eléctrica, afectando significativamente la calidad del suministro eléctrico. Una de las métricas más utilizadas para medir este efecto es la distorsión armónica total (THD), que se aplica tanto a la corriente como al voltaje. Este indicador se define como la relación entre el valor rms de la suma de componentes armónicos y el valor rms correspondiente a la

onda fundamental [4]. Así para la onda de corriente será:

$$THD\ 1 = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} Ik^2}}{I1} * 100\% \qquad \boldsymbol{Ec.9}$$

Con el fin de conseguir una mejor calidad de la energía [63], se realiza un análisis de la selección del filtro de tensión y corriente como se muestra en las fórmulas (7 a 10) para determinar la capacidad de los componentes de un filtro de armónicos, este índice se define como la relación entre el valor eficaz del total de las componentes armónicas y el valor eficaz correspondiente a la fundamental [48]. La distorsión armónica total (THD) se calcula como la relación entre el valor eficaz del total de las componentes armónicas y el valor eficaz correspondiente a la fundamental, proporcionando una medida cuantitativa de la presencia de armónicos en la señal eléctrica.

$$Xc = \frac{h^2}{h^2 - 1} * Xeff \qquad \boldsymbol{Ec.10}$$

$$C = \frac{1}{2\pi f Xc} \qquad \boldsymbol{Ec.11}$$

$$XL = \frac{Xc}{h^2} \qquad \boldsymbol{Ec.12}$$

$$L = \frac{XL}{2 * \pi * f} \qquad \boldsymbol{Ec.13}$$

En donde:

Xc – Es la reactancia capacitiva (Ω)

C – La capacitancia seleccionada para el banco de capacitores (μf)

XL – Reactancia inductiva (Ω)

L – Inductancia (mH)

Conceptos básicos de las Variables.

La **reactancia capacitiva** (Xc) es la resistencia que un condensador, elemento regulador del flujo de carga en un circuito de corriente alterna, opone al paso de la corriente.

La **capacitancia** (C) es la capacidad de un componente o circuito para recoger y almacenar energía en forma de carga eléctrica. Los capacitores son dispositivos que almacenan energía.

La **reactancia inductiva** (XL) es la oposición que presenta un inductor al paso de la corriente. Tampoco se puede llamar resistencia ya que el inductor también produce un desfasamiento de 90° entre la corriente y el voltaje.

La **inductancia** (L) es la relación entre la fuerza electromotriz producida en una bobina y la variación de la corriente, y que se mide en henrios.

2.4.3 Diseño del Sistema Fotovoltaico

El impacto en el sistema eléctrico de una amplia penetración de la generación fotovoltaica (FV) adecuado respecto con la respuesta dinámica de un sistema de generación a cambios rápidos de irradiancia con el fin de estudiar sus interacciones con el sistema eléctrico para simular la integración de sistemas fotovoltaicos en la red [13].

La mayoría de las unidades de Generación Distribuida (GD) son relativamente pequeñas y están conectadas a la red de distribución y una gran parte de las unidades de GD se conectan a la red a través de convertidores electrónicos de potencia. La tarea principal de los convertidores, es convertir la potencia [64] disponible de la fuente principal en la tensión y frecuencia correctas de la red. El analizar cómo los convertidores electrónicos de potencia pueden ayudar a la red y resolver

los problemas de calidad de la energía [50].

El diseño del sistema fotovoltaico tiene un impacto significativo en el sistema eléctrico, especialmente en situaciones de alta penetración de generación fotovoltaica. Este diseño debe ser adecuado para enfrentar los cambios rápidos de irradiancia y estudiar sus interacciones con el sistema eléctrico para simular la integración de sistemas fotovoltaicos en la red [13].

El diseño de un sistema fotovoltaico [48] se realiza con el fin de contribuir a la mejora del consumo de energía eléctrica, se ha considerado sólo el 53% del consumo total del funcionamiento general de los equipos de la planta, que es el que se tiene en cuenta para el rendimiento y funcionamiento de los equipos más potentes. En el consumo general se estima una media de 26,284 kWh, por lo que al realizar la estimación del 53%, sólo se tienen en cuenta 13,930 kWh. Para el diseño del sistema fotovoltaico, el cálculo se realiza como se describe en las fórmulas (11 a 14), sólo el consumo diario ya que la tarifa del sistema eléctrico es mensual, haciendo la estimación del consumo se obtiene un total de 464,350 kWh. Los datos técnicos del módulo fotovoltaico se describen en la Tabla 2.

Tabla 2. Datos eléctricos del panel seleccionados, [24].

MODELO	CS-355
Potencia de Salida (Pmax)	355W
Corriente de cortocircuito (Isc)	9.59 A
Circuito de Voltaje Abierto (Voc)	46.8 V
Corriente de Potencia Máxima (Impp)	9.02 A
Tensión Máxima de Potencia (Vmpp)	39.4 V
Eficiencia del Módulo	17.89%

Fuente: Elaboración propia.

$$N° \ de \ Modules = \frac{Ec}{Voc * Isc * H.S.P.} \qquad \textbf{Ec. 14}$$

$$N° \ rows \ in \ series = \frac{Vinv}{Vm} \qquad \textbf{Ec. 15}$$

$$N° \ de \ parallel \ branches = \frac{Iinv}{Im} \qquad \textbf{Ec. 16}$$

$$Inverter \ Power = N° \ Módule * Power \ del \ Panels \qquad \textbf{Ec. 17}$$

$$Inverter \ Power = 66\,800 \ W$$

Por tanto, se ha seleccionado un inversor de 100 kW, de acuerdo con el catálogo como se muestra en la Tabla 3. Dentro de las tecnologías desarrolladas para mitigar estos efectos se encuentra el aprovechamiento de las fuentes renovables de energía (FRE), a partir de convertidores electrónicos de potencia (Inversores) que permiten almacenar y distribuir la energía proveniente del sol. Dichos sistemas se pueden clasificar en autónomos, conectados a la red e híbridos.

