

# Diseño e implementación de un restaurador de tensión mediante Simulink perteneciente a la rama de los Custom Power



## Colaboración

Hernández Hernández Eduardo Ramón; Méndez Rosales Alan; Jurado Pérez Fernando, Tecnológico Nacional de México / Campus Irapuato

Fecha de recepción: 02 de agosto del 2023

Fecha de aceptación: 21 de noviembre del 2023

El objetivo de la investigación es proponer una solución a la regulación de voltaje, donde a través de un dispositivo se pueda mitigar algunos de los principales problemas relacionados con el concepto de calidad de la energía eléctrica. Las perturbaciones en las redes de distribución provocan variaciones en los perfiles de tensión en los nodos de la red. Además, el aumento de dispositivos basados en electrónica de potencia en el sistema eléctrico, esto a su vez aumenta la distorsión armónica que se refleja en las formas de onda de voltaje y corriente.

Con el fin de compensar las siguientes condiciones: regulación de voltaje, compensación de potencia reactiva, mitigación de armónicos y mitigación de aumentos caídas de voltaje, esta investigación presenta una simulación y análisis de la regulación de voltaje donde se analiza la capacidad de corregir rápidamente posibles perturbaciones en el voltaje de suministro. Este dispositivo de compensación utiliza algunos elementos como los IGBT, diodos y transistores de la familia de la electrónica de potencia y que contribuyen a un buen funcionamiento de los transformadores que se encuentran conectados al sistema eléctrico.

**PALABRAS CLAVE:** Sistema de alimentación, calidad de la energía (PQ), dispositivo Custom Power (CDP), PWM, regulación de voltaje / DVR.

**ABSTRACT:** The objective of this research is to propose a solution to voltage regulation, where through a device it may be able to mitigate some of the main problems related to the concept of power quality. Disturbances in the distribution networks cause variations in the voltage profiles in the nodes of the electrical network. In addition, the increase of devices based on power electronics in the power system, this in turn increases the harmonic distortion which is reflected in the voltage and current waveforms.

In order to compensate for the following conditions: voltage regulation, reactive power compensation, harmonic mitigation, and mitigation of voltage rises/sags, this research presents an analysis of voltage regulation where the ability to quickly correct potential disturbances in the supply voltage. This compensation device uses some elements such as the IGBT, diodes and transistors of the power electronics family and that contribute to a good functioning of the transformers that are connected to the electrical system.

**KEYWORDS:** Power System, PQ, CPD, PWM, voltage regulation by DVR.

## INTRODUCCIÓN

El diseño del presente dispositivo digital conocido como restaurador de voltaje es una solución viable en eventos eléctricos presentes en el sistema eléctrico de potencia (SEP) aunado a contribuir a la mejora de la calidad de la energía (CE). El restaurador de voltaje cuya finalidad es mitigar disturbios eléctricos así mismo ser capaz de absorber o ceder potencia del sistema con ayuda de controladores clásicos siendo este esté un dispositivo de los Custom Power (DCP) conformado por componentes electrónicos de potencia.

## Problemática de la investigación

La industria visualiza la energía eléctrica como uno de los insumos vitales e importantes para sus procesos productivos., De tal forma la energía eléctrica se ve sujeta a requerimientos de control de calidad y confiabilidad. [1] Y cada vez son más los

dispositivos y sistemas que en una o varias de sus etapas son accionados por energía eléctrica. [2].

Una vez descrito lo anterior, la atención a la problemática de la calidad de la energía ha ido en aumento debido a la presencia cada vez más común de cargas sensibles y críticas. Las variaciones en los parámetros de tensión y corriente tienen un alto impacto en el desempeño de las máquinas y equipos conectados a sistemas con problemas de calidad.

Pudiendo llegar a comprometer la confiabilidad del sistema y desencadenando problemas que involucran afectaciones económicas severas por concepto de fallo de equipos y paros inesperados de procesos de producción. Derivado de lo anterior se propone el uso del software Simulink en el análisis de la evaluación del dispositivo de DVR de la familia de los Custom Power.

Actualmente el sistema eléctrico nacional presenta disturbios, perturbaciones eléctricas en la red, donde estos parámetros se pueden representar y analizar mediante el software de Simulink el cual es uno de los softwares de mayor uso en los sistemas eléctricos de potencia, en donde se expresarán estos términos de voltaje, corriente y potencia.

Es conocido que los disturbios eléctricos en el sistema causan una problemática en la calidad del servicio eléctrico, por lo cual es prescindible contar con una buena calidad de la energía. En donde la calidad es considerada en esta investigación como una atenuación de la onda sinusoidal ante los siguientes disturbios eléctricos conocidos como: Sag, Swells, Flickers, desbalance de fase, armónicos, etc.

### Estado del arte

Dentro del análisis del estado actual, las investigaciones relacionadas con el tópico de la calidad de la energía, la electrónica de potencia, y los dispositivos semiconductores, destacando entre ellos a los transistores, tiristores; que desde la década de los 60, ya respondían a las exigencias industriales sobre alta fiabilidad, dimensiones reducidas, etc., es por ello que en la electrónica se lograron progresos increíbles, permitiendo la realización de procesos cada vez más complejos como lo indica en [2], en la literatura con el enfoque en los Custom Power se describe como se anuncia a continuación: en [3] se describe la operación del DVR ante disturbios eléctricos así mismo se menciona el principio de operación del DVR (conocido como Restaurador Dinámico de Tensión).

En [4] se hace mención a la estructura del DVR, su conexión en serie para mitigar los Sags y Swells así como para la protección de cargas sensibles. En la investigación desarrollada en [3] describe al DVR como una buena opción para mitigar las depresiones de voltaje en plantas industriales las cuales experimentaban disturbios en la calidad cada año, siendo estas de magnitud suficiente para interrumpir los procesos industriales.

Un DVR fue instalado en la planta de procesamiento de alimentos de Bonlac por Powercor, Australia Ltd. Con una potencia nominal de 2 MVA, y almacenando 660 kJ y operando a 22 kV. [5], Un DVR de 2 MVA basado en inversores, de Florida Power Corporation proporciona protección a uno de los seis alimentadores de 12,47 kV de la subestación de 230/12,5 kV de Orlando, Florida. Se puso en servicio en 1996 en una zona de alta densidad residencial y comercial. [5]. En julio de 1998 se instalaron dos DVR, cada uno de 6 MVA, 12,47 kV y 1800 kJ de almacenamiento de energía, en un emplazamiento industrial crítico del sistema Salt River Project, en el área metropolitana de Phoenix, Arizona. Cada uno de estos DVRs puede aumentar una carga de 20 MVA hasta un 30% y tiene una capacidad máxima de 1200 A. como lo describe e enuncia en [5].

