



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA  
SALESIANASEDE QUITO  
CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**MEJORAMIENTO DEL FACTOR DE POTENCIA  
DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN  
MEDIANTE EL USO DE CONTROL DE ESPACIO  
VECTORIAL EN INVERSORES DE POTENCIA.**

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
Título de Ingeniero Eléctrico

AUTOR: DENNIS ADRIÁN MULLO TRUJILLO.

TUTOR: MANUEL DARIO JARAMILLO MONGE.

Quito-Ecuador  
2024

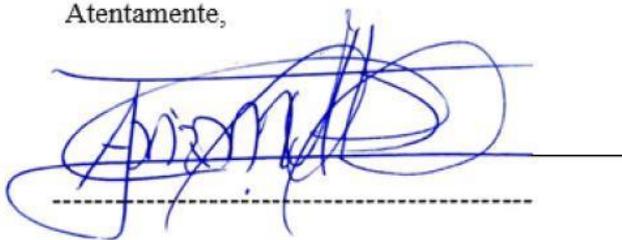
## **CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, Dennis Adrián Mullo Trujillo con documento de identificación N.º 1727321539 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 09 de septiembre del año 2024

Atentamente,



Dennis Adrián Mullo Trujillo

1727321539

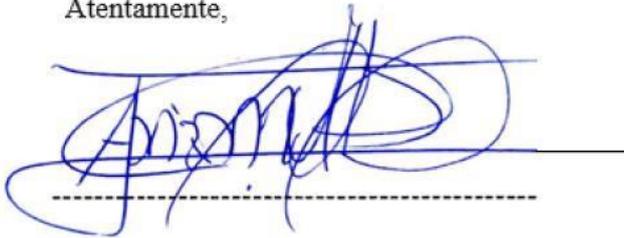
## **CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Dennis Adrián Mullo Trujillo con documento de identificación No. 1727321539, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Artículo Académico: “Mejoramiento del factor de potencia de un sistema de distribución mediante el uso de control de espacio vectorial en inversores de potencia”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 09 de septiembre del año 2024

Atentamente,



Dennis Adrián Mullo Trujillo

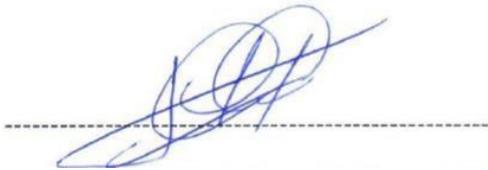
1727321539

## **CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, Manuel Dario Jaramillo Monge con documento de identificación N.º 1714298005, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: MEJORAMIENTO DEL FACTOR DE POTENCIA EN UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN MEDIANTE EL USO DE CONTROL DE ESPACIO VECTORIAL EN INVERSORES DE POTENCIA, realizado por Dennis Adrián Mullo Trujillo con documento de identificación N.º 1727321539, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 09 de septiembre del año 2024

Atentamente,



Ing. Manuel Dario Jaramillo Monge, MSc

1714298005

## ÍNDICE GENERAL

1	Introducción.....	2
2	Marco teórico.....	2
2.1	Sistemas de Distribución.....	2
2.2	Factor de potencia.....	3
2.3	Control en inversores de potencia.....	4
2.4	Control espacio vectorial.....	5
3	Metodología.....	6
3.1	Métodos de solución.....	8
3.1.1	Control de espacio vectorial en inversores de potencia.....	8
3.1.2	Control dinámico de compensación reactiva.....	8
3.2	Casos de estudio.....	8
3.2.1	Sistema de prueba con inversión SVPWM.....	8
3.2.2	Sistema de prueba con inversión SPVWM y compensador dinámico....	9
3.2.3	Sistema de prueba con inversión SVPWM, compensador dinámico y cargas dinámicas.....	10
4	Análisis de resultados.....	10
4.1	Incorporación SVPWM.....	10
4.2	Incorporación de compensación dinámica.....	11
4.3	Incorporación de cargas dinámicas.....	12
5	Conclusiones.....	13
6	Referencias.....	13
6.1	Matriz de Estado del Arte.....	16
6.2	Resumen de Indicadores.....	18

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sistema 34 barras.....	7
Figura 2. Esquema general de generación de pulsos.....	8
Figura 3. Conversión voltajes en señales modulares. ....	9
Figura 4. Obtención del ángulo para las señales.....	9
Figura 5. Modulación de tiempos.....	9
Figura 6. Modulación de pulsos.....	9
Figura 7. Comparador para pulsos finales.....	9
Figura 8. Controlador Proporcional integral.....	9
Figura 9. Generador de pulsos.....	9
Figura 10. Cargas dinámicas.....	10
Figura 11. Boxplot factor de potencia.....	10
Figura 12. Factor de potencia.....	10
Figura 13. Boxplot perfil de voltaje.....	11
Figura 14. Perfil de voltaje.....	11
Figura 15. Boxplot factor de potencia.....	11
Figura 16. Factor de potencia.....	11
Figura 17. Boxplot perfil de voltaje.....	11
Figura 18. Perfil de voltaje SVPWM-Compensador.....	12
Figura 19. Efecto de control ante cargas dinámicas.....	12
Figura 20. Boxplot factor de potencia.....	12
Figura 21. Factor de potencia-Cargas dinámicas.....	12
Figura 22. Boxplot perfil de voltaje.....	12
Figura 23. Perfil de voltaje SVPWM-Cargas dinámicas.....	13
Figura 24. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.....	18
Figura 25. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.....	18
Figura 26. Indicador de solución - Estado del arte.....	18

## ÍNDICE DE FÓRMULAS

Ecuación 1. Potencia aparente.....	4
Ecuación 2. Factor de potencia.....	4
Ecuación 3. Vector referencia.....	5
Ecuación 4. Vector salida.....	5

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Potencias.....	4
Tabla 2 Pseudocódigo SVPWM.....	6
Tabla 3 Voltaje sistema 34 barras.....	7
Tabla 4 Cargas por barra del sistema de prueba.....	7
Tabla 5: Matriz de estado del arte.....	16

# MEJORAMIENTO DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN MEDIANTE EL USO DE CONTROL DE ESPACIO VECTORIAL EN INVERSORES DE POTENCIA.

## Resumen

El factor de potencia (FP), como indicador crucial de eficiencia, es fundamental para optimizar las cargas eléctricas. Este trabajo propone el uso de enfoques de control en espacio vectorial (SVPWM) en inversores de potencia, para abordar y mejorar el FP. En la presente investigación se implementa el uso de generación distribuida (GD) y el control dinámico de compensación reactiva, lo que favorece aún más a las condiciones del sistema. A lo largo del estudio se abordan fundamentos teóricos, se presentan resultados experimentales y se analizan comparativas centradas en la mejora del factor de potencia. En términos de estabilidad y eficiencia, la GD, que se define por la producción descentralizada de energía a pequeña escala, presenta dificultades y oportunidades distintas. Este estudio abarca la integración de cargas dinámicas en el sistema de prueba con lo que se comprueba el correcto funcionamiento de los sistemas y controles implementados en el mismo, además de centrarse en la mejora del factor de potencia. **Palabras Clave:** Generación Distribuida, Factor de Potencia, Control de espacio vectorial, Sistema de Distribución con Generación Distribuida.

## Abstract

In an era of increasing energy demand and sustainability, the efficiency of electrical distribution systems is becoming increasingly important. Power factor, as a crucial indicator of efficiency, is fundamental to optimize electrical loads. This paper proposes the use of vector space control in powers inversors, approaches to address and improve power factor. The use of distributed generation and dynamic reactive compensation control is implemented, which further favors system conditions. Throughout the study, theoretical fundamentals are addressed, experimental results are presented, and comparative analysis focused on power factor improvement is discussed.