Tabla 3. Selección del Inversor [41].

DATOS DE SALIDA	
Potencia nominal CA (Pac,r)	100 kW
Máxima potencia de salida (Pac máx)	100 kVA
Corriente de salida CA (Ica nom)	151.5A at 220Vac, 144.9A at 230 Vac
Acoplamiento a la Red (Uca r)	3~NPE 380/220, 3~ NPE 400/230 V
Rango de Tensión CA (Umin-Umáx.)	180 - 270 V
Frecuencia (fr)	50/60 Hz
Rango de Frecuencia (fmin – f máx)	45 – 65 Hz
Coeficiente de distorsión no lineal	<3%@Pnom (230/400Vac 50Hz)
Factor de Potencia (cosφac,r)	0 – 1 ind,/cap,

Fuente: Elaboración propia.

La propuesta es desarrollar un sistema de control mediante contactores y elementos de regulación, el sistema responderá a los cambios provocados por el funcionamiento de las diferentes cargas conectadas. Para ello, se desarrolla una secuencia de control respecto al trabajo de los diferentes equipos (Mallacriba, Compresor, Trefiladoras, etc.) energizando los elementos de regulación (Banco de Capacitores, Filtro de tensión y corriente y el sistema Fotovoltaico) para cada caso de forma independiente, es decir para energizar el banco de capacitores deberán de trabajar ciertos equipos, realizando el mismo procedimiento para cada elemento de regulación como lo indica en los incisos de la *a* hasta la *g* de la Tabla 4. El método de control también integra el dimensionado de un sistema fotovoltaico, que debe contribuir en la generación de energía respecto con los elementos de mayor consumo energético.

Tabla 4. Secuencia de funcionamiento para el diseño de control.

			Elementos de regulación						
Nomenclatura	***Equipo***	***Potencia (W/H.P.)***	***a*** ***CR5/CAP3***	***b*** ***CR7/HF3***	***c*** ***CR8/PVA3***	***d*** ***CR5-CR7/CAP3-HF3***	***e*** ***CR5-CR8/CAP3-PVA3***	***f*** ***CR7-CR8/HF3-PVA3***	***g*** ***CR5-CR7-CR8/CAP3-HF3-PVA3***
Mtr1	Mallaciba 1	372.5/0.5							X
Mtr4	Mallacriba 2	372.5/0.5						X	
Mtr2	Straightenera 1	8940/12		X		X			
Mtr3	Straightening machine 2	8940/12			X				
Mtr5	Bending machine	7450/10		X	X				
Mtr6	Compressor	7450/10		X				X	
Mtr7	Heavy Drag	7450_/10			X				
Mtr8	Light Drag	22350/30	X			X	X		X
Mtr9	Straightening	2235/3					X		
Mtr10	Rolling machine	3725/5					X		
Mtr11	Slitter	3725/5		X		X			
Mtr12	Drawing machine 1	18625/25	X			X	X		X
Mtr13	Drawing machine 2	14900/20			X			X	X
Mtr14	Drawing machine 3	11175/15						X	X
Mtr15	Drawing machine 4	18625/25	X			X	X	X	X
Mtr16	Drawing machine 5	14900/20		X				X	X
Mtr17	Drawing machine 6	22350/30	X			X	X	X	X
Mtr18	pump	3750/5				X			
Mtr19	Geared motor	7450/10	X						
Mtr20	Mallacriba 3	2235/3		X					
Mtr21	Mallacriba 4	2235/3							X
Mtr22	Mallacriba 5	186.5/0.25						X	

Fuente: Elaboración Propia.

3.- Métodos Experimentales

3.1 Diseño del Sistema de Control

En el diseño del sistema de control propuesto, se ha considerado la integración de las condiciones de operación de los equipos a través [65] del enclavamiento de contactores (CR5 Banco de Condensadores, CR7 Filtro de Tensión y Corriente, CR8 Sistema Fotovoltaico), conectados al Bus 4, para la automatización y control, condicionados a operar con respecto a cada necesidad en la operación de la empresa, por lo que se ha realizado un análisis de acuerdo con la necesidad de trabajar en la puesta en marcha de las máquinas de la planta. Este análisis se basa en las mediciones realizadas para desarrollar la automatización del control.

Secuencia de control 1.- Se ha integrado un sistema de control de arranque y parada en cada una de las máquinas para identificar la operación de trabajo y considerarla en la secuencia de control. El sistema de control se desarrolló utilizando el software CADe Simu Versión 1.0 [28] que se [66] muestra en la Figura 7.

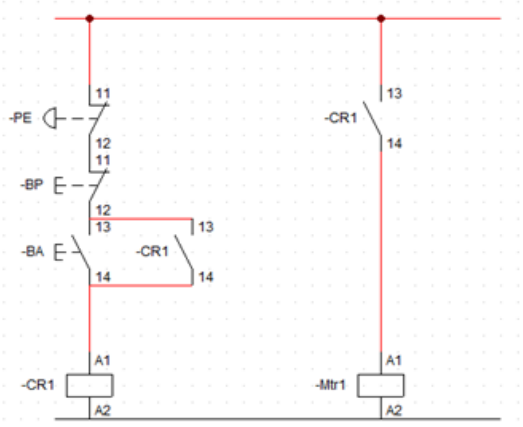


Figura 7. Disposición del control de inicio.
Fuente: Elaboración propia.