Commonwealth Edison Company instaló un interruptor de transferencia estático de 12,47 kV y 600 A, en agosto de 1996 en una planta de fabricación de películas de plástico. En donde Entre las fechas del 1 de enero y el 15 de octubre de 1997, se produjeron 50 incidencias, 40 de las cuales fueron transferencias satisfactorias sin pérdida de producción. De las 10 incidencias restantes que provocaron interrupciones de la producción, 5 se debieron a caídas de tensión en ambos alimentadores [5].

En julio de 1995 se instaló en un alimentador de 22 kV de Sumitomo Steel Company un compensador estático de VAR con un inversor GTO de 8 MVAR para la compensación provocada por parpadeo de los hornos de arco eléctrico [5].

### Conceptos propios de la calidad de la energía eléctrica

**Disturbios eléctricos:** Estas son variaciones o perturbaciones que se presentan en un sistema eléctrico las cuales no necesariamente reflejan una ausencia de tensión, frecuencia o algún tipo de variación, etc. Sino que se presentan como variaciones en la onda sinusoidal afectando la operación o fallas en los equipos [6].

**Sag:** Es una reducción del valor RMS del voltaje entre el 10 y 90 % entre medio ciclo y 1 minuto, la Figura 1, muestra este fenómeno eléctrico [7].

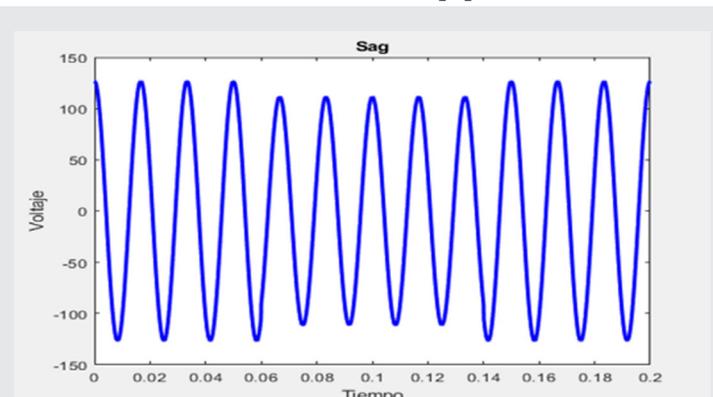


Figura 1. Depresión de voltaje (Sag).

Fuente: Elaboración propia,

**Swells:** Es conocido coloquialmente como elevación de tensión, este se define como un aumento del 110 % o más sobre el RMS. En la Figura 2 se puede notar en la forma de onda la elevación de voltaje [8].

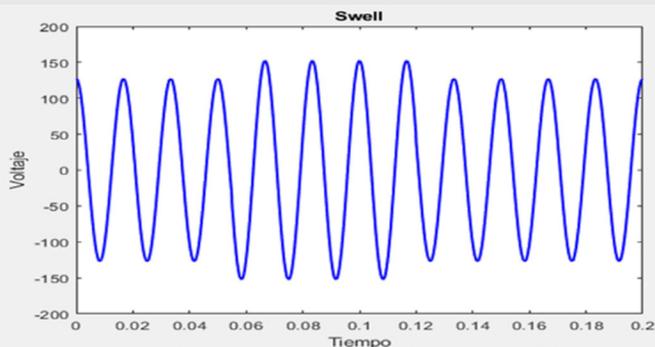


Figura 2. Elevación de voltaje (Swell).

Fuente: Elaboración propia.

**Flickers:** conocido también como parpadeo se puede considerar a este como pequeñas variaciones de voltaje generando un fenómeno óptico. Este efecto se puede apreciar en lugares donde se usan lámparas incandescentes alimentadas por una fuente en común a los circuitos de iluminación, en la Figura 3, se observa el fenómeno [9].

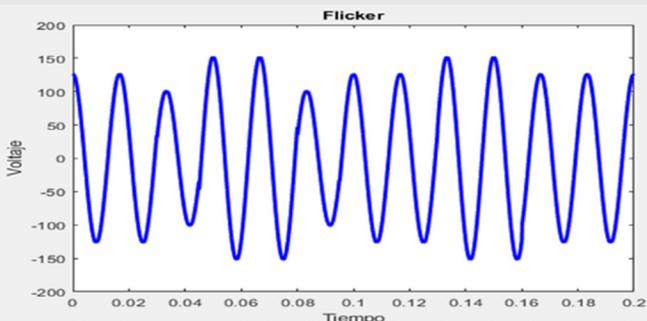


Figura 3. Fluctuaciones de voltaje (Flicker).

Fuente: Elaboración propia.

**Armónicos:** Se definen como una onda no pura sinusoidal que se suma a la onda fundamental de 50 o 60 Hz. En la Figura 4, se puede ver el efecto de los armónicos.

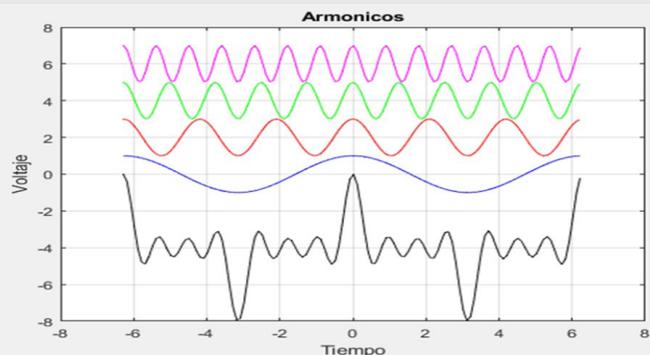


Figura 4. Presencia de armónicos en la fundamental.

Fuente: Elaboración propia.

**Desbalance de fases:** Se dice que un sistema trifásico está desbalanceado cuando las fases del sistema en magnitud son diferentes, así como el ángulo entre fases es diferente a  $120^\circ$  como se muestra en la Figura 5 siendo así las líneas punteadas el sistema trifásico balanceado por consiguiente la línea azul siendo el sistema desbalanceado [10].

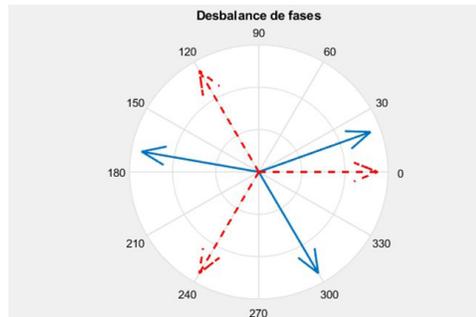


Figura 5. Desbalance de fases.

