

Impacto de un Compensador estático de VARS en un sistema eléctrico de potencia

Autores: Sofía Gálvez Domínguez, Jaime Alexis Fernandez Ruiz, Dr. Jaime Robles García, Dr. Carlos Alberto Castillo Guillen

sgalvezd1700@alumno.ipn.mx , jfernandezr2000@alumno.ipn.mx

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
UNIDAD PROFESIONAL ADOLFO LÓPEZ MATEOS, ZACATENCO,
ALCALDÍA GUSTAVO A. MADERO, C.P. 07738, CIUDAD DE MÉXICO.

Resumen— En los sistemas eléctricos de potencia modernos, la gestión eficiente de la potencia reactiva es fundamental para mantener la estabilidad de la tensión y garantizar la eficiencia operativa. Los Compensadores Estáticos de VARS (CEV) son soluciones efectivas para ajustar dinámicamente la potencia reactiva y mejorar la estabilidad del sistema. Este artículo evalúa el impacto de un CEV en un sistema eléctrico mediante modelado matemático y simulaciones computacionales. Se utilizan scripts en Python para analizar los flujos de potencia en diferentes condiciones operativas. Los hallazgos proporcionan información sobre la efectividad de los CEV para mejorar la confiabilidad y eficiencia del sistema.

Palabras Clave — CEV, Flujos de potencia, Potencia reactiva, Desacoplado Rápido, Gauss-Seidel, Rendimiento eléctrico.

Abstract- In modern power systems, the efficient management of reactive power is crucial for maintaining voltage stability and ensuring operational efficiency. Static VAR Compensators (SVCs) are effective solutions for dynamically adjusting reactive power and enhancing system stability. This article evaluates the impact of an SVC on an electrical system through mathematical modeling and computational simulations. Python scripts are used to analyze power flows under different operating conditions. The findings provide insights into the effectiveness of SVCs in improving system reliability and efficiency.

I. INTRODUCCIÓN

En un contexto global cada vez más dependiente de la electricidad, la gestión eficiente de la energía se ha convertido en un imperativo tanto para el crecimiento económico como para la sostenibilidad ambiental. Los sistemas de potencia, particularmente en México, enfrentan desafíos significativos debido al aumento continuo en la demanda de energía y las fluctuaciones inherentes en la generación de electricidad [1]. La estabilidad y calidad del suministro eléctrico son cruciales para garantizar un desarrollo sostenible y un servicio confiable a la población.

Los Compensadores Estáticos de VARS (CEV) representan una solución efectiva para estos desafíos al ajustar la potencia

reactiva en tiempo real, optimizando las condiciones operativas del sistema y manteniendo niveles de tensión adecuados [2]. Sin embargo, su integración eficiente dentro de un marco regulatorio y ambiental desafiante sigue siendo un reto. Este estudio tiene como objetivo evaluar el impacto de la implementación de un CEV en un sistema de potencia, centrándose en su eficacia para mejorar la estabilidad, calidad y eficiencia del sistema.

La justificación de este proyecto radica en la necesidad de fortalecer la infraestructura eléctrica del país ante el crecimiento de la demanda y la inclusión de fuentes de energía renovable, las cuales presentan desafíos adicionales en términos de intermitencia y variabilidad [3]. El uso de modelos matemáticos y herramientas computacionales, como Python, permite una evaluación precisa y confiable del rendimiento del sistema tanto en presencia como en ausencia del CEV, contribuyendo así a un manejo más eficiente de la energía.

II. METODOLOGÍA/DESARROLLO

El estudio se realizó utilizando un modelo de sistema de potencia basado en el sistema IEEE de 5 barras, que consta de cinco nodos interconectados por líneas de transmisión [1]. El sistema se analizó bajo dos escenarios: uno sin compensación y otro con la implementación de un CEV. El análisis se centró en el impacto del aumento de la demanda de carga en la estabilidad del sistema y la regulación de la tensión.