Secuencia de control 2.- El diseño del control se desarrolla de acuerdo al requerimiento de trabajo del equipo respecto a la manufactura del acero analizando cada una de las etapas del maquinado de las piezas tomando el material primeramente para ser estirado en frio en cada una de las secciones hasta obtener un diámetro indicado por las especificaciones como se describe en la Tabla 4 (Columna a) para el caso que trabajen los siguientes Equipos:
1.- Arrastre Ligero (30 HP, 440V)
2.- Máquina de estirado 1 (12 HP, 440V)
3.- Máquina de estirado 4 (10 HP, 440V)
4.- Máquina de estirar 6 (12 HP, 440V)
5.- Motorreductor (10 HP, 440V)

El diseño del control ha sido generado de tal manera que pueda energizar el sistema solamente el banco de condensadores (Contactor CR5) [67] como se muestra en la Figura 8.

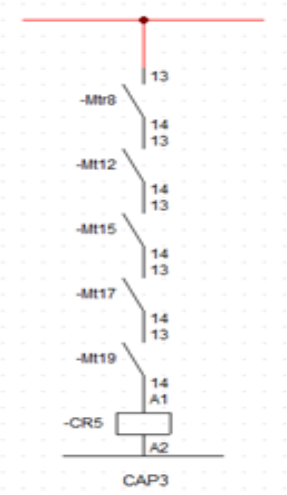


Figura 8. Diseño del control de arranque de la batería de condensadores.
Fuente: Elaboración propia.

Los resultados en la simulación muestran cuando sólo está activado el banco de condensadores (CAP 3) la corriente en el bus de alimentación en el lado primario del transformador principal T1 (13,200 V) es de 12,9 A con un factor de potencia de -93,42%. En el lado de baja del transformador T1, la corriente es de 386,8 A con un factor de potencia de -92,17%.

Secuencia de control 3.- Otra de las etapas en el maquinado de las piezas se considera el enderezado y cortado del material, así como el estirado en frio para poder generar el diseño del control se desarrolla de acuerdo a los requerimientos de trabajo de los equipos como se describe en la Tabla 4 (Columna b) para el caso que se encuentren trabajando los siguientes equipos:

1.- Enderezadora 1 (12 HP, 440V)
2.- Dobladora (10 HP, 440V)
3.- Compresor (10 HP,440V)
4.- Cortadora (5HP, 440V)
5.- Trefiladora 5 (20 HP; 440V)
6.- Malla 3 (0.5 HP,440V)

El diseño de control se ha generado de tal manera que puede energizar el sistema únicamente el filtro de tensión y corriente

(Contactor CR7) como se muestra en la Figura 9.

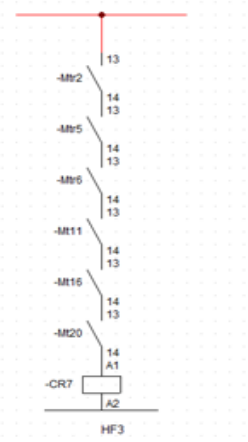


Figura 9. Diseño del control de arranque del filtro de tensión y corriente.
Fuente: Elaboración propia.

Podemos obtener de acuerdo a la simulación una corriente en el lado de alta del transformador T1 de 12,6 A y un factor de potencia del 90,06%. Del mismo modo, en el lado de baja del transformador T1, hemos registrado datos con una corriente de 377,9 A y un factor de potencia del 91,1%. Las características finales en cuanto a la formación de la forma de onda son irregulares ya que se presentan alteraciones en la amplitud generando valores de voltaje y corriente muy variable así mismo se presenta el periodo de tiempo (Frecuencia) sin completar un ciclo uniforme obteniendo alteraciones significativas, lo que puede provocar fallas en los equipos, como pérdidas magnéticas, calentamiento en cableado y equipo, mayor consumo de energía.

Secuencia de control 4. – Para el siguiente diseño del control se contempla la manufactura para el traslado del material y pasarlo a la sección de doblado y enderezado, desarrollada en función de las necesidades de trabajo de los equipos tal y como se describe en la Tabla 4 (Columna c) para el caso de que estén trabajando los siguientes equipos:

1.- Enderezadora 2 (12 HP, 440V)
2.- Dobladora (10 HP, 440V)
3.- Dragalina pesada (10 HP, 440V)
4.- Trefiladora 2 (20 HP,440V)

El diseño del control se ha generado de forma que pueda integrar en el sistema únicamente el sistema fotovoltaico (Contactor CR8) como se muestra en la Figura 10.

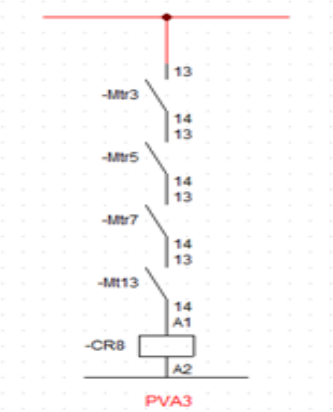


Figura 10. Diseño del control de arranque del sistema fotovoltaico.
Fuente: Elaboración propia.

Cuando se cumplen las condiciones para energizar el sistema fotovoltaico en la simulación, los resultados muestran una corriente en el lado de alta del transformador T1 de 8,4 A y un factor de potencia del 89,94%. En el lado de baja del transformador T1, los datos registrados muestran una corriente de 252,4 A y un factor de potencia del 90,63%. Las características finales en cuanto a la formación de la forma de onda son irregulares ya que se presentan alteraciones en la amplitud generando valores de voltaje y corriente muy variable así mismo se presenta el periodo de tiempo (Frecuencia) sin completar un ciclo uniforme obteniendo alteraciones significativas, lo que puede provocar fallas en los equipos, como pérdidas magnéticas, calentamiento en cableado y equipo, mayor consumo de energía.