Fuente: Elaboración propia.

**Carga lineal:** Se considera una carga lineal cuando la impedancia se mantiene constante a lo largo del periodo, es decir, esta consume una corriente instantánea que sea proporcional al voltaje aplicado, como se ilustra en la Figura 6.

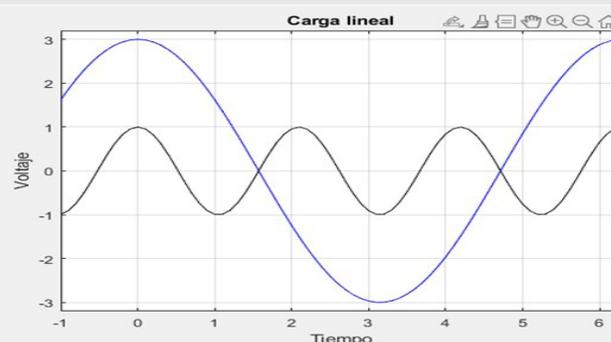


Fig 6. Carga lineal.

Fuente: Elaboración propia.

**Carga no lineal:** Este tipo de carga a diferencia de la lineal, la impedancia no es periódica en el tiempo en función al voltaje o corriente aplicado, como se muestra en la Figura 7 [11].

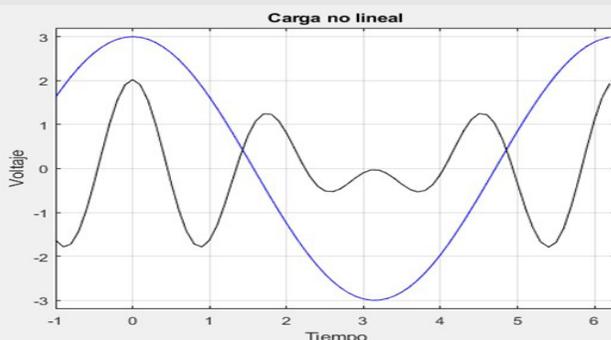


Figura 7. Carga no lineal.

Fuente: Elaboración propia.

**Carga crítica:** Se considera como carga crítica aquella carga que no puede salir de operación ya que es indispensable que esta siga operando en sus valores nominales porque de esta pueden depender vidas, asuntos gubernamentales etc.

**Carga sensible:** Se considera una carga sensible como aquella carga que no puede sufrir variaciones de tensiones en ella porque es susceptible a que esta sufra daños y ponga en peligro la integridad del equipo, así como del personal que opere esta. (Desarrollo de cuestiones robóticas, grúas viajeras, etc.).

**Custom Power:** Los dispositivos Custom Power son esencialmente equipos de electrónica de potencia capaces de mejorar la calidad de la energía y mitigar los disturbios que se presentan en la red, su respuesta de estos dispositivos es menor a un ciclo siendo capaces de detectar y eliminar los disturbios eléctricos [3].

## METODOLOGIA

El procedimiento metodológico seguido en la presente investigación para el alcance de los objetivos planteados consiste en las siguientes etapas:

- (1) La integración de módulos de IGBTs, junto con el diseño de un inversor de potencia
- (2) simulación, desarrollo e implementación de sistemas de control clásicos, inteligentes o su combinación para el control de los disturbios eléctricos y regulación de voltaje mediante el software.
- (3) Analizar las pruebas y obtener los resultados para validar las metodologías y sistemas desarrollados.

## Restaurador dinámico de tensión (dvr)

El restaurador es un dispositivo de estado sólido perteneciente a los DCP cuyo objetivo es la compensación de voltaje ya que al estar conectado en serie con el sistema este inyectará o absorberá potencia.

La operación del DVR consta en inyectar tensiones de CA en serie a la red trifásica con el fin de mejorar la calidad de las tensiones mediante un ajuste en la magnitud de la tensión entre otras. [3] El modo de compensación de este dispositivo se categoriza como compensadores en serie.

El principio de operación de estos compensadores es el siguiente: inserta una tensión de magnitud, ángulo de fase y frecuencia, el compensador en serie puede restaurar la tensión del lado de la carga a la amplitud y la forma de onda deseada incluso cuando la tensión de la fuente está desequilibrada o distorsionada [3, 5].

Normalmente, un compensador en serie se utiliza para proteger cargas sensibles durante fallos en el sistema de alimentación. Un compensador en serie basado en un convertidor electrónico de potencia puede proteger cargas críticas de todas las perturbaciones del lado de la alimentación [5].

El DVR está constituido por un convertidor CD-CD que actúa como regulador que eleva o disminuya el voltaje según el modo de operación en el que este, conectado con un inversor trifásico el cual contiene una estructura de IGBTs los cuales tienen su función como conmutadores con una modulación por ancho de pulso (PWM) de tal manera convierte el voltaje de directa en un voltaje de alterna junto con un filtro LC en conexión en paralelo cuya función es mitigar el contenido armónico debido a las frecuencias de conmutación, así como el uso de un transformador para el acoplamiento al sistema de distribución [3, 5]. Como se muestra en la Figura 8.

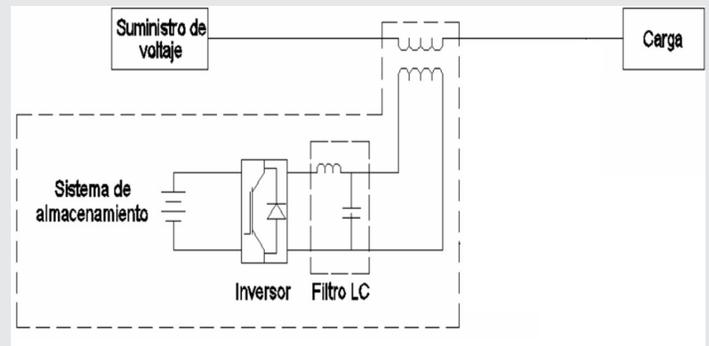


Figura 8. Diagrama de conexión del DVR.

Fuente: Elaboración propia.

## Inversor trifásico CD-CA

El inversor trifásico de CD-CA es un dispositivo que tiene la finalidad de cambiar un voltaje de entrada en CD a un voltaje simétrico en la salida de CA con una magnitud y frecuencia deseada. Con el inversor trifásico es posible obtener un voltaje de salida variable si la ganancia del inversor varía, lo que implica que favorece la relación entre el voltaje de salida con el voltaje de entrada, se consigue a través del control de modulación por ancho de pulso PWM del inversor como se muestra en la Figura 9 [12].