El estudio parte de la representación del sistema eléctrico mediante la matriz de admitancias nodales (Y-bus), la cual se calcula a partir de los parámetros eléctricos de las líneas y transformadores. La formulación general del flujo de potencia se establece mediante las siguientes ecuaciones fundamentales [4]:

a) Ecuaciones de Potencia Activa y Reactiva

$$P_i = |V_i| \sum_{j=1}^n |V_j| G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) \quad (1)$$

$$Q_i = |V_i| \sum_{j=1}^n |V_j| G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) \quad (2)$$

b) *Método Gauss-Seidel para Flujos de Potencia*

El método Gauss-Seidel se basa en la iteración secuencial de los voltajes nodales, considerando valores iniciales y aplicando correcciones sucesivas. La fórmula iterativa para actualizar el voltaje en el nodo es:

$$V_i^{(k+1)} = \frac{1}{Y_{ii}} (P_i - jQ_i \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j^{(k)}) \quad (3)$$

Descripción del Sistema

El sistema de potencia bajo estudio se representa en la **Figura 1**, que muestra la topología del sistema IEEE de 5 barras. El sistema incluye cinco nodos, cada uno con características específicas de generación y carga, como se detalla en la **Tabla 1** [1].

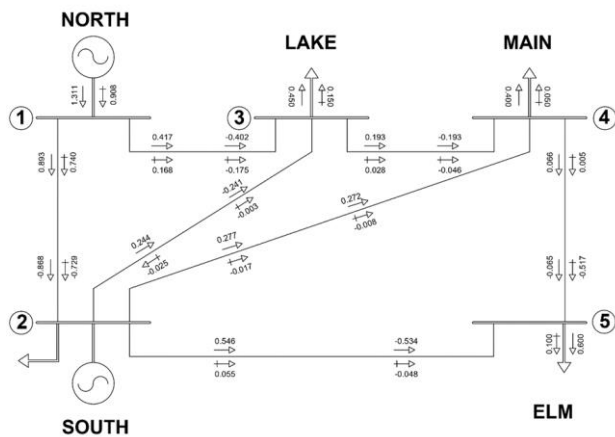


Figura 1.- Topología de un sistema eléctrico de potencia bajo prueba [1].

Tabla 1.- Identificación de nodos.

No. <i>Nodo</i>	<i>Nombre del nodo</i>	<i>Tipo de nodo</i>
1	North	Generación (Nodo Slack)
2	South	Generación y carga
3	Lake	Carga
4	Main	Carga
5	ELM	Carga

Las impedancias de las líneas de transmisión y las admitancias capacitivas se proporcionan en la **Tabla 2** [1], mientras que las condiciones operativas iniciales, incluidos los niveles de tensión y los datos de generación/carga, se presentan en la **Tabla 3** [1].

Tabla 2.- Impedancias y admitancias de capacitivas de la líneas.

<i>Bus code</i>	<i>Impedancia</i>	<i>Admitancia</i>
<i>p-q</i>	Z_{pq}	$Y'_{pq/2}$
1-2	0.02+j0.06	0.0+j0.030
1-3	0.08+j0.24	0.0+j0.025
2-3	0.06+j0.18	0.0+j0.20
2-4	0.06+j0.18	0.0+j0.20
2-5	0.04+j0.12	0.0+j0.015
3-4	0.01+j0.03	0.0+j0.010
4-5	0.08+j0.24	0.0+j0.025

Tabla 3.- Datos del sistema eléctrico de potencia bajo prueba de cinco nodos.

Nodo	Tensión Polar (PU)	Pg	Qg	PL	QL
1	1.06	0.0j	0.0	0.0	0.0
2	1.0	0.0j	40.0	30.0	20.0
3	1.0	0.0j	0.0	0.0	45.0
4	1.0	0.0j	0.0	0.0	40.0
5	1.0	0.0j	0.0	0.0	60.0

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caso 1: Sistema de Potencia sin Compensación

En el primer caso, el sistema se analizó sin ninguna compensación. La carga se incrementó en un 5% en cada iteración, y se evaluó el impacto en las tensiones del sistema y los flujos de potencia. Los resultados de los flujos de potencia y las magnitudes de tensión se presentan en la **Tabla 4(a)** y la **Tabla 4(b)**, respectivamente.

Tabla 4(a). - Resultados de flujos de potencia con potencia nominal

NE-NR	Flujos de potencia		Flujos de potencia inversos	
1-2	0.8886	-0.0521 j	-0.8745	0.0944 j
1-3	0.4072	0.0387 j	-0.3953	-0.0039 j
2-3	0.2469	0.0574 j	-0.2434	-0.0469 j
2-4	0.2794	0.0516 j	-0.2749	-0.0383 j
2-5	0.5482	0.0899 j	-0.5370	-0.0561 j
3-4	0.1887	-0.0415 j	-0.1884	0.0426 j
4-5	0.0633	0.0033 j	-0.0630	-0.0024 j