In terms of stability and efficiency, distributed generation, which is defined by small-scale decentralized power production, presents distinct challenges and opportunities. This study covers the integration of dynamic loads into the test system to verify the correct operation of the systems and controls implemented in the test system, in addition to focusing on power factor improvement.

**Keywords:** Distributed Generation, Power Factor, Vector Space Control, Distribution System with Distributed Generation.

# 1 Introducción

El FP aparece como un elemento significativo en este escenario, influyendo directamente en la eficiencia y calidad del suministro eléctrico [1].

El FP, definido como la relación entre la potencia activa y la potencia aparente, es fundamental en la planificación de la carga del sistema de distribución eléctrica. Un FP bajo no sólo desperdicia energía, sino que supone una carga adicional para la infraestructura eléctrica, reduciendo la estabilidad y confiabilidad del sistema [1].

El presente estudio de grado aborda y mejora el factor de potencia en un sistema de distribución utilizando enfoques de SVPWM en inversores de potencia acoplados a un sistema de generación fotovoltaica.

La integración de la generación distribuida junto con el control de compensación reactiva, se ofrecen como métodos para mejorar la eficiencia y la sostenibilidad en el contexto de la evolución en curso de los sistemas de distribución eléctrica. Esta investigación se centra en el mejoramiento del FP con un despliegue de GD en un sistema de distribución IEEE utilizando inversores de potencia con SVPWM. El objetivo principal de esta investigación es conseguir una mejora considerable del factor de potencia del sistema, en los casos a estudiar [2].

El control de espacio vectorial surge como instrumento crítico en este proceso, permitiendo un ajuste preciso y dinámico de los inversores de potencia [3]. Este enfoque se materializa mediante una implementación en el entorno de simulación Matlab Simulink, que incluye una lectura en tiempo real del factor de potencia del sistema. Esta monitorización constante proporciona la retroalimentación esencial para ajustar los parámetros de

control, lo que se traduce en un rendimiento óptimo en tiempo real.

Para el presente artículo se considera la implementación del sistema de prueba IEEE de 34 barras.

El SVPWM interviene mejorando el factor de potencia a nivel general del sistema. Sin embargo, se evidenciará un aumento más significativo en la barra del sistema de prueba en la que se conecte dicho control. Para que el sistema sea estable se incorporará un compensador dinámico de reactivos, lo que permite maximizar la eficiencia del control SVPWM [4]. Este sistema de prueba, al igual que todos, está sujeto a perturbaciones [5]. Para el presente trabajo se incorporará cargas dinámicas que demuestren la adaptabilidad del SVPWM y del compensador dinámico ante perturbaciones.

## 2 Marco teórico

### 2.1 Sistemas de Distribución

Los sistemas eléctricos de distribución garantizan la transmisión eficaz y segura de la energía eléctrica a los usuarios finales [6].

Luego de experimentar transformaciones y reducciones de tensión en las subestaciones transformadoras desde los niveles elevados de transmisión, estas instalaciones representan la fase concluyente en el recorrido de la energía eléctrica [7]. Su principal cometido es suministrar energía de forma fiable desde estas subestaciones a los centros de consumo, que pueden ser desde residenciales a comerciales, pasando por empresas industriales [8].

En comparación con los sistemas de transmisión, estos sistemas de distribución están diseñados deliberadamente para

funcionar a niveles de tensión más bajos, a menudo en el rango de hasta 35 [Kv] [9]. Los lugares de consumo final están situados tanto en zonas rurales como urbanas, donde esta tensión más baja es adecuada para una distribución eficaz de la energía. Los límites de tensión más bajos ayudan a controlar la carga y minimizan la pérdida de energía en las líneas de distribución [9].

Para los sistemas de distribución, la producción, distribución y consumo de energía se están viendo alterados por la práctica de la generación distribuida alimentada por energías renovables. Con esta estrategia descentralizada, la electricidad se produce cerca del usuario final, a menudo utilizando tecnología limpia y fuentes de energía renovables como la biomasa, la energía solar y la eólica. La disminución de las pérdidas de distribución es una de las principales ventajas de la energía renovable distribuida. La eficiencia del sistema aumenta al minimizar las distancias que debe recorrer la energía, lo que reduce las pérdidas debidas a la resistencia de los cables [9].

La diversidad de fuentes de energía también aumenta la resistencia del sistema eléctrico. Cuando el sistema tiene lugares de generación dispersos, es menos vulnerable a las interrupciones provocadas por el fallo de una sola central eléctrica o de una infraestructura de transmisión. Además, este enfoque descentralizado facilita la integración de fuentes de energía renovables [9].

El potencial de la generación renovable distribuida para incluir a los consumidores permitiéndoles convertirse en productores de energía es otra ventaja significativa. Por ejemplo, los sistemas solares en tejados residenciales permiten a los hogares producir su propia energía y, en determinadas situaciones, incluso vender el excedente a la red. Los usuarios se benefician económicamente de ello, al

mismo tiempo que se les anima a participar activamente en el cambio hacia fuentes de energía más sostenibles [9].

## 2.2 Factor de potencia

El FP es una medida de la eficacia con la que la electricidad se convierte en energía útil en un sistema eléctrico. Se mide en una escala de 0 a 1 y se expresa como la relación entre las potencias activa y aparente [1]. Un FP cercano a uno implica un sistema eficiente, mientras que un factor de potencia inferior muestra ineficiencia en la conversión de la energía eléctrica. Sin embargo, el FP es una variable directamente ligada a la potencia del sistema eléctrico a analizar, esto incluye los distintos tipos de potencias existentes para determinar la relación con el FP [4][10].

Cuando el FP es bajo, se pierde una gran cantidad de energía porque se crean reactancias al desperdiciar parte de la electricidad [1]. Cuando la energía se utiliza de forma más eficiente, hay menos pérdidas eléctrica, como demuestra un factor de potencia alto [1]. Además, los equipos eléctricos que experimentan sobrecargas debido a un factor de potencia deficiente pueden sufrir un mayor desgaste y acortar su vida útil [7]. Además de aumentar la eficiencia energética, mantener un factor de potencia alto también ayuda a estabilizar el sistema eléctrico al evitar caídas de tensión y mejorar la calidad del suministro eléctrico [5].

### **Potencia activa (A)**

La cantidad de energía real consumida o suministrada en un sistema eléctrico que realiza un trabajo útil, como la iluminación, la calefacción o el movimiento de un motor, se mide en vatios [W][1].

### **Potencia reactiva (Q)**

Medida en voltios-amperios reactivos [VAR], no realiza directamente un trabajo significativo, pero es necesaria para mantener la tensión del sistema y soportar los componentes inductivos o capacitivos [1].

### Potencia aparente (S)

La combinación vectorial de potencia activa y reactiva en un sistema eléctrico se mide en voltios-amperios [VA].

Donde:

Tabla 1. Potencias

Variable	Unidad
S	Potencia aparente [VA]
P	Potencia activa [W]
Q	Potencia reactiva [VAR]
FP	Factor de Potencia

Ecuación 1. Potencia aparente

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

Muchas empresas sufren penalizaciones o tasas adicionales si su factor de potencia es bajo, por lo que aumentar este factor resulta económicamente ventajoso. Por ende, para el sistema analizado se ha realizado una medición en tiempo real del factor de potencia utilizando las variables mencionadas antes [11].

Ecuación 2. Factor de potencia

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

La potencia activa, que realiza el trabajo real, y la potencia aparente que combina la potencia activa y la reactiva, ambas se comparan para determinar el factor de potencia. Los números más bajos significan una mayor presencia de potencia reactiva,

mientras que un factor de potencia cercano a 1 sugiere un uso eficiente de la energía [6].