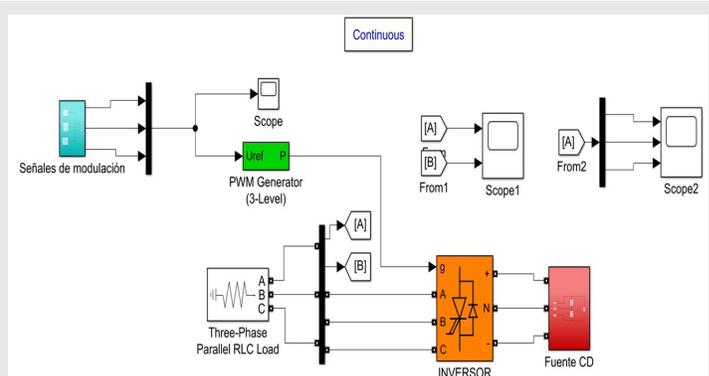


Figura 9. Modelo del inversor trifásico CD-CA.

Fuente: Elaboración propia.

Los inversores trifásicos se suelen utilizar en aplicaciones de alta potencia debido a sus componentes electrónicos entre los que se destaca al IGBT, este permite un control de altas cantidades de energía, así mismo presenta una respuesta rápida a las señales de control (PWM). En la Figura 10, se muestra el arreglo del puente completo del inversor.

Las señales de referencia para un sistema trifásico deben estar balanceadas, es decir, que estén desfasadas 120° uno respecto a la otra como se mostró en la Figura. 11.

Para la generación de una señal PWM es necesario la comparación de la señal de referencia con la señal portadora como se muestra en el diagrama de la Figura. 13, en la Figura 14, se obtiene la señal cuadrática PWM con la técnica de modulación SPWM.

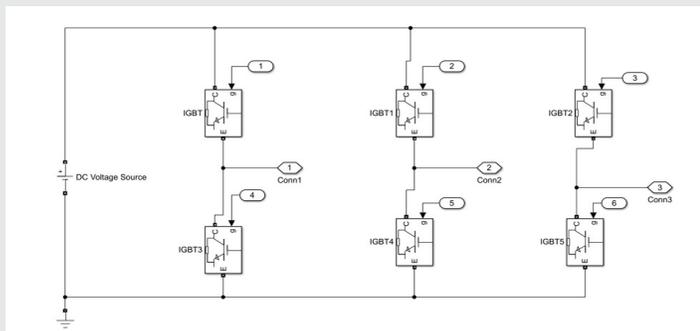


Figura 10. Puente completo con conexión IGBTs

Fuente: Elaboración propia.

Al ser un inversor trifásico se consideran los siguientes puntos:

- Debe tener un desfase de 120° entre las fases, como se ilustra en la Figura 11.
- El sistema debe tener una secuencia (A, B, C).
- La suma de las tensiones en el tiempo debe ser cero.

$$V_{ab}(t) + V_{bc}(t) + V_{ac}(t) = 0 \quad \text{Ec.1}$$

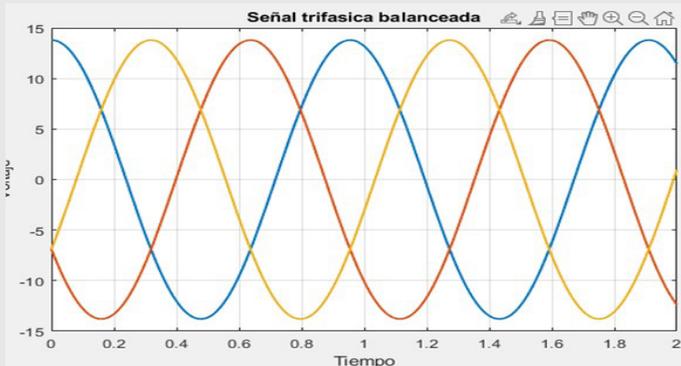


Figura 11. Señal trifásica balanceada.

Fuente: Elaboración propia.

### Generación de la señal pwm

PWM por sus siglas en inglés conocido como modulación de ancho de pulso se usa para inversores DC/AC monofásico y trifásico. El PWM es una comparación de una señal de referencia y una señal portadora de forma triangular, dientes de sierra como se puede apreciar en la Figura 12. [13].

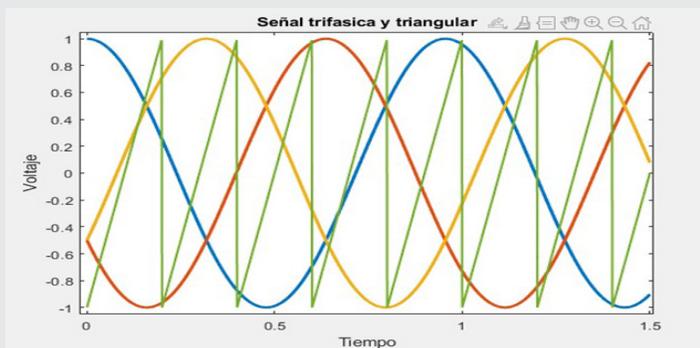


Figura 12. Comparación de señales trifásicas balanceadas con señal triangular portadora

Fuente: Elaboración propia.

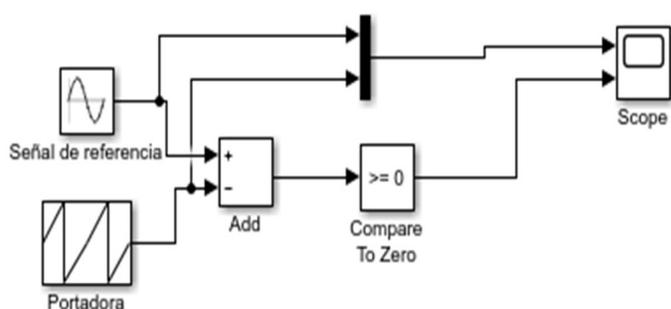


Figura 13. Esquema de generación de señal PWM

Fuente: Elaboración propia.