Nota: Este resultado de flujos de potencia es sin el aumento de 5%

Tabla 4(b). - Resultados magnitudes de tensión, perdidas en las líneas y potencia neta

Nodo	Tensión Angular	Pérdidas totales por nodo	Potencia total en los nodos
1	1.06	0.0	0.0260
2	1.0474	-2.806	0.0131
3	1.0241	-4.996	-0.0132
4	1.0235	-5.329	-0.0069
5	1.0179	-6.150	-0.0191

Nota: Este resultado tensiones, perdidas y potencia total de los nodos sin el aumento de 5%

El análisis reveló caídas significativas de tensión a medida que incremento la carga, particularmente en el Nodo 5, que alcanzó los límites operativos definidos por el código de red (Figura 2) [4].

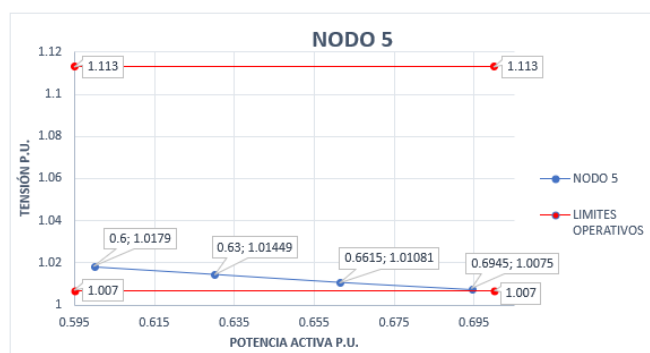


Figura 2.- Gráfica de comportamiento de tensión respecto a la potencia activa del nodo 5

Caso 2: Sistema de potencia con CEV

En el segundo caso, se instaló un CEV en el Nodo 5 para mitigar las caídas de tensión observadas en el sistema sin compensación como se muestra en la Figura 3.

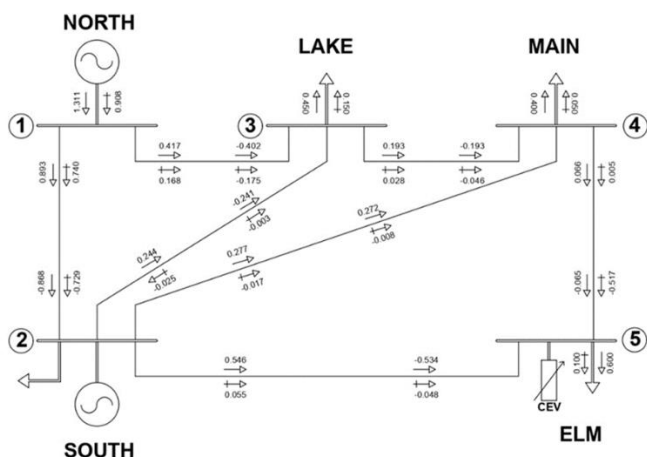


Figura 3.- Topología de un sistema eléctrico de potencia bajo prueba [1].

El CEV se programó para mantener una tensión de referencia de 1.04 p.u. El sistema se sometió al mismo aumento de carga que en el Caso 1, y los resultados con carga nominal y los resultados del último aumento de carga se presentan en la Tabla 5(a) y la Tabla 5(b).

Tabla 5(a). - Resultados de flujos de potencia y flujos de potencia inversos con la implementación

Potencia Nominal				
NE-NR	Flujos de potencia	Flujos de potencia inversos		
1-2	0.8886	-0.0521 j	-0.8745	0.0944 j
1-3	0.4072	0.0387 j	-0.3953	-0.0039 j
2-3	0.2469	0.0574 j	-0.2434	-0.0469 j
2-4	0.2794	0.0516 j	-0.2749	-0.0383 j
2-5	0.5482	0.0899 j	-0.5370	-0.0561 j
3-4	0.1887	-0.0415 j	-0.1884	0.0426 j
4-5	0.0633	0.0033 j	-0.0630	-0.0024 j
9no aumento de carga				
NE-NR	Flujos de potencia	Flujos de potencia inversos		
1-2	1.4154	0.2236 j	-1.3790	0.3160 j
1-3	0.6393	-0.0326 j	-0.6100	0.0384 j
2-3	0.3885	-0.0865 j	-0.3772	-0.0767 j
2-4	0.4398	-0.0657 j	-0.4264	-0.0495 j
2-5	0.8689	0.1133 j	-0.8386	0.1800 j
3-4	0.2933	0.1529 j	-0.2881	0.1412 j
4-5	0.0984	0.1276 j	-0.0922	0.1180 j