Secuencia de control 5.- Una de las etapas importantes en el maquinado de las piezas es

la reducción en la sección transversal del acero por lo que se debe enderezar el material posteriormente pasar a la cortadora para el diseño del control se desarrolla de acuerdo a las necesidades de trabajo del equipo como se describe en la Tabla 4 (Columna d) para el caso de que trabajen los siguientes equipos:

1.- Enderezadora 1 (12 HP, 440V)
2.- Arrastrador ligero (30, HP, 440V)
3.- Cortadora (5 HP, 440V)
4.- Trefiladora 1 (25 HP, 440V)
5.- Trefiladora 4 (25HP, 440V)
6.- Trefiladora 6 (30 HP, 440V)
7.- Bomba (5 HP, 440V)

El diseño del control se ha generado de forma que pueda integrar la batería de condensadores y el filtro de tensión y corriente (contactores CR5 y CR7) en el sistema, como se muestra en la Figura 11.

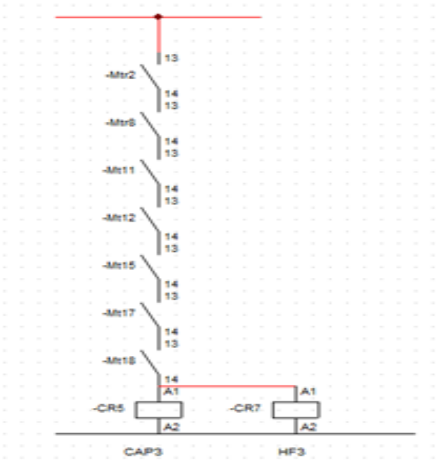


Figura 11. Diseño del control de arranque del banco de condensadores y el filtro.
Fuente: Elaboración propia.

Los datos registrados en la simulación, conectando la batería de condensadores (CAP3) junto con el filtro de tensión y corriente (HF3) (véase la figura 12) muestran que en el lado de alta del transformador principal T1, la corriente es de 13,8 A y el factor de potencia es de -90,03%. En el lado de baja del transformador T1, los datos registrados muestran una corriente de 413,2 A y un factor de potencia de -90,56%, lo que indica una mayor carga inductiva. La formación de la forma de onda final es regular.

Secuencia de control 6.- Ya que se deben cumplir los requerimientos en las especificaciones para cumplir con las necesidades del cliente otra etapa de manufactura es el enrollado del material una vez que ya tiene el diámetro especificado se pasa a la sección de embarque y se realiza el diseño del control, se desarrolla de acuerdo a las necesidades de trabajo de los equipos como se describe en la Tabla 4 (Columna e) para el caso de que trabajen los siguientes equipos:

1.- Arrastre ligero (30 HP, 440V)
2.- Enderezadora (3HP, 440v)
3.- Enrolladora (5HP, 440v)
4.- Trefiladora 1 (25HP, 440V)
5.- Trefiladora 4 (25HP, 440V)
6.- Trefiladora 6 (30HP, 440V)

El diseño de control se ha generado de forma que pueda desarrollar el sistema integrando ambos dispositivos la batería de condensadores y el sistema fotovoltaico (Contactores CR5 y CR8) como se muestra en la Figura 12.

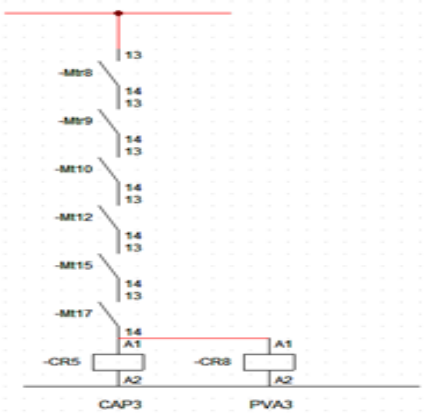


Figura 12. Diseño de batería de condensadores y control de arranque del sistema fotovoltaico.
Fuente: Elaboración propia.

En la simulación de control del sistema, tanto la batería de condensadores (CAP3) como el sistema fotovoltaico (PVA3) se energizan simultáneamente para analizar el comportamiento de las principales variables, muestran que en el lado de alta del transformador principal T1, la corriente es de 11,5 A con un factor de potencia de -77,65%; y en el bus 4, los datos registrados muestran una corriente de 344,2 A con un factor de potencia de -75,87%. La formación de la forma de onda final es regular.

Secuencia de control 7.- En las diferentes secciones se ha tomado en cuenta tanto la reducción en frio del material, así como la generación de mallas y armex del material por lo que se contempla en el diseño del control, se desarrolla de acuerdo a las necesidades de trabajo del equipo como se describe en la Tabla 4 (Columna f) para el caso de que trabaje el siguiente equipo:

1.- Malla 2 (0.5HP, 440V)
2.- Compresor (10HP, 440V)
3.- Trefiladora 2 (20HP, 440V)
4.- Trefiladora 3 (15HP, 440V)
5.- Trefiladora 4 (25HP, 440V)
6.- Trefiladora 5 (20HP, 440V)
7.- Trefiladora 6 30HP, 440V)

El diseño de control se ha generado de forma que pueda desarrollar el sistema integrando ambos dispositivos el filtro de tensión y corriente y el sistema fotovoltaico (Contactores CR7 y CR8) [68] como se muestra en la Figura 13.

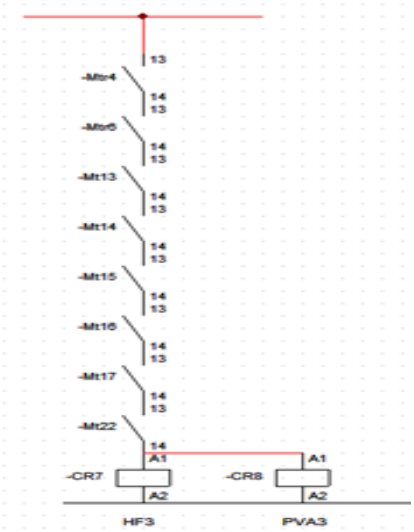


Figura 13. Control de arranque del filtro y diseño del sistema fotovoltaico.
Fuente: Elaboración propia.