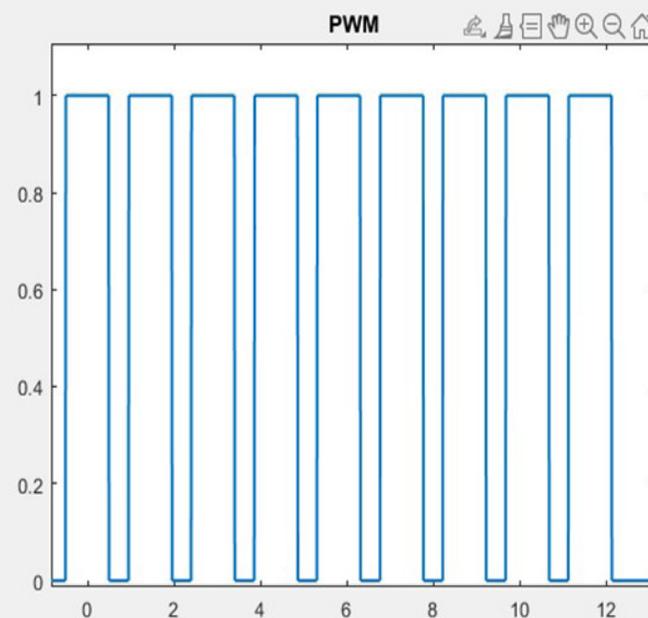
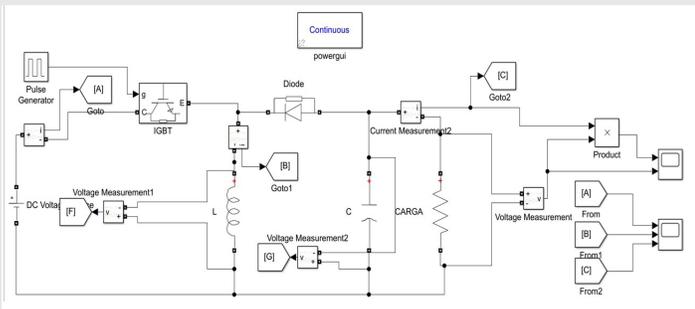


Figura 14. Señal cuadrática PWM.

Fuente: Elaboración propia.

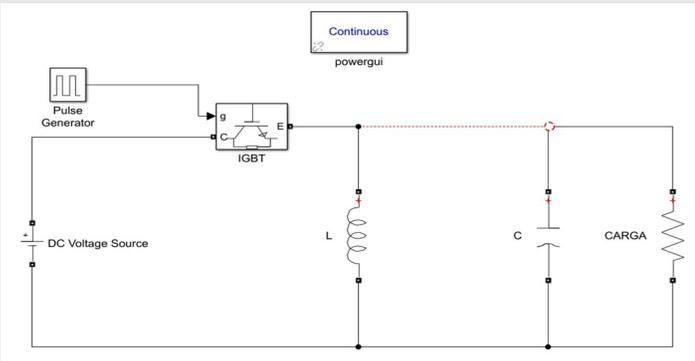
### Convertidor Buck-Boost

El convertidor Buck-Boost es un convertidor reductor elevador cuya función es elevar o disminuir tensiones variables o fijas en una carga. El convertidor se compone de una fuente de CD, un IGBT, un diodo, un inductor, capacitor y una carga como se muestra en la Figura 15. El principio de este convertidor se puede asemejar al principio de un transformador de CA, que se utiliza para elevar o reducir tensiones.



**Figura 15 Circuito del convertidor Buck - Boost.**  
Fuente: Elaboración propia

Este convertidor opera según su estado de trabajo, el primero cuando el transistor (IGBT) entra en modo ON y realiza su función como un switch haciendo que el diodo se polariza inversamente, es decir que la corriente de entrada fluye a través del inductor y el transistor como se muestra en la Figura 16.



**Figura 16. Circuito del convertidor en modo ON.**  
Fuente: Elaboración propia

Para la corriente en el inductor se aplica el análisis por malla mediante el cual siguiendo el sentido de la corriente se determina que

$$-E + V_s + V_L = 0 \quad \text{Ec. 2}$$

Conociendo que la tensión en el IGBT cuando opera en estado ON se considera cero,  $V_s=0$ , se plantea la ecuación como:

$$V_L = E \quad \text{Ec. 3}$$

La corriente en el inductor se define como describe en la ecuación siguiente:

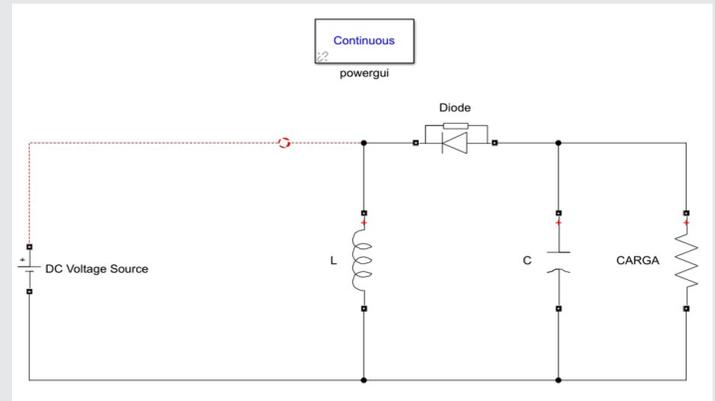
$$E = L \frac{di_1}{dt} \quad \text{Ec. 4}$$

Y se expresa como:

$$i(t) = \frac{E}{L}t + i_1 \quad \text{Ec. 5}$$

Durante el segundo modo el transistor entra en OFF, la corriente que fluía en el inductor, ahora la corriente fluye a través del inductor, capacitor, diodo y por la carga, por lo cual se puede deducir que

la polaridad de la tensión en la salida es opuesta al de la entrada, es decir entrada por el lado negativo de la carga como se muestra en la Figura 17.



**Figura 17 Circuito del convertidor en modo OFF.**  
Fuente: Elaboración propia.

Para el segundo modo (OFF) se considera el mismo análisis como en el primer modo (ON), por lo cual se expresa de la siguiente manera.

$$-V_L - V_D - V_o = 0 \quad \text{Ec. 6}$$

Para el análisis de esta ecuación se considera  $V_D=0$ , ya que el diodo está en conducción por lo tanto la ecuación se reescribe como.

$$-V_L = -V_o \quad \text{Ec. 7}$$

La energía almacenada en el inductor se transfiere a la carga y la corriente decrece hasta que el transistor opere en modo ON en el siguiente ciclo. [12]

### Inferencia del control

Es una disciplina fundamental en la ingeniería que se encarga de sistemas capaces de influir en el comportamiento de sistemas dinámicos con el objetivo de lograr una operación deseada.