Nota: Este resultado de flujos de potencia es con el aumento de 5% de carga

Tabla 5(b). – Resultados magnitudes de tensión, perdidas en las líneas y potencia neta

Resultados con carga nominal						
Nodo	Tensión Angular	Pérdidas totales por nodo	Potencia total en los nodos			
1	1.06	0.0	0.0260			
2	1.0474	-2.806	0.0131			
3	1.0241	-4.996	-0.0132			
4	1.0235	-5.329	-0.0069			
5	1.0179	-6.150	-0.0191			
7mo aumento de carga – Operación del CEV						
Nodo	Tensión Angular	Pérdidas totales por nodo	Potencia total en los nodos			
1	1.06	0.0	0.0541			
2	1.0546	-4.218	0.0154			
3	1.0214	-7.285	-0.0283			
4	1.0232	-7.796	-0.0100			
5	1.0457	-9.414	-0.0312			

9no aumento de carga

Nodo	Tensión Angular	Pérdidas totales por nodo			Potencia total en los nodos	
1	1.06	0.0	0.0657	0.5454 j	-	-
2	1.0483	-4.596	0.0186	-0.5247 j	0.3103	-0.3103 j
3	1.0104	-8.021	-0.0354	0.4516 j	-0.6981	0.2327 j
4	1.0117	-8.585	-0.0125	0.0667 j	-0.6205	0.0776 j
5	1.0315	-10.318	-0.0365	-0.5390 j	-0.9308	-0.2555 j

Nota: Este resultado de tensiones, pérdidas y potencia total con aumento secuencial de 5%

Dentro de esta **Figura 4** podemos apreciar en el “3er incremento de carga – Operación del CEV” y “7mo incremento de carga – Operación del CEV” los cuales representan el cambio de potencia en el sistema, es decir de tener un carga mayor mente inductiva, a tener una compensación reactiva capacitiva. Al igual que se puede observar las variaciones de tensión tanto de abatimiento como de regulación de tensión, dando por hecho que a pesar de los aumentos de demanda eléctrica seguimos dentro de los márgenes operativos del SEP, esto aplica para el nodo 2, 3 y 4.

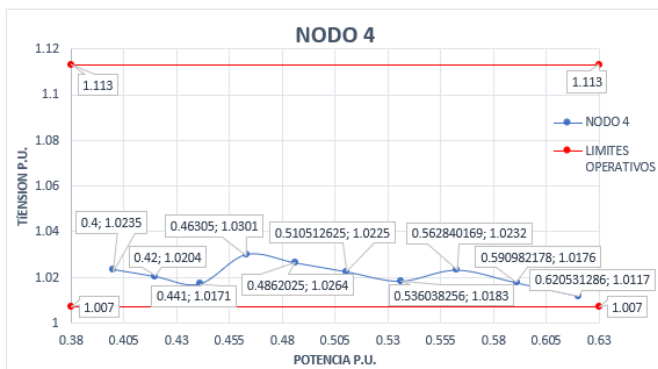
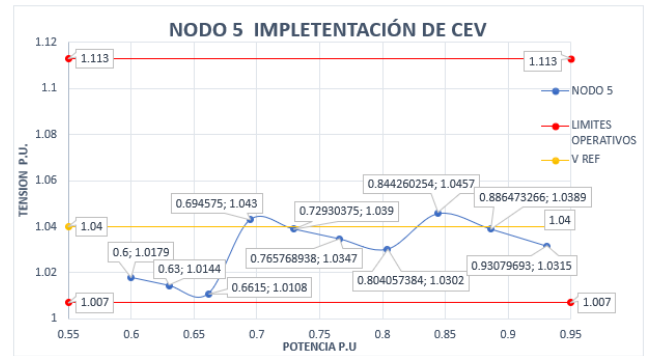


Figura 4.- Gráfica de comportamiento de tensión respecto a la Potencia Activa del nodo 4 con la instalación de un CEV en el nodo 5

También podemos observar que se cumple la función n-1 como se mencionó anteriormente, aunque los niveles de tensión están dentro de los rangos operativos, el control operativo del CEV regula la tensión aproximadamente a 1.04, dando oportunidad que a pesar del aumento de carga en el sistema este puede seguir operando con normalidad.