### 2.3 Control en inversores de potencia

Los inversores de potencia son necesarios para la conversión eficiente de energía entre fuentes de corriente continua y alterna. El control del inversor garantiza que la salida sea estable, controlable y se ajuste a las necesidades de la aplicación [12]. En sistemas de energías renovables, vehículos eléctricos, electrónica de potencia y otras aplicaciones, estos inversores son fundamentales. Sin embargo, estos deben someterse a un determinado control ya que existen varias formas de lograrlo. No obstante, en este trabajo se analizará el control mediante “El Control de Modulación de Ancho de Pulso (PWM, por sus siglas en inglés: Pulse Width Modulation)” [13].

La cantidad de potencia suministrada a una carga se controla modificando la anchura de impulso de una señal de onda cuadrada. El ciclo de trabajo, expresado en porcentaje, representa la cantidad de tiempo que la señal está en su amplitud máxima. El proceso de creación de una señal PWM consiste en transformar una señal de referencia en una señal digital de onda cuadrada con un ciclo de trabajo ajustable [14]. En este caso, la señal de lectura de voltaje se realizará en la barra con el FP más bajo del sistema de prueba, que mediante funciones ajusta las señales de entrada para tener señales adaptables para a la salida que ingresa a los inversores.

Mediante el uso de dispositivos electrónicos de conmutación, la potencia puede convertirse de forma más regulada y gestionarse con precisión y eficacia. Entre los principales encontramos a los MOSFET que ofrecen una excelente regulación de la potencia y una rápida reacción cuando

funcionan a altas frecuencias de conmutación, lo que proporciona a los usuarios un control más exacto de la potencia de salida [6]. La conmutación rápida reduce las pérdidas por conmutación y aumenta la eficiencia del sistema. También facilita el ajuste a los cambios dinámicos de la carga, garantizando una fuente de alimentación fiable y eficaz [1].

Además, el mejoramiento de los sistemas de energías renovables es posible gracias a la eficacia de control de los inversores de potencia MOSFET. Estos inversores proporcionan una conversión más precisa de la potencia producida en potencia de CA, lo que permite una integración más eficiente de fuentes intermitentes en aplicaciones como la conversión de energía solar o eólica. La importancia de los inversores de potencia MOSFET en la eficacia y el control de los sistemas eléctricos actuales se ve reforzada por su capacidad para modificar rápidamente la potencia de salida en respuesta a los cambios en las condiciones de las fuentes del sistema, esto aumenta el uso de energías limpias y también significativamente aumenta en general la estabilidad de la red [6].

## 2.4 Control espacio vectorial

El control de espacio vectorial (SVPWM) es un enfoque utilizado en inversores de potencia para proporcionar una salida de tensión precisa [15].

La estrategia principal consiste en expresar las magnitudes y fases de las señales eléctricas en un espacio vectorial tridimensional [16].

El control de espacio vectorial convierte las magnitudes de las señales de entrada y salida como vectores en el plano mencionado [16]. El espacio vectorial está formado por ejes que representan los

componentes de las señales en coordenadas cartesianas [18]. En general, tres ejes indican las componentes alfa, beta y cero de un sistema trifásico.

Ecuación 3. Vector referencia

$$Vd = (2/3) * [u - (u * -(u * 3/2))]$$

Ecuación 4. Vector salida

$$Vq = (1/\sqrt{3}) * [u(2) - u(3)]$$

Donde:

- $u$  = Voltaje en sistema.

El propósito del control de espacio vectorial es elegir y ajustar los vectores de salida para que se parezcan mucho al vector de referencia, minimizando los errores y proporcionando una respuesta dinámica aceptable. Para controlar eficazmente la referencia, la magnitud y la fase de la salida se modifican variando la duración del pulso y el tiempo de encendido del pulso (PWM) [15].

Se utilizan tres vectores de referencia, uno para cada fase, y se generan tres vectores de salida[17]. Esto permite un control autónomo de cada fase y un control exacto de la salida trifásica.

El SVPWM ofrece una respuesta dinámica más rápida y una mayor eficiencia energética que el control PWM, que modifica la anchura de pulso de la señal de salida. El ajuste de la orientación vectorial en tiempo real permite responder más rápidamente a los cambios de carga o de las condiciones de la red eléctrica. Además, al mejorar la relación entre potencias [P] y [Q], el control vectorial espacial reduce las pérdidas por conmutación y aumenta la eficiencia del sistema en su conjunto [17].

El control de espacio vectorial ofrece más flexibilidad y precisión en el control de

la salida del inversor que otros métodos de control, que sólo modifican la magnitud de la tensión de salida sin afectar a la fase o la forma de onda. En algunos esquemas de control, la relación angular entre las variables no se tiene en cuenta al realizar la modulación de la tensión; en su lugar, la magnitud de la señal de salida simplemente se ajusta para que coincida con la referencia prevista [17]. Esto puede provocar un aumento en la distorsión de la forma de onda en la salida y una disminución de la eficiencia, especialmente en caso de cambios bruscos en la carga o en las circunstancias de la red.

En cambio, el control en el espacio vectorial tiene en cuenta tanto la base como la magnitud de las variables de salida, lo que va un paso más allá. Al alterar la orientación del vector en el espacio de estados, se puede obtener un control más preciso y dinámico de la salida y responder más rápidamente a las variaciones de carga [17]. Al minimizar las distorsiones armónicas y mantener una relación óptima entre potencia activa y reactiva, esta función de control avanzada aumenta la economía del sistema y mejora la calidad de la onda de salida.

En situaciones en las que la estabilidad y la precisión son críticas, como en aplicaciones industriales delicadas o sistemas de energías renovables, el control vectorial espacial funciona mejor que otros tipos de control [17]. Proporciona un rendimiento más avanzado y eficiente en la generación de electricidad [18].

### 3 Metodología

Las cargas no lineales introducen armónicos en la red eléctrica, lo que da lugar a una corriente no sinusoidal. Esta distorsión tiene un efecto directo sobre el factor de potencia, cambiando la conexión entre corriente y tensión [19]. Además, esta distorsión armónica no sólo causa

problemas de desfase, sino que también pone en entredicho la calidad del suministro eléctrico [1].

Como parte de la respuesta a estos fenómenos, se han propuesto numerosos conceptos de mejoramiento del FP, uno de los cuales es el uso de la producción de energía renovable no controlada, ya que la variabilidad inherente de fuentes como la solar y la eólica puede tener un impacto sustancial en el FP de la red.

La naturaleza intermitente de la energía renovable puede causar oscilaciones en la potencia activa suministrada a la red, influyendo negativamente en el factor de potencia y ocasiona diversos problemas, entre ellos sanciones económicas por normativas donde se requiere un valor mínimo factor de potencia para su operación [20].

Los sistemas de distribución están sujetos a todos estos fenómenos, Sin embargo, es un componente crucial de todo el sistema eléctrico. Para llevar a cabo este procedimiento se utiliza un sistema de GD, controlada por el SVPWM obteniendo una mejora tanto en el factor de potencia, como en el perfil de voltaje.

En la tabla 2 se presenta un pseudocódigo del control SVPWM aplicado a los inversores de potencia.