Estos sistemas pueden ir desde dispositivos electrónicos, sistemas mecánicos, procesos industriales, etc. Los sistemas de control se clasifican en sistemas de lazo abierto y sistemas de lazo cerrado. A continuación una pequeña reseña de las topologías de estos.

**Sistema de control de lazo abierto:** se refiere al sistema en el cual la acción de control es independiente de la salida. En cualquier sistema de control en lazo abierto, la salida no se compara con la entrada de referencia. Por lo tanto, a cada entrada de referencia le corresponde una condición operativa fija; como resultado, la precisión del sistema depende de la calibración.

**Sistema de control de lazo cerrado:** se refiere a un sistema que mantiene una relación prescrita entre la salida y la entrada de referencia, comparada y usando la diferencia como medio de control.

Los controladores se clasifican con sus acciones de control, como pueden ser los siguientes:

**Control Proporcional (P):** Se basa en la relación proporcional entre el error presente en el sistema y la señal de control que se genera para corregir dicho error  $e(t)$ . El "error" es la diferencia entre el valor deseado o referencia y el valor real o medido del sistema en un momento específico. La relación entre la salida del controlador  $u(t)$  y la señal de error  $e(t)$  es:

$$u(t) = K_p e(t) \quad \text{Ec. 8}$$

en donde  $K_p$  se considera como la ganancia proporcional.

**Control Integral (I):** La acción integral se enfoca en acumular el error a lo largo del tiempo y utiliza esta información para eliminar el error en estado estacionario. El controlador I suma la magnitud y la duración del error a lo largo del tiempo y produce una señal de control proporcional.

El valor de la salida del controlador  $u(t)$  se cambia a una razón proporcional a la señal de error  $e(t)$ . Es decir,

$$\frac{du(t)}{dt} = K_i e(t) \quad \text{Ec. 9}$$

en donde  $K_i$  es una constante ajustable.

**Controlador PI:** El controlador PI combina los efectos del control proporcional y el control integral. La acción proporcional ofrece una respuesta rápida para corregir las desviaciones del sistema, mientras que la acción integral elimina el error en estado estacionario y mejora la precisión a largo plazo.

La acción de control de un controlador proporcional-integral (PI) se define mediante la siguiente ecuación:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad \text{Ec. 10}$$

En donde  $K_p$  es la ganancia proporcional y  $T_i$  se denomina tiempo integral,  $K_p$  afecta las partes integral y proporcional de la acción de control.  $T_i$  se denomina velocidad de reajuste. La velocidad de reajuste es la cantidad de veces por minuto que se duplica la parte proporcional de la acción de control. [14].

Para el dispositivo electrónico (DVR) se propuso la selección del controlador PI por sus virtudes que tiene en los SEP tales como: sensibilidad a perturbaciones considerando que cuenta con una parte integral, facilidad de comprensión, estabilidad entre otras. Al ser un controlador PI cuenta con una parte integral como con una proporcional.

La parte integral se encarga de resolver el error en estado estacionario sin generar oscilaciones exageradas permitiendo la estabilidad del sistema no dejando de lado la parte proporcional que tiene una respuesta rápida antes las perturbaciones que contenga el sistema.

Una razón adicional para elegir un controlador PI radica en su tiempo de respuesta computacional. En general, un controlador PI suele ser más rápido que un controlador PID. Esto se debe a que el controlador PI carece de un componente derivativa, lo que implica menos cálculos y, por consiguiente, un tiempo de ejecución del control menor [14].

Para el control del DVR se basó en el principio de la transformada de Park el cual al tener un sistema trifásico de secuencia ABC se transforma a un sistema de orientación rotatorio  $dq0$ .

El objetivo de utilizar este sistema o modulo es que nos permite obtener los componentes de secuencia positiva y negativa haciendo que los cálculos computacionales y algebraicos se reduzcan considerablemente ya que el módulo de Park es una manera de detectar desbalance y, por ende, una falla, lo que lo convierte en un indicador de fallas en un sistema [15].

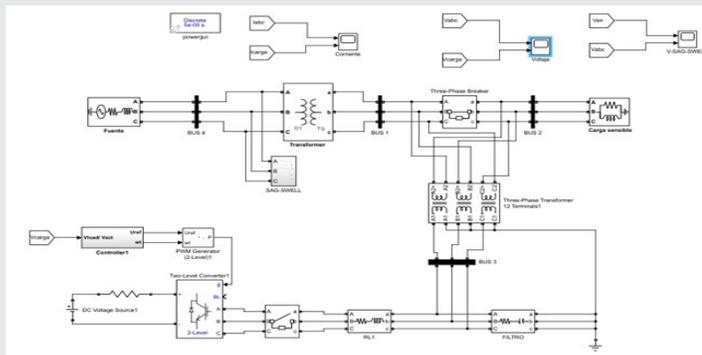
La estructura de este sistema de control consistió en un bloque que generó una variación en  $\omega t$  en radianes variando de  $0$  a  $90^\circ$  esto conectado a un bloque que nos hace la transformación de un sistema  $ABC$  en un sistema  $dq0$  esto a su vez somete a un lazo cerrado para que se retroalimente con los vectores  $d$  y  $q$ . El vector  $d$  representa la magnitud y el vector  $q$  representa el ángulo de fase, es decir cuando el vector  $q$  tome el valor de referencia cero el vector  $d$  tomara un valor de referencia 1 produciendo una secuencia positiva con una variación de  $\omega t$  antes mencionada. Estos valores se conectan al controlador PI para que así estos valores puedan ser comparados y cuantificados para producir un sistema  $dq0$  y poder transformarlo a la inversa, es decir, pasar de un sistema  $dq0$  a un sistema  $ABC$ .

## RESULTADOS

En la presente investigación se simulo un dispositivo electrónico conectado a un bus en donde este bus contiene un generador, un transformador de acoplamiento y una carga sensible, en la simulación del dispositivo se encontró que fue capaz de mantener el perfil de tensión en la carga ante diferentes disturbios eléctricos que se implementaron en la simulación, en la Figura 18, se observa la conexión del DVR en un sistema simulado.

El dispositivo eléctrico fue capaz de detectar los disturbios mediante el controlador lógico programa-

ble del control PI siendo esta la función al detectar los disturbios e identificar si cede o absorbe potencia activa o reactiva, a continuación, se muestra la conexión del modelo del regulador en la Figura 9.