En el sistema al energizar los dos elementos de regulación al mismo tiempo, el filtro de tensión y corriente (HF3) y el sistema fotovoltaico (PVA3), podemos obtener los datos en el lado de alta del transformador una corriente de 8,7 A, un factor de potencia de 94,21% así mismo en el bus 4 una corriente de 259,7 A, un factor de potencia de 94,81% y las características finales en cuanto a la formación de la forma de onda son irregulares ya que se presentan alteraciones en la amplitud generando valores de voltaje y corriente muy variable así mismo se presenta el periodo de tiempo (Frecuencia) sin completar un ciclo uniforme obteniendo alteraciones significativas, lo que puede provocar fallas en los equipos, como pérdidas magnéticas, calentamiento en cableado y equipo, mayor consumo de energía.

Secuencia de control 8.- De acuerdo con el funcionamiento propio de la empresa respecto al proceso de manufactura se hace una reducción en frio del material mediante las máquinas trefiladoras considerando los diámetros establecidos por tal motivo se realiza el diseño del control se desarrolla en función de las necesidades de trabajo del equipo tal y como se describe en la Tabla 4

(Columna g) para el caso de que trabajen los siguientes equipos:

1.- Malla 1 (0.5HP, 440V)
2.- Arrastre de luz (30HP, 440V)
3.- Trefiladora 1 (25HP, 440V)
4.- Trefiladora 2 (20HP, 440V)
5.- Trefiladora 3 (15HP, 440V)
6.- Trefiladora 4 (25HP, 440V)
7.- Trefiladora 5 (20HP, 440V)
8.- Trefiladora 6 (30HP, 440V)
9.- Malla 4 (3HP, 440V)

El diseño de control se ha generado de forma que pueda desarrollar el sistema integrando los tres dispositivos, la batería de condensadores, el filtro de tensión y corriente y el sistema fotovoltaico (Contactores CR5, CR7 y CR8) tal y como se muestra en la Figura 14.

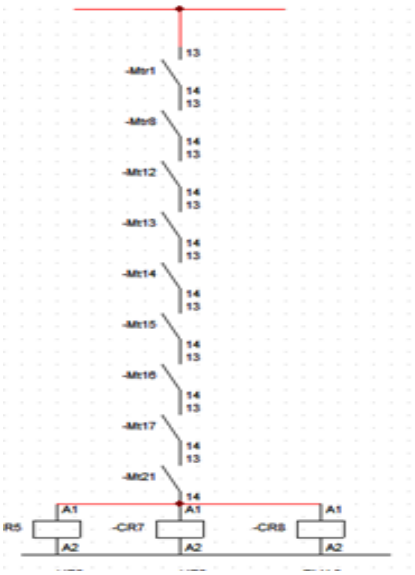


Figura 14. Diseño de control de arranque de tres elementos.
Fuente: Elaboración propia.

Una vez que los tres elementos están energizados, es decir, el banco de capacitores (CAP3), el filtro de tensión-corriente y el sistema fotovoltaico, se obtienen los siguientes resultados: en el lado de alta del transformador T1, se registra una corriente de 12.5 A con un factor de potencia de -76.52%. Mientras tanto, en el bus 4, en el lado de baja del transformador T1, la corriente alcanza los 374.3 A con un factor de potencia de -74.56%, y se observa una forma de onda regular.

4.- Resultados

Una vez desarrollada la automatización de los dispositivos de regulación, se genera la simulación utilizando software de sistemas eléctricos (*Etap*) para analizar el impacto de las distintas secuencias de conexión y control (Figura 15 a) y las formas de onda irregulares genera costes técnicos y son aquellos que suponen una pérdida de rendimiento de la instalación, como, por ejemplo:

- Pérdida de capacidad en líneas de distribución de energía
- Sobrecarga de transformadores
- Sobrecarga de conductores
- Descalificación de los transformadores
- Pérdidas por efecto Joule en líneas y máquinas
- Pérdidas magnéticas en máquinas eléctricas
- Aumento de fugas

Habitualmente los costes técnicos por la generación irregular de la forma de onda implican costes económicos, de ahí la importancia de controlar dichas perturbaciones en la forma de onda.

Los costes económicos son aquellos que se pueden cuantificar monetariamente, aunque a veces no sean sencillos de calcular. A su vez pueden ser visibles y ocultos.

Costes visibles:

- Mayor consumo eléctrico
- Puntas de consumo eléctrico
- Recargo o pago de energía reactiva en la factura eléctrica

Costes ocultos:

- Pérdidas de distribución
- Pérdidas de potencia y energía (por efecto Joule y magnéticas)
- Ampliación de instalaciones
- Paradas de procesos productivos

Estos costes dependerán del tipo de instalación y de las cargas conectadas (Figura 15 b).