Tabla 2 Pseudocódigo SVPWM

Paso	Descripción	Fórmula
1	Medición voltajes trifásicos	$V_a, V_b, V_c$
2	Conversión señales	$V_d = \frac{2}{3} \left( (u_1 - \frac{u_2}{2} - \frac{u_3}{2}) \right);$ $V_q = \frac{1}{\sqrt{3}} (u_2 - u_3)$
3	Modulación de tiempos	$T_{on} = \frac{V_d + V_q}{V_d}; T_{off} = 1 - T_{on}$
4	Generación de pulsos	

- 5 Comparar pulsos
- Aplicar pulsos a los inversores

En la figura 1 se representa el sistema de distribución de 34 barras, en el cual se analizó el FP y el perfil de voltaje en cada una de ellas, obteniendo como resultados los siguientes datos:

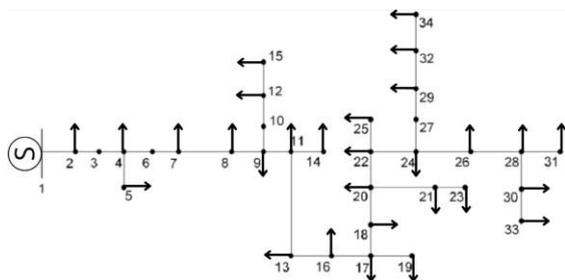


Figura 1. Sistema 34 barras

Tabla 3 Voltaje sistema 34 barras

Barras	Voltaje [p.u]	Voltaje [V]	Factor de potencia
1	0.8456	14376,0217	0.9152
2	0.8447	14361,28	0.9139
3	0.8441	14349,9202	0.9160
4	0.8430	14331,4524	0.9231
5	0.8420	14315,3292	0.925
6	0.8411	14299,8575	0.928
7	0.8401	14282,3314	0.9723
8	0.8399	14278,3604	0.8516
9	0.8396	14273,7144	0.8520
10	0.8394	14271,4756	0.8527
11	0.8394	14270,6132	0.8509
12	0.8394	14270,3505	0.8525
13	0.8440	14394,2463	0.6904
14	0.8439	14347,7546	0.6904
15	0.8439	14347,5749	0.5802
16	0.8439	14347,5504	0.1771
17	0.8406	14291,5546	0.8504
18	0.8402	14284,66	0.8503
19	0.8398	14277,0473	0.8503
20	0.8394	14270,9279	0.8502
21	0.8391	14265,6134	0.8502
22	0.8387	14259,555	0.8501

23	0.8385	14254,5788	0.8501
24	0.8382	14249,9107	0.8500
25	0.8380	14247,6585	0.8499
26	0.8380	14246,7959	0.8497
28	0.8397	14276,5313	0.9979
29	0.8395	14272,6641	0.9979
30	0.8394	14270,7303	0.9979
31	0.8394	14270,8336	0.8555
32	0.8394	14270,1909	0.8555
33	0.8394	14269,8699	0.8555
34	0.8393	14269,7628	0.8555

Tabla 4 Cargas por barra del sistema de prueba

Barras	Potencia activa [P]	Potencia Reactiva [VAR]
2	230000	142500
4	230000	142500
5	230000	142500
8	230000	142500
9	230000	142500
11	230000	142500
12	137000	84000
13	72000	45000
14	72000	45000
15	72000	45000
16	13500	75000
17	230000	142500
18	230000	142500
19	230000	142500
20	230000	142500
21	230000	142500
22	230000	142500
23	230000	142500
24	230000	142500
25	230000	142500
26	230000	142500
28	750000	48000
29	750000	48000
30	750000	48000
31	57000	34500
32	57000	34500
33	57000	34500
34	57000	34500

Por lo anteriormente expuesto se considera como una solución la implementación de una planta de generación distribuida con paneles solares, cuya función será entregar potencia activa (P) al sistema, además la incorporación de un compensador dinámico controlado proporcional e integralmente para las necesidades específicas de la barra 16, cuya función será inyectar potencia reactiva (Q) para estabilizar las variables en discusión ante perturbaciones.

### 3.1 Métodos de solución

#### 3.1.1 Control de espacio vectorial en inversores de potencia

Como parte de la solución al problema del factor de potencia, se optó por acoplar un sistema de control en una central de paneles solares, destacando las áreas cruciales en las que es necesario aumentar el factor de potencia.

A continuación, para conseguir una respuesta dinámica y una capacidad de seguimiento de referencia, se elige un inversor mosfet para el panel solar adecuado y su configuración para el control de espacio vectorial [2].

Se instalan dispositivos de medición y control para evaluar periódicamente la calidad de la energía generada.

El SVPWM se enfoca en el uso de la variable de voltaje trifásico en la barra 16, siendo esta la de peor condición, y dando como resultado seis pulsos que controlan los inversores de potencia (mosfet) [21].

En la figura 2 se observa de manera general, que mediante las señales trifásicas de voltaje medidas en la barra 16, cuyo factor de potencia es el más bajo del sistema, se realiza el control cuyo objetivo es generar los pulsos que controlan los

inversores implementados en el sistema solar.

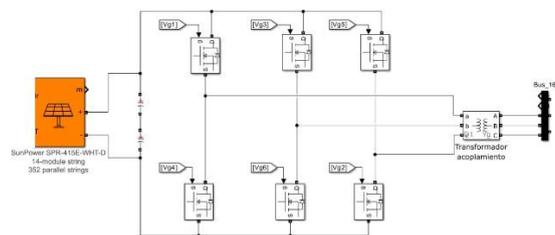


Figura 2. Esquema general de implementación SVPWM.

#### 3.1.2 Control dinámico de compensación reactiva

Los compensadores de potencia reactiva se utilizan junto con el control vectorial para aumentar aún más el factor de potencia [5]. Mediante un banco capacitivo controlado proporcional integralmente para adaptarse al control de espacio vectorial se realiza la conexión o desconexión de este banco ajustándose al sistema y sus necesidades.

Es vital compensar los efectos inductivos y capacitivos de la red eléctrica para aumentar la eficiencia y la calidad de la energía generada [22].

### 3.2 Casos de estudio

#### 3.2.1 Sistema de prueba con inversión SVPWM

Previo al análisis realizado en el sistema de prueba mencionado, se implementa el control de espacio vectorial para la barra número 16, cuyo factor de potencia es el más bajo del sistema.

Mediante la transformación de la variable del voltaje en un sistema de coordenadas bidimensional se modula una nueva señal que contiene menos corrientes reactivas y una onda de tensión más cercana a la sinusoidal pura, lo que se traduce en una mejora en el factor de potencia [23].

En la figura 3 y figura 4 se aprecia la conversión de la señal de entrada (voltaje) en una señal adaptable para la lectura del controlador, es decir, módulo-ángulo.

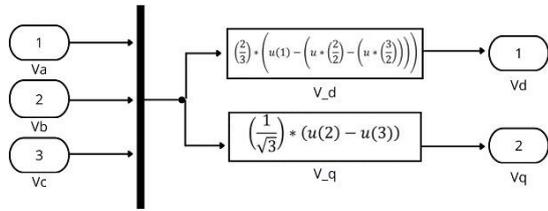


Figura 3. Conversión voltajes en señales modulares.

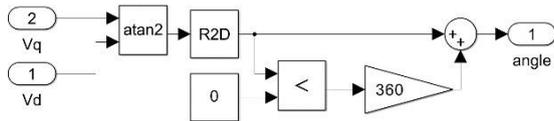


Figura 4. Obtención del ángulo para las señales

En base a la nueva señal, en la figura 5 se realizan arreglos con funciones matemáticas que nos permite la modulación de los tiempos para el control de espacio vectorial.

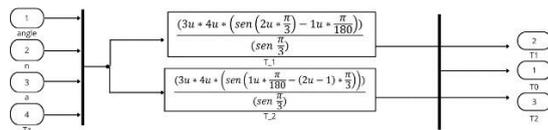


Figura 5. Modulación de tiempos.

Con los tiempos modulados, en la figura 6 se requiere de funciones matemáticas que produzcan cuatro pulsos que gobernarán los seis inversores

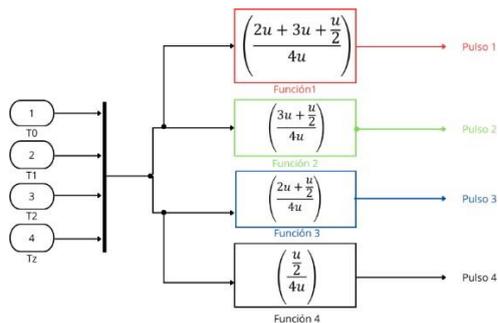


Figura 6. Modulación de pulsos

Mediante el uso de comparadores en la figura 7 se producen los pulsos finales para las entradas de los inversores de potencia, ajustándose a la señal de entrada y realizando un control dinámico del sistema.