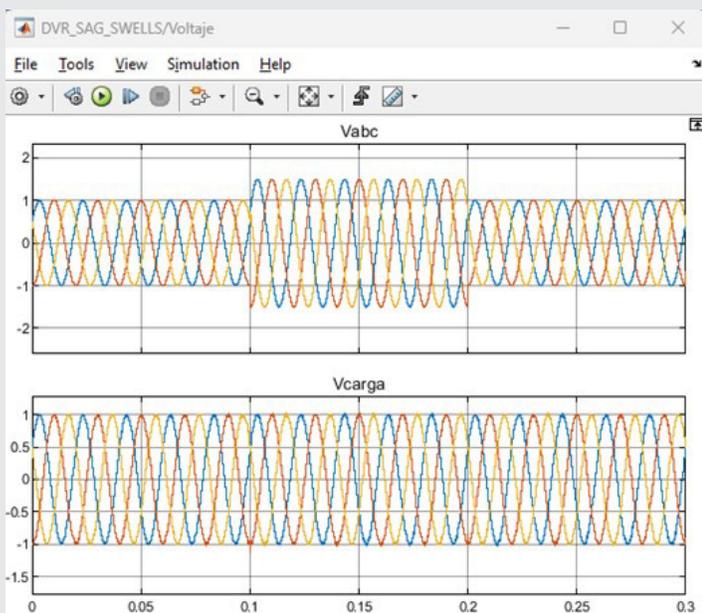


**Figura 18. Conexión del DVR y un SEP.**  
Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el dispositivo eléctrico regulador de voltaje y su interacción con el sistema, el cual operara ante diferentes disturbios, tales como: Sags, Swells, Flickers, Armónicos y Desbalance. Con la finalidad mantener un valor de tensión deseado o de operación.

### 1er. Escenario

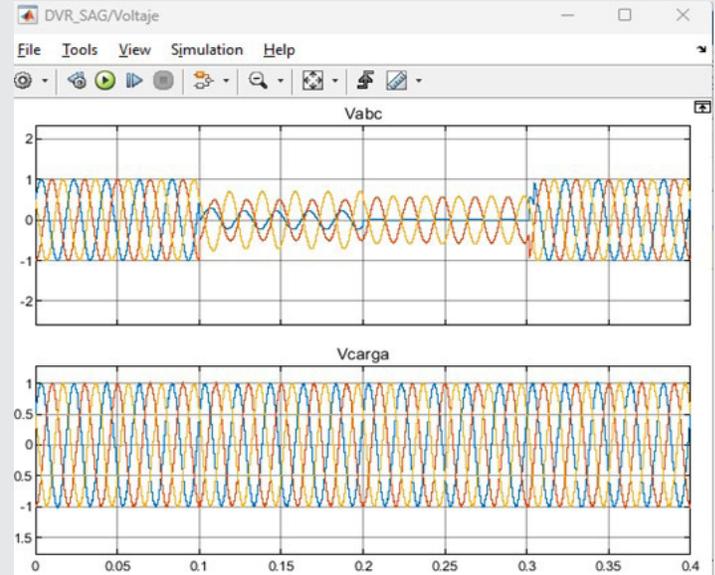
En este primer escenario se provocó uno de los disturbios comunes conocido como Swell el cual se puede apreciar en la Figura. 19, se demuestra como el dispositivo electrónico DVR consigue mantener el perfil de tensión ante este disturbio, y como la carga no sufre una variación de tensión al momento de la operación. Este disturbio puede ser provocado por una desconexión grande en el sistema haciendo que la tensión aumente un 110% por encima del valor nominal de operación.



**Figura 19. Swell antes y después del DVR.**  
Fuente: Elaboración propia.

### 2do. Escenario

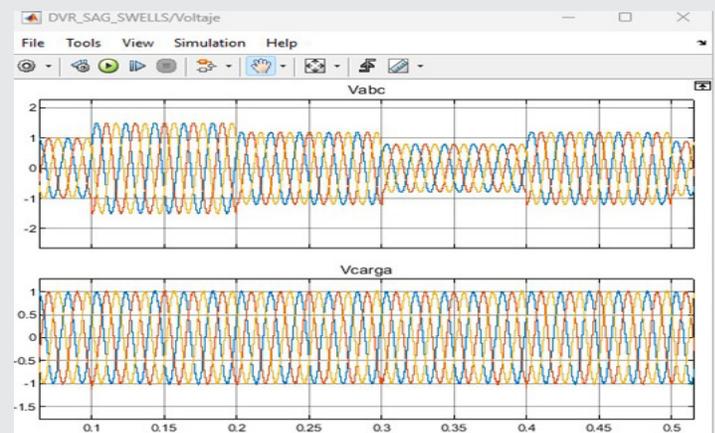
En este escenario se introdujo un disturbio contrario al Swell así también conocido como Sag, el cual se observa en la Figura. 20, se muestra como el sistema cae por debajo de su tensión de operación, y este se mantiene en la tensión de la carga. El disturbio tipo Sag es provocado de diferentes formas un ejemplo típico es en el arranque de motores haciendo que la tensión disminuya del 90 al 10 % de la tensión nominal de operación.



**Figura 20. Sag antes y después del DVR.**  
Fuente: Elaboración propia

### 3er. Escenario

En la Figura. 21, se observa la perturbación de un flicker con una duración de 0.4s, logrando observar como el DVR consigue mantener el perfil de tensión en todo momento de la operación. Este disturbio se presenta de diferentes maneras una de las más comunes es por una mala instalación eléctrica.



**Figura 21. Flicker antes y después del DVR.**  
Fuente: Elaboración propia

### 4to. Escenario

En este último escenario a diferencia de los previos se provocó una falla trifásica la cual se observa en

la siguiente Figura. 22, En la Figura. 23 se presenta una falla monofásica en donde se expone al dispositivo y que se determina que funge con su función de proteger al SEP. Estas fallas pueden ser provocadas por factores ambientales o factores humanos (accidentes).

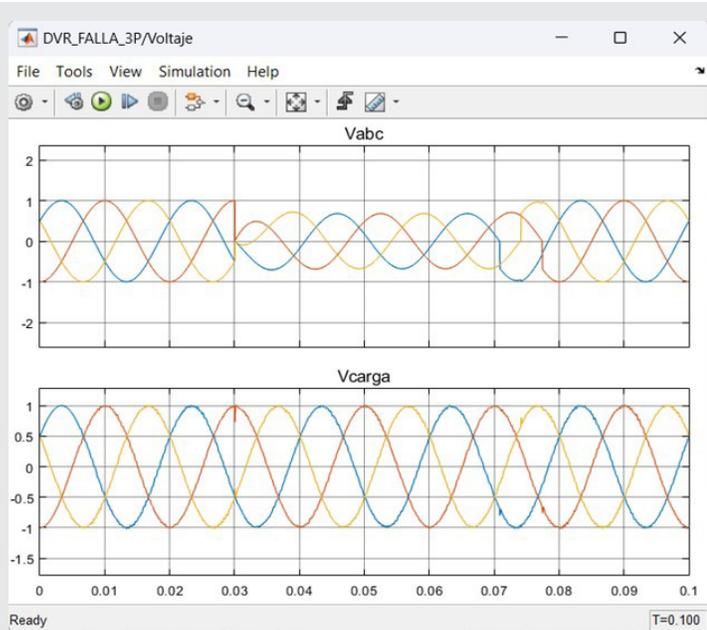


Figura 22. Falla trifásica antes y después del DVR.