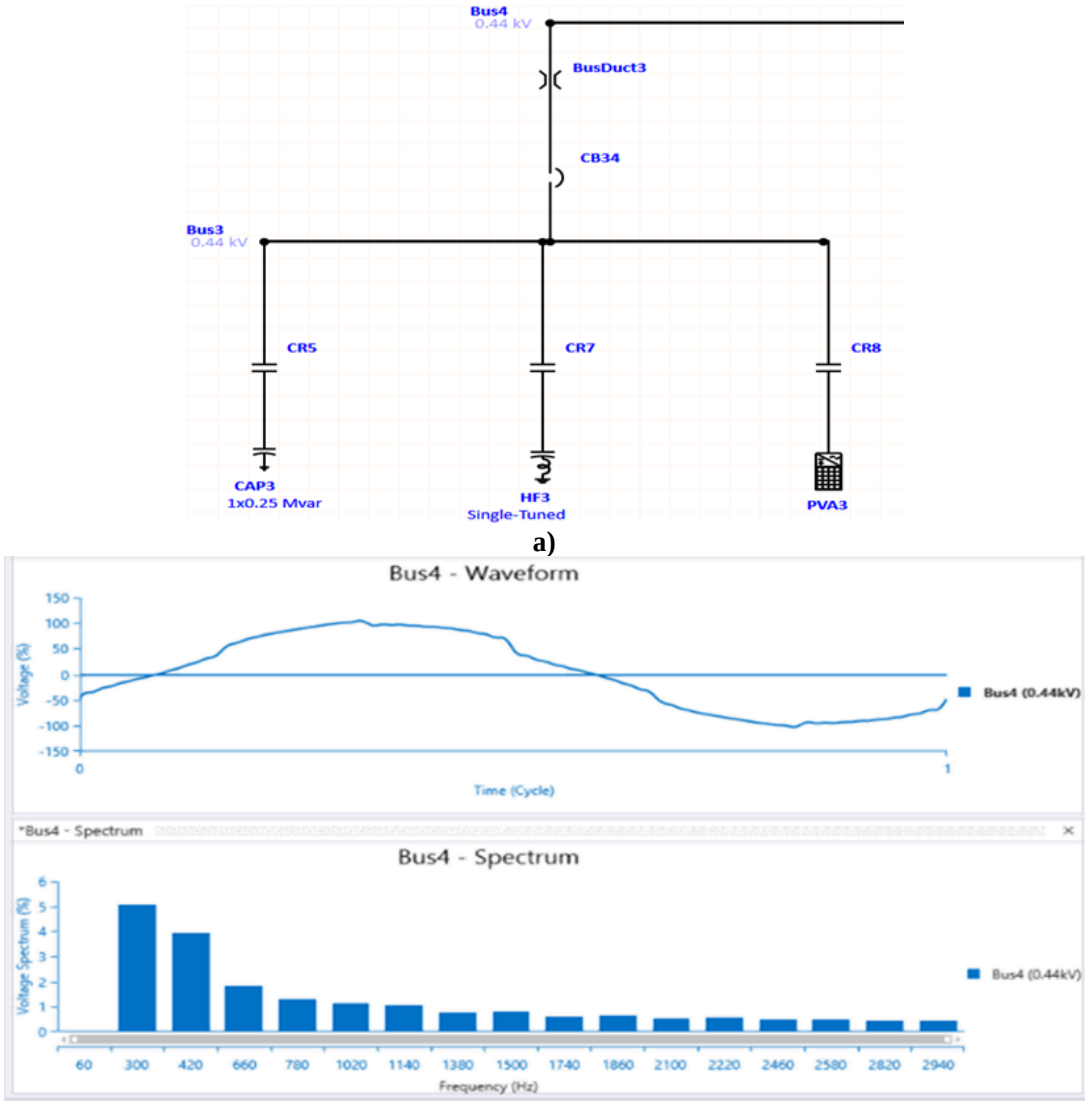


Figura 15. Simulación del sistema eléctrico.
Fuente: Elaboración Propia.

Después de implementar la automatización de los dispositivos de regulación, se procede a realizar la simulación mediante el uso de software especializado en sistemas eléctricos, como Etap, para analizar el impacto de las diversas secuencias de conexión y control (Figura 15a) y las formas de onda resultantes (Figura 15b). Se puede observar que la automatización y la interacción de los sistemas de regulación contribuyen a mejorar las perturbaciones en el sistema eléctrico en ambos casos, como se detalla en la Tabla 5.

Table 5. Resultado de la Corriente y factor de potencia de acuerdo a la simulación del sistema.

Equipo	*Corriente*		*Factor de Potenciar*		*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 de voltaje-corriente (HF3)	12.6	377.9	90.06	91.1	*Mal*	*Mal*
Sistema Fotovoltaico (PVA3)	8.4	252.4	89.94	90.63	*Regular*	*Mal*
Banco de Capacitores (CAP3) y Filtro de voltaje-corriente (HF3)	12.5	374.3	-76.52	-74.56	*Regular*	*Bien*
Banco de capacitores (CAP3) y sistema fotovoltaico (PVA3)	11.5	344.2	-77.65	-75.87	*Regular*	*Bien*
Sistema Fotovoltaico (PVA3) y FIltro de voltaje-corriente (HF3)	8.7	259.7	94.21	94.81	*Mal*	*Bien*
Banco de Capacitores (CAP3); Filtro de voltaje-corriente (HF3);Sistema fotovoltaico (PVA3)	*12.5*	*374.3*	*-76.52*	*-74.56*	*Regular*	*Bien*

Fuente: Elaboración Propia.

4.1.- Análisis de los Resultados

1) Al energizar únicamente la batería de condensadores, el factor de potencia mejoró hasta el 93,42%. Esta mejora en el factor de potencia también permitió un mejor control de las características de las fluctuaciones de corriente.

2) Cuando ambos sistemas de regulación están activos, 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. Esto da como resultado una forma de onda más estable en el Bus 4.

Este enfoque integrado produce resultados destacados, 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 4. La formación de la onda final es regular, indicando que este esquema operativo contribuye significativamente a la regulación del sistema.

5.- Conclusiones

En este estudio se tiene las siguientes

conclusiones:

1) Las variaciones de corriente que se encuentran fuera del rango especificado en el sistema tienen un impacto directo en las perturbaciones del sistema eléctrico.

2) Las fluctuaciones constantes en los valores de tensión pueden ocasionar perturbaciones y fallos significativos en el sistema.

3) Factores de potencia por debajo de los límites permitidos debido a una compensación insuficiente de potencia en el funcionamiento de los equipos.