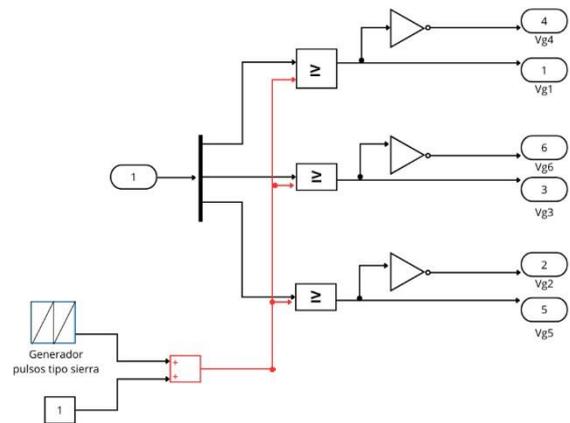


Figura 7. Comparador para pulsos finales.

### 3.2.2 Sistema de prueba con inversión SPVWM y compensador dinámico

Para la máxima eficiencia en la compensación del factor de potencia mediante el control proporcional integral se controla la conexión y desconexión de un banco capacitivo que inyecta una potencia reactiva de 80000 VAR [24].

En la figura 8 se evidencia la señal de control para el interruptor tiene como referencia a la diferencia entre potencia reactiva medida en el sistema y 0.01, se descomponen tres señales a las cuales se aplican factores de integración y derivación.

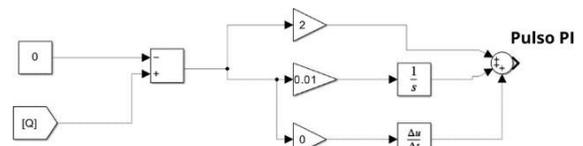


Figura 8. Controlador Proporcional integral.

En la figura 9 las tres señales serán comparadas con referencias según la forma de onda de la potencia reactiva para un control eficaz de los pulsos a la salida cuyos valores pueden ser 1 para un circuito cerrado y 0 para un circuito abierto.

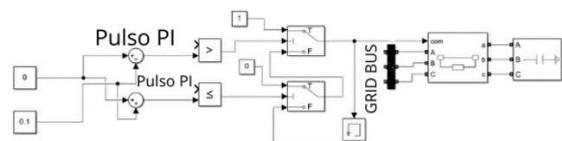


Figura 9. Generador de pulsos.

### 3.2.3 Sistema de prueba con inversión SVPWM, compensador dinámico y cargas dinámicas.

Para la verificación del funcionamiento dinámico del controlador se implementan 3 cargas fijas de mayor valor con respecto a la de la carga en la barra seleccionada, con una potencia activa de 13,5 [Kw] y una potencia reactiva de 750 [Kvar] [25].

En la figura 10 se establece una apertura de 0.25, 0.5 y 0.75 segundos respectivamente, las cargas se incorporan al sistema periódicamente afectando de manera general al sistema y de manera principal a la barra 16 [26].

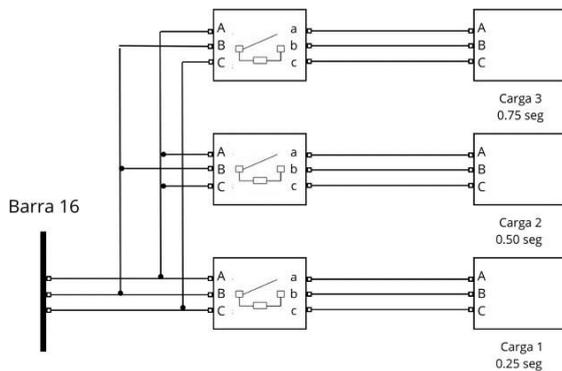


Figura 10. Cargas dinámicas.

## 4 Análisis de resultados

El método propuesto para el mejoramiento del factor de potencia se ha realizado bajo diferentes escenarios, cuyos resultados se muestran a continuación. Además, se calculan los valores medios de todas las variables relevantes para evaluar con precisión el impacto de los resultados. Para este estudio se realizará tres casos de comparación entre las variables de interés en cada uno de los escenarios, empezando por la incorporación del SVPWM, la implementación del control dinámico de compensador reactivo y la incorporación de cargas dinámicas.

### 4.1 Incorporación SVPWM

Se realiza el dimensionamiento de la central de generación distribuida, cuyo valor de potencia activa inyectada es de 2 MW, acoplado por un transformador que mantiene el perfil de voltaje a niveles nominales de la red para evitar desbalances.

#### Factor de Potencia

En la figura 11 se presenta de manera general el factor de potencia en las barras, sin embargo, por el ajuste en la escala se desprecian los datos de la barra 16 que se encuentra detallado en la figura 12

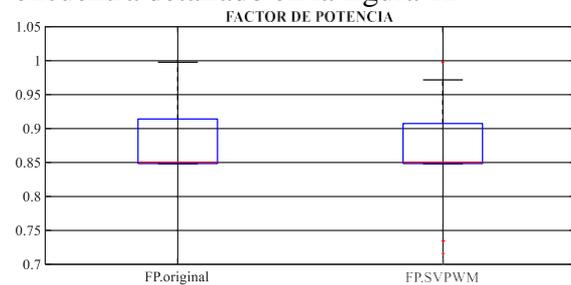


Figura 11. Boxplot factor de potencia.

En la figura 12. Se comparan los valores iniciales del sistema, el FP en la tabla 2. Se evidencia un incremento del factor de más del 60% con respecto al valor original del sistema.

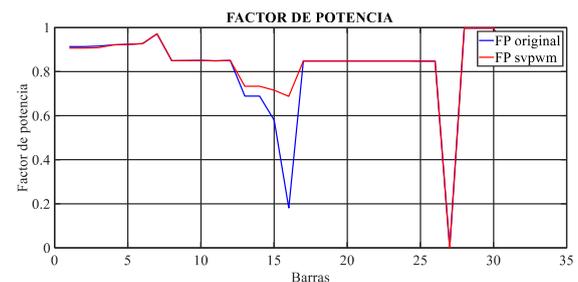


Figura 12. Factor de potencia

#### Perfil de voltaje

Al realizar el acoplamiento adecuado se verifica el incremento en la figura 13 del nivel de tensión de no más del 1%. Se evidencia estabilidad en las variables a nivel general.

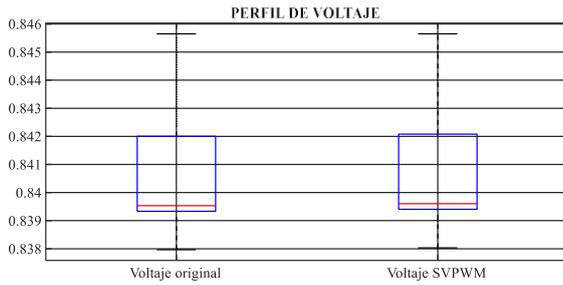


Figura 13. Boxplot perfil de voltaje.

Para la figura 14 se consideran los valores iniciales del sistema para el perfil de voltaje detallados en la tabla 1. Se observa un incremento del perfil de voltaje de no más del 1% con respecto al valor original del sistema sin ningún desbalance, especialmente en la barra 16

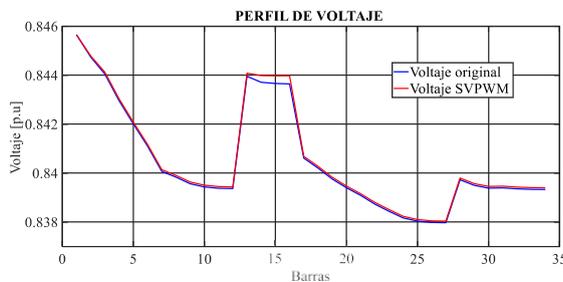


Figura 14. Perfil de voltaje.