Fuente: Elaboración propia.

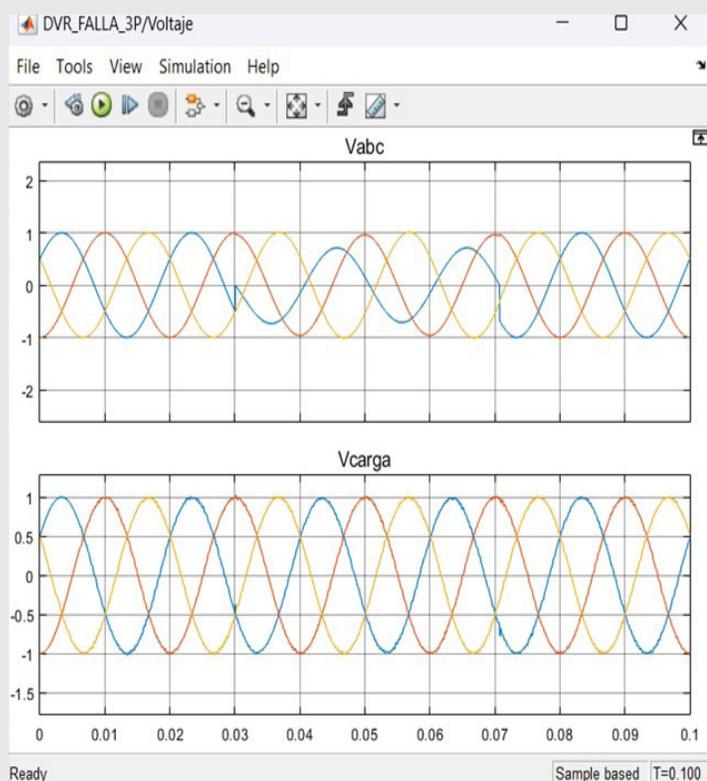


Figura 23. Falla monofásica (fase 'A') antes y después del DVR.  
Fuente: Elaboración propia.

## CONCLUSIONES

Como se describió el dispositivo electrónico DVR se ha propuesto para proteger a las cargas críticas y sensibles de los disturbios los cuales se dieron a conocer previamente. Está conectado en serie con un alimentador de distribución.

El principio básico de funcionamiento del DVR es simple, inyectar una tensión de alimentación en serie. Idealmente, esta tensión está en cuadratura con la corriente de línea para que el DVR se comporte como un capacitor o un inductor con el fin de aumentar o reducir el voltaje en terminales de la carga como se demostró en los escenarios en la sección de resultados.

De la mano de la combinación del controlador propuesto en esta investigación y la capacidad de respuesta del DVR, el sistema puede adaptarse rápidamente a cambios en la carga o en las condiciones de operación, asegurando que la tensión se mantenga dentro de los límites aceptables.

## BIBLIOGRAFÍA

[1] *Introducción General a los Inversores y sus Aplicaciones. Lección del temario de Electrónica de Potencia.* Universidad de Valencia, 1997.

[2] G. M. R. LEAL, «Calidad de la energía: camino a la normalización,» *Calidad de la energía: camino a la normalización*, p. 7, 22 Octubre 2008.

[3] m. I. O. B. V. s. m. C. L. M. H. E. O. Hernández Martínez, «Custom power una alternativa para mejorar la calidad de la energía eléctrica de usuarios industriales,» *IEEE*, p. 7, 2008.

[4] D. M. M. Sharanya, «Voltage quality improvement and harmonic mitigation using custom power devices : DVR and Hybrid filters,» *IEEE Asia Pacific Conference on Postgraduate Research in Microelectronics and Electronics (PrimeAsia)*, p. 10, 2013.

[5] G. L. Arindam Ghosh), *Power Quality Enhancement Using Custom Power Devices*, New York: Kluwer international series in engineering and computer science, 2002.

[6] J. L. T. V. DANIEL ALBERTO SAUCEDO MARTÍNEZ, *Artist, Factores que afectan la calidad de la energía y su solución.* [Art]. Instituto Politécnico Nacional, 2008.

[7] G. E. HARPER, *El ABC de la Calidad de la Energía Eléctrica*, MEXICO: LIMUSA S.A. DE C.V., 2002.

[8] C. J. L. F. BARROS GUALOTUÑA DANNY XAVIER, *Artist, Analisis de las perturbaciones (Sags)*,

Swells en la red de distribución para mejorar la calidad de energía. [Art]. Universidad técnica de cotopaxi, 2021.

[9] M. I. Z. R. HUGO RAMIRO PILA PILA, Artist, Estudio del flicker en una instalación eléctrica. [Art]. Universidad Politécnica Salesiana Sede Guayaquil, 2010.

[10] E. N. V. G. JOSÉ RENE LÓPEZ BELTRÁN, Artist, Estudio del desbalance de tensiones y sus efectos en la calidad en sistemas de distribución. [Art]. universidad de el salvador, 2019.

[11] R. PINYOL, «Armónicos: causas, efectos y minimización,» R&D Product Leader, Barcelona, 2016.

[12] M. H. RASHID, *Electronica de Potencia*, Mexico: Pearson, 2015.

[13] J. P. CONTRERAS, Artist, *Modulación por ancho de pulso(PWM) y modulación vectorial (SVM). Una introducción a las técnicas de modulación..* [Art]. Universidad Autónoma de Occidente, 2005.

[14] K. Ogata, *Ingeniera de control Moderno*, Mexico: PRENTICE-HALL, 1998.

[15] R. A. ORTIZ MEDINA, F. . J. VILLALOBOS PIÑA y R. ÁLVAREZ SALAS, «Plataforma experimental para la detección de fallas eléctricas en estator de aerogeneradores de baja potencia,» *Identidad Energetica*, vol. 1, p. 7, 27 Septiembre 2018.