4) La integración de sistemas fotovoltaicos con inversores introduce armónicos en el sistema eléctrico.

La ventaja clave de este estudio radica en la innovación en el desarrollo de sistemas de simulación. Esto permite comprender las condiciones reales de la estructura propuesta y su estrategia de automatización, brindando aplicabilidad práctica y reducción de costos para mejorar la calidad de la energía [69] mediante la interconexión de sistemas fotovoltaicos a la red. Este sistema puede aplicarse en otras empresas bajo este esquema.

La innovación en esta investigación se evidencia a través de la simulación de sistemas eléctricos que integran sistemas fotovoltaicos a la red y la automatización de los elementos de regulación. Esto permite identificar áreas de oportunidad para mejorar el sistema eléctrico e implementar acciones correctivas. Al conocer estas acciones de mejora, podemos reducir los costos de consumo de energía, optimizar la operación de los equipos y mejorar su mantenimiento. En comparación con el análisis de la literatura, se abordan otros temas de mejora, como la optimización interna de filtros de tensión y corriente, mejora de inversores conectados a la red de sistemas fotovoltaicos, monitoreo en tiempo real del sistema, etc.

6. Referencias

[1] 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

[2] de Oliveira, F.M.; Mariano, A.C.S.; Salvadori, F.; Ando Junior, O.H. Power Management and Power Quality System Applied in a Single-Phase Nanogrid. Energies 2022, 15, 7121. https://doi.org/10.3390/en15197121

[3] 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.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 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

[7] 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

[8] Ali, A.; Koch, T.W.; Volk, T.A.; Malmsheimer, R.W.; Eisenbies, M.H.; Kloster, D.; Brown, T.R.; Naim, N.; Therasme, O. The Environmental Life Cycle Assessment of Electricity Production in New York State from Distributed Solar Photovoltaic Systems. Energies 2022, 15, 7278. https://doi.org/10.3390/en15197278.

[9] 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

[10] 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.

[11] Narula, S., Singh, B., & Bhuvaneswari, 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.

[12] Saucedo Martínez, D. A., Texis 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.

[13] Loaeza 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.

[14] 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

[15] Marín Ruiz, E.E., Teodoro. Romero, J.L., (2016). Estudio de la redistribución de las cargas electricas del campus de la

universidad nacional del santa [Tesis para obtener el grado de Ingeniero en Energía] Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Santa, Obtenido de https://repositorio.uns.edu.pe/handle/20.500.14278/2654

[16] 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.

[17] 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.

[18] 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.

[19] 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

[20] 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.

[21] Serra, J. (2009). Guía técnica de eficiencia energética (3 ed.). España: Circutor. Obtenido de https://circutor.com/docs/GUIA_EEE_SP-LR.pdf

[22] 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

[23] Beltrán, M. E., & Boscán, N. (2011). Identificación de necesidades para la adquisición de tecnología para la producción de energía eléctrica mediante el uso de sistemas fotovoltaicos en Venezuela. Télématique, 10(2),89-106. ISSN: 1856-4194. Recuperado de: https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=78421854006.

[24] CONERMEX. (2022). Catálogo de productos 2022. Obtenido de CONERMEX Soluciones de energía renovable: https://www.conermex.com.mx/catalogo-conermex-2022.pdf

[25] 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 Saleciana. Obtenido de http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/16515

[26] tap 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

[27] 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.

[28] CADe-Simu. (5 de septiembre de 2020). CADe-Simu.com. Sarasota, Florida, Estados Unidos. Obtenido de CADe-Simu.com: https://cade-simu.com/

[29] Gobierno de México. Comisión Federal de Electricidad. (2009). Calidad de la energía: caracteristicas 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/l0000-70.pdf

[30] 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

[31] 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.

[32 Carreño Perez, J., & Espinel Ortega, Á. (2020). Indetificación 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

[33] Beltrán Telles, 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, XLI(1), ISSN: Recuperado de: https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=329164251006.

[34] 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/

[35] 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.

[36] 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/.

[37] Martins, Jonatas Campos, et al. “Energy efficiency decision-making in non-energy intensive industries: content and social network analysis”. Production, vol. 32, 2022, p. e20210065. DOI.org (Crossref), https://doi.org/10.1590/0103-6513.20210065

[38] Angelino Dos Santos, Thiago, et al. “Design and validation of IoT measurement system for photovoltaic generation”. Ingenius, núm. 28, julio de 2022, pp. 44–52. DOI.org (Crossref), https://doi.org/10.17163/ings.n28.2022.04.

[39] Herrera Casanova, Reinier, et al. “Propuesta de modelo predictivo inteligente para una planta fotovoltaica”. Revista Cubana de Ciencias Informáticas, vol. 16, núm. 1, marzo de 2022, pp. 144–62. SciELO, http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2227-18992022000100144&lng=es&nrm=iso&tlng=es..

[40] Camargo, Federico Gabriel. “Fuzzy Multi-Objective Optimization of the Energy Transition towards Renewable Energies with a Mixed Methodology”. Production, vol. 32, mayo de 2022, p. e20210132. SciELO, https://doi.org/10.1590/0103-6513.20210132.

[41] 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

[42] 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.

[43] Garduño, Daniel Memije, et al. “Mejora de la calidad de la energía en los inversores trifásicos conectados a la red usando control de modos deslizantes (improving the energy quality in three-phase grid-tied inverters by using sliding mode control)”. Pistas Educativas, vol. 43, núm. 141, febrero de 2022. pistaseducativas.celaya.tecnm.mx, https://pistaseducativas.celaya.tecnm.mx/index.php/pistas/article/view/2663

[44] 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

[45] Berenguer Ungaro, Mónica Rosario, et al. “Gestión de la calidad de la energía eléctrica”. Ingeniería Energética, vol. 39, núm. 1, 2018, pp. 62–68. dialnet.unirioja.es, https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6312965.