## 4.2 Incorporación de compensación dinámica.

Para el óptimo mejoramiento del factor de potencia se implementó un banco capacitivo que inyecta al sistema dinámicamente potencia reactiva de hasta 80 [Kvar] [27].

### Factor de Potencia

En la figura 15 se realizan tres comparaciones entre el sistema original, el sistema junto con el inversor y el sistema junto al inversor y el compensador. Se considera la pérdida de datos mencionada en la figura 11.

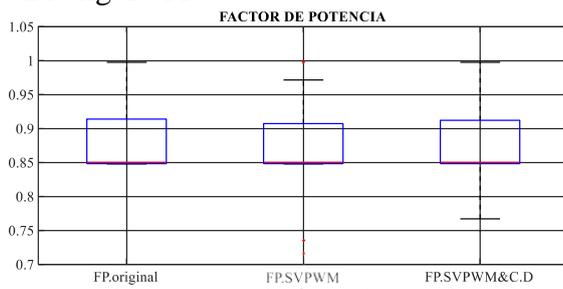


Figura 15. Boxplot factor de potencia.

Al trabajar junto con el compensador reactivo el factor de potencia se ve aún más afectado positivamente tanto como por la potencia activa inyectada como por la potencia reactiva disminuida por el banco capacitivo.

En la figura 16 el efecto del compensador en el sistema se evidencia con un incremento del 14% en el factor de potencia de la barra 16 con respecto al sistema con la implementación del sistema controlado de generación distribuida, y un incremento del 300% con respecto al sistema original.

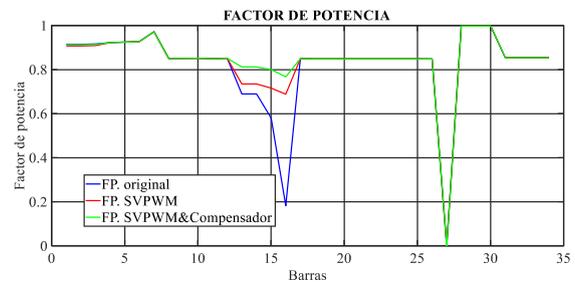


Figura 16. Factor de potencia.

### Perfil de voltaje

En la figura 17 se evidencia un ligero aumento en el perfil de voltaje de no más del 2% a nivel del sistema en general en comparación a todos sus valores anteriores

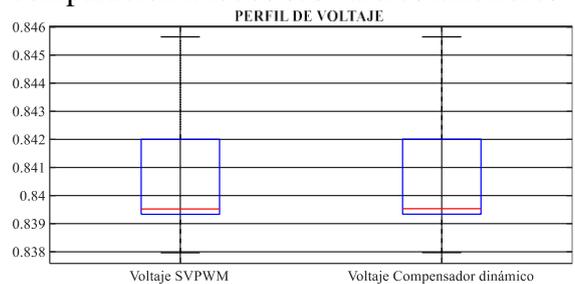


Figura 17. Boxplot perfil de voltaje.

La compensación dinámica se refleja directamente en el aumento del factor de potencia, sin embargo, en la figura 18 se evidencia una estabilidad y un incremento en los valores del perfil de voltaje del 0.5% en todas las barras con respecto al sistema aplicado el control de espacio vectorial.

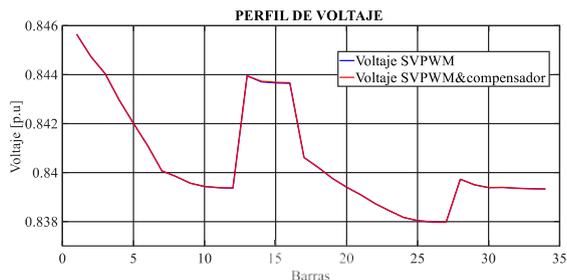


Figura 18. Perfil de voltaje SVPWM-Compensador.

### 4.3 Incorporación de cargas dinámicas.

La capacidad del sistema SVPWM y del compensador dinámico para mantener un comportamiento estable en condiciones y cargas variables se demuestra con la adición de tres cargas adicionales del mismo tamaño que la barra elegida. La resistencia del sistema a la adición de nuevas cargas y su flexibilidad para adaptarse refuerzan su fiabilidad [28].

#### Factor de Potencia

En la figura 19 se demuestra el correcto funcionamiento del compensador dinámico al estabilizar el factor de potencia en la barra 16, donde se conectan las cargas dinámicas.

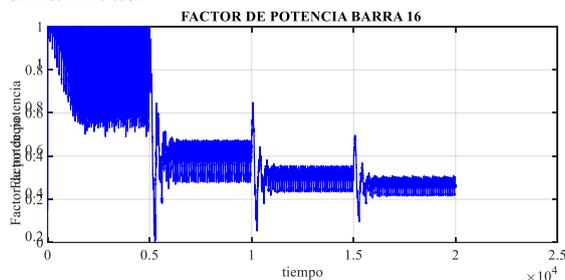


Figura 19. Efecto de control ante cargas dinámicas

En la figura 20 se evidencia que pese al escenario de cargas dinámicas se evidencia el mejoramiento del factor de potencia en la barra seleccionada.

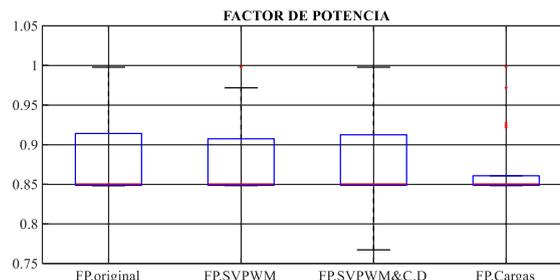


Figura 20. Boxplot factor de potencia.

Ante la imponente perturbación realizada, en la figura 21 el factor de potencia decrece en un 30% con respecto a los analizados anteriormente, sin embargo, aumenta un 30% respecto al factor de potencia original.

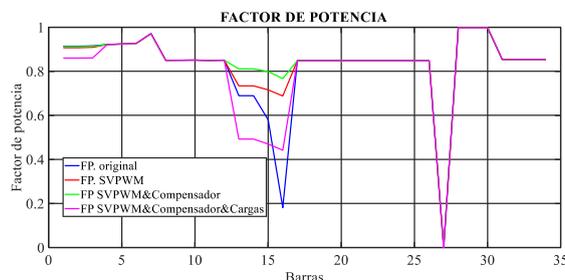


Figura 21. Factor de potencia-Cargas dinámicas.

#### Perfil de voltaje

Gracias a la figura 22 sabemos que, a pesar de la perturbación con las tres cargas dinámicas, el perfil de voltaje en por unidad refleja una reducción despreciable del 1% a nivel general, que no afectara a ningún elemento conectado en el sistema.

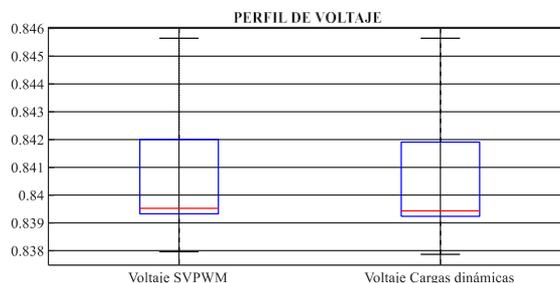


Figura 22. Boxplot perfil de voltaje.

Como la implementación de la carga en la barra seleccionada es cuatro veces mayor que su valor inicial, en la figura 23 se evidencia un decremento de menos del 2%

en el perfil de voltaje, principalmente en la barra 16, donde se conectan dichas cargas.