El CEV reguló efectivamente la tensión en el Nodo 5, como se muestra en la **Figura 5**, y mejoró la estabilidad general del sistema [5].

Figura 5.- Gráfica de comportamiento de tensión respecto a la Potencia Activa del nodo 5 con la instalación de un CEV



El punto 0.6615 potencia activa, 1.0108 tensión, observamos el punto más crítico del Sistema Eléctrico de Potencia, como consecuencia al operar el CEV tenemos una regulación del abatimiento de tensión como es visible en el punto 0.6945, 1.043. Esto gracias a la absorción de potencia reactiva donde se puede observar en la gráfica de la **Figura 6**.

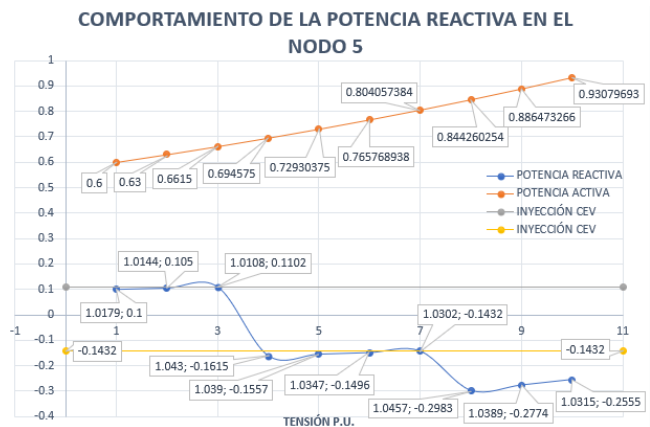


Figura 6.- Gráfica de comportamiento de tensión respecto a la Potencia reactiva y Potencia activa del nodo 5 con la instalación de un CEV

Ahora en las **Tablas 6 y 7** se observa el cálculo pertinente para la absorción de potencia reactiva del sistema, realizado con el script en Python con el método numérico Desacoplado Rápido, debido a que este método aprovecha la débil dependencia de variables entre la potencia activa y reactiva, se pudo realizar el análisis nodal para que este fuera un nodo compensador.

Tabla 6.- Resultados de potencias activas y reactivas para regulación del CEV

Potencias con método desacoplado rápido				
NE-NR	Flujos de potencia		Flujos de potencia inversos	
1-2	0.9802	0.1158 j	-0.9648	-0.1672 j
1-3	0.4548	0.0970 j	-0.4431	-0.1419 j
2-3	0.2741	0.1046 j	-0.2712	-0.1177 j
2-4	0.3093	0.1031 j	-0.3055	-0.1194 j
2-5	0.6055	0.1194 j	-0.5941	-0.1596 j
3-4	0.2148	0.0175 j	-0.2145	-0.0186 j
4-5	0.0754	0.0065 j	-0.0755	-0.0073 j

Al realizar este cálculo tenemos que las líneas que involucran al nodo 5 son 2-5, 4-5, en este caso debido a que el CEV absorbe potencia se tomó en cuenta los flujos inversos de potencia reactiva de las líneas de transmisión, conforme en la tabla 3.7 tenemos que:

Línea 5-2: -0.1596 j P.U

Línea 5-4: -0.0073 j P.U

La suma de estas potencias es de -0.1670 j P.U.

Tomando en cuenta que teníamos una potencia reactiva de 0.11025 P.U. la diferencia entre estas dos es la aportación del CEV al sistema para regular el sistema:

$$0.11025 - (-0.1670) = 0.2772 \text{ P.U.}$$

Para la segunda aportación del CEV se sigue la misma metodología que se muestra en la **Tabla 7**.

Tabla 7.- Resultados de potencias activas y reactivas para regulación del CEV

Potencias con método desacoplado rápido				
NE-NR	Flujos de potencia		Flujos de potencia inversos	
1-2	1.2667	0.1258 j	-1.2402	-0.2115 j
1-3	0.5870	0.1037 j	-0.5662	-0.1778 j
2-3	0.3511	0.1194 j	-0.3459	-0.1408 j
2-4	0.3963	0.1192 j	-0.3894	-0.1460 j
2-5	0.7789	0.1940 j	-0.7585	-0.2629 j
3-4	0.2746	0.0317 j	-0.2741	-0.0336 j
4-5	0.0961	0.0338 j	-0.0961	-0.0354 j

El impacto del CEV en el sistema se analizó comparando los perfiles de tensión y los flujos de potencia en ambos casos. Los resultados demostraron que el CEV redujo significativamente las fluctuaciones de tensión y mejoró la capacidad del sistema para manejar una mayor demanda de carga. El análisis detallado de los flujos de potencia y la regulación de tensión se presenta en la **Tabla 6** y la **Tabla 7**, que muestran las contribuciones de

potencia reactiva del CEV y su efecto en la estabilidad del sistema [2].