[46] 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

[47] Adams, Seidu. Capacitor Bank Designing for Power Factor Improvement. www.academia.edu, https://www.academia.edu/45686779/Capacitor_Bank_Designing_for_Power_Factor_Improvement.

[48] Sánchez Guevara, Sebastián, y Julián Franco Gil. Diseño e implementación de un sistema fotovoltaico interconectado a red con soporte de almacenamiento en la

Universidad Tecnológica de Pereira. 2016. repositorio.utp.edu.co, https://hdl.handle.net/11059/7010.

[49] 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/

[50] Velmurugan*, P., y B. Baskaran and G. Iru. "Analysis of PV Cell-Based DG Involving Improved Power Quality Converter for Voltage Control". International Journal of Engineering and Computer Science, vol. 5, núm. 2, 2016. ijecs.in, https://ijecs.in/index.php/ijecs/article/view/421.

[51] Mieles Barriga, Luis Fernando, y Alex Fernando Molina Leon. Análisis de calidad de energía en el sistema eléctrico, de la empresa provefrut en el cantón Latacunga de Elepco S.A, para disminución de pérdidas de energía. 2019. Ecuador: Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC)., bachelorThesis. repositorio.utc.edu.ec, http://localhost/handle/27000/5585.

[52] Historia de la electricidad, (2022) the Glossary. https://es.unionpedia.org/Historia_de_la_electricidad

[53] Cruzado Vásquez, J.L., Lucero Reyes, J. (2021). Auditoría energética en el centro de salud Magllanal, Jaén-Cajamarca. [Tesis de pregrado] Jaén Perú.

[54] Maqueda Flores, A. (2016) Análisis energético y de calidad de la energía en radio UNAM, [Tesis de pregrado, Ingeniero Eléctrico, Electrónico], México D.F.

[55] Table of Contents". M.Moam.Info, https://m.moam.info/table-of-contents_598241c21723dded563a4ec4.html

[56] Renault, A., (2022). Control predictivo de corriente aplicado al filtro activo de potencia basado en convertidores puente-H multinivel, [Tesis doctoral, Ingeniería electrónica], Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ingeniería, Luque, Paraguay.

[57] Ruiz Rubio, N.D. (2919) Herramienta educativa para la asignatura de suministro eléctrico [Tesis de pregrado, Ingeniero eléctrico], Pamplona, Colombia.

[58] Introducción Al Análisis de Circuitos - Boylestad 12Edi - PDF Free Download". Idoc.Tips, https://idoc.tips/introduccion-al-analisis-de-circuitos-boylestad-12edi-pdf-free.html

[59] Agroindustrial Potential of Mango Mangif PDF | PDF | Patata | Análisis de variación". Scribd, https://es.scribd.com/document/365482220/AT2-10-pdf.

[60] Plan de Desarrollo Municipal by Geed79 - Issuu. el 14 de octubre de 2019, https://issuu.com/geed79/docs/plan_de_desarrollo_municipal_2019_t_1d094a5abb885d.

[61] International Capacitor. (2022) Notas Técnicas. Corrección del factor de potencia. Reactive power solutions (Lifasa). Obtenido de: https://lifasa.com/pdf/CORRECCI%C3%93N_FACTOR_POTENCIA.pdf

[62] Mendoza Aguirre, T.V., (2019) Evaluación de THDI y THDV en transformadores de distribución monofásicos [Tesis de pregrado, Ingeniero electromecánico] Universidad Nacional de Loja,Ecuador. https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/21614/1/Mendoza%20Aguirre%2cTem%c3%adstocles%20Valdemar.pdf

[63] Wilson Alcívar, A.A., (2019), Estudio y análisis de la calidad de la energía eléctrica de un banco de transformadores en media tensión a la empresa Hidalgo & Hidalgo en la ciudad de Guayaquil. [Tesis de pregrado, Ingeniero electromecánico], Universidad católica de Santiago de Guayaquil, Ecuador.

[64] Sistemas de Comunicación Digitales y Analógicos [Séptima Edición.] 9786074428780, 6074428786". Dokumen.Pub, https://dokumen.pub/sistemas-de-comunicacion-digitales-y-analogicos-septima-edicion-9786074428780-6074428786.html.

[65] Recursos Digitales | PDF | Integral | Ciencias de la Computación". Scribd, https://es.scribd.com/document/100279906/Recursos-digitales.

[66] Meraz Contreras, C.A., (2017) Modelado de transformadores de instrumento para protección y medición. [Tesis de Maestría, Ingeniería eléctrica], Instituto Tecnológico de Ciudad Madero, Tamaulipas, México. https://rinacional.tecnm.mx/bitstream/TecNM/3113/1/G10070743_donacion_tesis_bib.pdf

[67] IBM Developer. (Consultado el 20 octubre 2022) https://developer.ibm.com/

[68] Ramos Carpio, C.C., Herrera García W.A., (2022) Determinación de los lineamientos de la calidad del suministro de potencia en subestaciones aplicadas a equipos de bombeo. [tesis de pregrado, Ingeniero electricista]. Universidad de el Salvador. El salvador. https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/27730/1/Determinaci%C3%B3n%20de%20los%20Lineamientos%20de%20la%20Calidad%20del%20Suministro%20Electrico.pdf

[69] Urbanismo (12o. 2021), Congreso Europeo sobre la Eficiencia Energética y Sostenibilidad en Arquitectura y, y Congreso Internacional de Construcción Avanzada (5o. 2021). Renovation Wave: 12o Congreso Europeo Sobre Eficiencia Energética y Sostenibilidaden Arquitectura y Urbanismo – 5o Congreso Internacional de Construcción Avanzada. Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatearen Argitalpen Zerbitzua, 2021. addi.ehu.es, https://doi.org/10/53796.