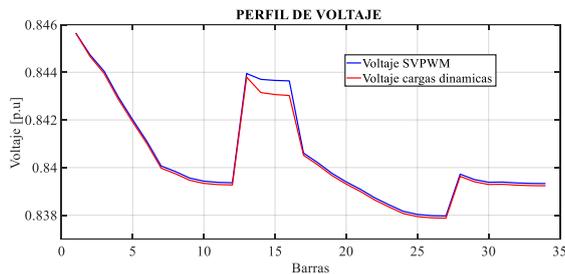


Figura 23. Perfil de voltaje SVPWM-Cargas dinámicas.

## 5 Conclusiones

La implementación del control de espacio vectorial en el sistema de estudio ha demostrado ser altamente efectiva en mejorar el factor de potencia de la barra de conexión, específicamente en la barra 16. En el caso 2, que incorpora compensadores dinámicos, se logró un notable incremento del factor de potencia, alcanzando un valor de 0.76. En comparación, el caso 1, que solo utiliza el control de espacio vectorial, también evidenció mejoras significativas con un factor de potencia de 0.68.

Sin embargo, en el caso 3, enfrentando perturbaciones elevadas, el factor de potencia experimentó una disminución con respecto a los anteriores casos, pero aun así mayor que el original, alcanzando un valor de 0.44.

Además de esto, es importante destacar que la implementación del control de espacio vectorial ha contribuido a mantener la estabilidad y mejorar el perfil de voltaje en la barra 16 en todos los casos, excepto por la ligera disminución del menos del 1% en el escenario más desafiante del caso 3.

Estos resultados avalan la utilidad y eficacia del control de espacio vectorial como técnica para mejorar el rendimiento del sistema eléctrico, aunque es importante tener muy en cuenta las graves

circunstancias que podrían darse durante las grandes perturbaciones.

## 6 Referencias

- [1] A. von Meier, *Electric power systems*, vol. 565. 2015. doi: 10.1007/978-3-662-44160-2\_2.
- [2] B. Zhang and D. Qiu, *M-Mode SVPWM technique for power converters*. 2019. [Online]. Available: [http://93.174.95.29/\\_ads/11A6D08E5EE5739EC169A6E2E548BCF1](http://93.174.95.29/_ads/11A6D08E5EE5739EC169A6E2E548BCF1)
- [3] M. Khalid, A. Mohan, and A. C. Binoj Kumar, "Performance Analysis of Vector controlled PMSM Drive modulated with Sinusoidal PWM and Space Vector PWM," *2020 IEEE Int. Power Renew. Energy Conf. IPRECON 2020*, 2020, doi: 10.1109/IPRECON49514.2020.9315210.
- [4] M. S. Rahman, A. Memy, M. A. Mahmud, and S. Siddique, "Automatic Power Factor Measurement and Improvement Using Capacitor Bank," *2022 IEEE Int. Power Renew. Energy Conf. IPRECON 2022*, pp. 1–6, 2022, doi: 10.1109/IPRECON55716.2022.10059553.
- [5] D. Pubudunee and S. Ediriweera, "A Case Study on Improvement of Power Factor of an Industrial Load," *ISMEE 2021 - 2021 3rd Int. Symp. Mater. Electr. Eng. Conf. Enhancing Res. Qual. F. Mater. Electr. Eng. a Better Life*, pp. 32–36, 2021, doi: 10.1109/ISMEE54273.2021.9774209.
- [6] T. Gonen, *Electric Power Distribution Engineering*, 3rd ed., vol. 1. Boca Raton: Taylor & Francis Group, LLC, 2014. [Online]. Available: [www.ebook3000.com](http://www.ebook3000.com)

- [7] D. Beltrán, M. Benites, and K. Rojas, "Análisis de sistemas de distribución de las empresas concesionarias de distribución eléctrica públicas del ámbito FONAFE," *Rabit J. Teknol. dan Sist. Inf. Univrab*, vol. 1, no. 1, p. 2019, 2019, [Online]. Available: <http://www.ghbook.ir/index.php?name=های رسازه و فرهنگ>  
 &option=com\_dbook&task=readonline&book\_id=13650&page=73&chkehashk=ED9C9491B4&Itemid=218&lang=fa&tmpl=component%0Ahttp://www.albayan.ae%0Ahttps://scholar.google.co.id/scholar?hl=en&q=APLIKASI+PENGENA
- [8] E. Inga, W. Pavón, S. Simani, and W. Chamorro, "Optimal Secondary and Tertiary Hierarchical Control for Photovoltaic System Generation Using a Heuristic Approach," *Electr. Eng. Green Energy*, pp. 198–203, 2023.
- [9] T. Short, *Electric Power Distribution Equipment and Systems*. 2018. doi: 10.1201/9781420036473.
- [10] J. Coto, *ANÁLISIS DE SISTEMAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA*, vol. 2. 2019.
- [11] N. Changuán, "Corrección del factor de potencia en las instalaciones de la editora nacional," p. 87, 2001.
- [12] B. Liu, J. Liu, Z. Liu, T. Wu, and R. An, "An accurate power control scheme for droop-controlled grid-connected inverters," *Conf. Proc. - IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo. - APEC*, vol. 2018-March, pp. 2374–2378, 2018, doi: 10.1109/APEC.2018.8341348.
- [13] G. Holmes and T. Lipo, *Pulse width modulation for power converters principles and practice*. 2003.
- [14] S. Haq, S. P. Biswas, M. K. Hosain, M. A. Rahman, M. R. Islam, and S. Jahan, "A modular multilevel converter with an advanced pwm control technique for grid-tied photovoltaic system," *Energies*, vol. 14, no. 2, 2021, doi: 10.3390/en14020331.
- [15] E. B. Turner and C. P. Lemone, "Control of Voltage Source Inverters using PWM/SVPWM for Adjustable speed Drive Applications," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 25, no. 1, pp. 30–35, 1989, doi: 10.1109/28.18865.
- [16] G. Díaz, C. Peraza, F. Gonzalez-longatt, and C. Villanueva, "Control de inversores en sistemas de generación distribuida," *Ing. UC.*, vol. 12, pp. 29–39, 2005.
- [17] R. Mahmud and M. A. Rahman, "Proportional Integral Resonant Current Controller for Grid Connected Inverter in Distributed Generation System using SVPWM Technic," *Int. Conf. Comput. Commun. Chem. Mater. Electron. Eng. IC4ME2 2018*, pp. 1–4, 2018, doi: 10.1109/IC4ME2.2018.8465585.
- [18] E. Inga, A. Aguila, D. Carrión, W. Pavón, and M. Jaramillo, *Digital Technology for Smart Grid Innovative Algorithmic Solutions for Engineering Problems*, vol. 1. 2024.
- [19] S. Chreang and P. Kumhom, "A study of nonlinear DC and AC loads connected to PV microgrid," *Proc. 2018 5th Int. Conf. Bus. Ind. Res. Smart Technol. Next Gener. Information, Eng. Bus. Soc. Sci. ICBIR 2018*, pp. 309–313, 2018, doi: 10.1109/ICBIR.2018.8391212.
- [20] D. Wang, Y. Shen, Z. Shao, Z. Hu, L. Hao, and J. Zuo, "Quantitative Analysis of Key Influencing Factors of Renewable Energy Accommodation in Hunan Power Grid," *2021 Int. Conf. Smart City Green Energy, ICSCGE 2021*, pp. 36–40, 2021, doi:

- 10.1109/ICSCGE53744.2021.9654318.
- [21] N. N. Lopatkin, "New Implementation of Common-Mode-Voltage-Eliminating Nearest-Vector-Selecting Space Vector Control for Three-Phase Multilevel Inverter," *Proc. - Int. Ural Conf. Meas. Ural.*, vol. 2021-Septe, pp. 519–524, 2021, doi: 10.1109/UralCon52005.2021.9559495.
- [22] Y. I. Rey Sizalima, "Planificación Óptima De Compensación Reactiva Mediante Statcom Considerando La Expansión Del Sistema De Potencia Y Contingencias N-1," 2022.
- [23] A. Zaid, Z. Junhui, M. Emad, M. Junpeng, and S. Wensheng, "Novel direct power control of single-phase three-level SVPWM inverter for photovoltaic generation," *IEEE Power Energy Soc. Innov. Smart Grid Technol. Conf.*, 2017.
- [24] J. Ramirez, "COMPENSACIÓN REACTIVA EN REDES ELÉCTRICAS DE TRANSMISIÓN BASADO EN UBICACIÓN ÓPTIMA DE SVC Y CONTINGENCIA N-1," 2020.
- [25] A. Rouhani and A. Abur, "Real-Time Dynamic Parameter Estimation for an Exponential Dynamic Load Model," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 7, no. 3, pp. 1530–1536, 2016, doi: 10.1109/TSG.2015.2449904.
- [26] Y. Zhang, Y. Wu, Y. Xu, and J. Zhang, "Research of dynamic compensation method based on Hammerstein model for Wiener model sensor," *Chinese Control Conf. CCC*, pp. 1935–1939, 2013.
- [27] B. Liu, W. Wang, J. Cheng, X. Le, and Z. Wang, "Optimal Configuration Strategy of Dynamic and Static Reactive Power Compensation Equipment for DC Converter Station," *Asia-Pacific Power Energy Eng. Conf. APPEEC*, vol. 2020-Septe, 2020, doi: 10.1109/APPEEC48164.2020.9220551.
- [28] B. Zhang *et al.*, "A Distribution System State Estimation Analysis Considering the Dynamic Load Effect," *IEEE Reg. 10 Annu. Int. Conf. Proceedings/TENCON*, vol. 2018-October, no. October, pp. 2485–2489, 2018, doi: 10.1109/TENCON.2018.8650087.

## 6.1 Matriz de Estado del Arte

Tabla 5: Matriz de estado del arte.

MEJORAMIENTO DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN MEDIANTE EL USO DE CONTROL DE ESPACIO VECTORIAL EN INVERSORES DE POTENCIA.																											
ITEM	DATOS			TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA					SOLUCIÓN PROPUESTA						
	AÑO DE PUBLICACIÓN	TÍTULO DEL ARTÍCULO	NÚMERO DE CITAS PUBLISH OR PERISH SCHOLAR GOOGLE	Sistemas de distribución	Factor de potencia	Control en inversores de potencia	Control espacio vectorial	Corrección factor de potencia	Inversores de potencia	Generación distribuida	Control dinámico	Perfil de voltaje	Controlador P.I	Generación Distribuida	Casos puntuales	Corrección factor de potencia	Generación distribuida controlada	Control espacio vectorial	Inversores de potencia	Controladores P.I	Compensador reactivo	Cargas dinámicas	Control espacio vectorial	Controladores	Compensación dinámica	Cargas dinámicas	Generación distribuida
1	2020	Performance Analysis of Vector controlled PMSM Drive modulated with Sinusoidal PWM and Space Vector PWM,	20				✗	✗					✗				✗						✗	✗			
2	2014	Electric Power Distribution Engineering	2214	✗					✗			✗					✗										✗
3	2019	Análisis de sistemas de distribución de las empresas concesionarias de distribución eléctrica públicas del ámbito FONAFE,	1	✗						✗			✗				✗										✗
4	2018	Electric Power Distribution Equipment and Systems.	175	✗						✗			✗														✗
5	2015	Electric power systems	670		✗				✗					✗													✗
6	2022	Automatic Power Factor Measurement and Improvement Using Capacitor Bank,	3		✗				✗							✗											
7	2019	ANÁLISIS DE SISTEMAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA	41		✗				✗							✗											
8	2001	Corrección del factor de potencia en las instalaciones de la editora nacional.	0		✗				✗							✗											
9	2018	An accurate power control scheme for droop-controlled grid-connected inverters	6																								
10	2019	Sistema de control para inversor trifasico conectado a red,	0			✗			✗									✗									
11	2003	Pulse width modulation for power converters principles and practice	5061			✗			✗				✗					✗						✗			
12	2021	A modular multilevel converter with an advanced pwm control technique for grid-tied photovoltaic system	31			✗							✗			✗											✗



## 6.2 Resumen de Indicadores

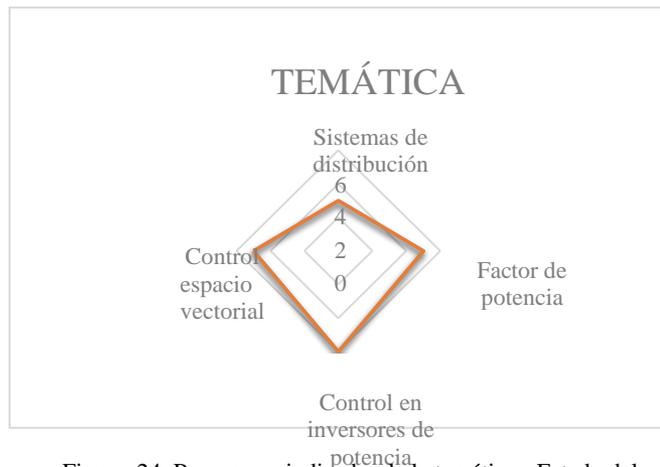


Figura 24. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte

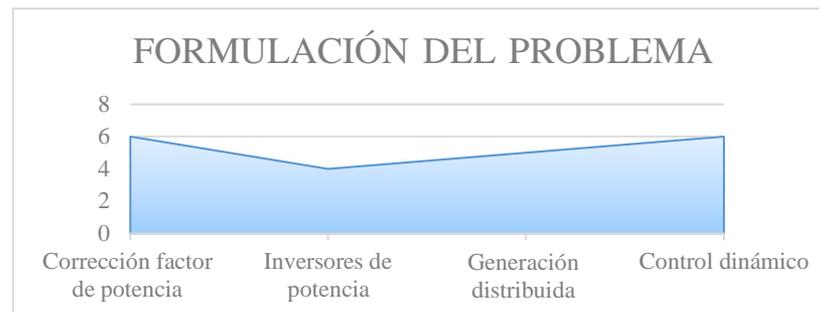


Figura 25. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.

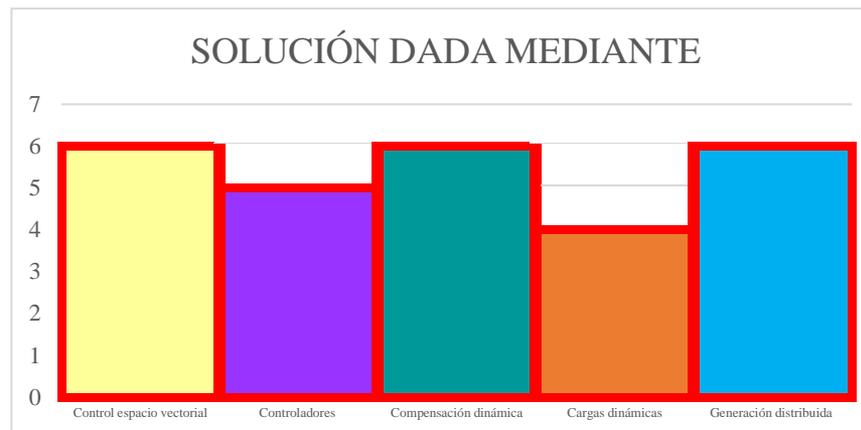


Figura 26. Indicador de solución - Estado del arte