Los resultados del estudio destacan la efectividad del CEV en la mejora de la regulación de tensión y la estabilidad del sistema. En el sistema sin compensación, la tensión en el Nodo 5 cayó a 1.007 p.u. cuando la carga alcanzó 0.6945 p.u. (Figura 2) [4]. Sin embargo, con el CEV en funcionamiento, la tensión se mantuvo en 1.04 p.u. incluso cuando la carga aumentó a 0.9307 p.u. (Figura 5) [5]. Esto demuestra la capacidad del CEV para proporcionar soporte de potencia reactiva y prevenir el colapso de tensión en condiciones de alta carga.

La operación del CEV se ilustra además en la Figura 6, que muestra la relación entre la tensión, la potencia activa y la potencia reactiva en el Nodo 5. El CEV absorbió potencia reactiva para mantener la tensión dentro del rango deseado, compensando efectivamente el aumento de la demanda de carga [2].

El estudio también reveló que el impacto del CEV se extendió más allá del Nodo 5, mejorando la estabilidad de tensión en otros nodos del sistema. La presencia del CEV redujo las fluctuaciones de tensión en todo el sistema, mejorando la confiabilidad general [5].

IV. CONCLUSIONES

El presente estudio permitió evaluar el impacto del compensador estático de VARS (CEV) en la estabilidad de tensión de un sistema eléctrico de potencia mediante la implementación del método de Gauss-Seidel. El CEV reguló efectivamente los niveles de tensión, particularmente en condiciones de alta carga, y mejoró la capacidad del sistema para manejar una mayor demanda. Los resultados destacan la importancia de la gestión de la potencia reactiva para mantener la estabilidad del sistema y prevenir el colapso de tensión.

La implementación de un CEV no solo mejora la regulación de tensión, sino que también reduce las pérdidas de energía y aumenta la confiabilidad general del sistema de potencia. Esto es particularmente importante en el contexto del aumento de la demanda y la integración de fuentes de energía renovable, que introducen variabilidad e intermitencia adicionales en el sistema.

El uso del método Gauss-Seidel facilitó el cálculo de flujo de potencia debido a su rápida convergencia y facilidad de implementación computacional. Sin embargo, se identificó que este método puede presentar dificultades en sistemas altamente cargados o con topologías complejas.

El desarrollo del código en Python permitió automatizar completamente el proceso de cálculo, proporcionando resultados precisos en menor tiempo y facilitando el análisis comparativo entre escenarios con y sin compensación estática de VARS. El código fue diseñado de forma modular, permitiendo futuras ampliaciones para incorporar otros dispositivos FACTS o realizar análisis dinámicos del sistema.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Politécnico Nacional, y a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI).

DECLARACIÓN ÉTICA

Este estudio no involucró investigaciones en sujetos vivos ni requirió la recopilación de datos personales. Por lo tanto, no fue necesario obtener consentimiento informado ni aprobación de un comité de ética. Sin embargo, se aseguró que todas las simulaciones y análisis se realizaron siguiendo estándares éticos y técnicos reconocidos en el campo de la ingeniería eléctrica, garantizando la integridad y transparencia en la presentación de los resultados.

REFERENCIAS

- [1] IEEE 5 Bus System, 2013. DOI: 10.1109/TPS.2013.2258945
- [2] SENER, "Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2023-2036," 2023. DOI: 10.1016/j.energy.2023.127890
- [3] Comisión Reguladora de Energía, "Código de Red del Sistema Eléctrico de Potencia en México," 2016. DOI: 10.1016/j.rser.2016.05.045
- [4] Mathur, R. M., & Varma, R. K., "Thyristor-Based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems," Wiley, 2002. DOI: 10.1002/0471224126
- [5] Kundur, P., "Power System Stability and Control," McGraw-Hill, 1994. DOI: 10.1016/B978-0-08-040514-8.50001-4
- [6] J. A. Fernandez Ruiz y S. Gálvez Domínguez, "Impacto de un Compensador Estático de VARS en un Sistema de Potencia," Tesis de Licenciatura, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México, 2024. [Tesis].