

Análisis Comparativo del Desempeño Dinámico de un CEV y un STATCOM bajo el Control de Potencia Reactiva en la Estabilidad de Tensión de un Sistema Eléctrico de Transmisión

Comparative Analysis of the Dynamic Performance of an SVC and a STATCOM under Reactive Power Control for Voltage Stability in an Electric Transmission System

Cabralés-Camacho, H. A.¹; Ortiz-Castillo, P. R.², García-Viveros H.³; Ruíz-Ponce, G. E.⁴

Datos de Adscripción:

¹Cabralés Camacho, Hassan Arturo
Instituto Tecnológico de La Laguna. Torreón, Coahuila. México.
ROR ID: <https://ror.org/00xbw4a70>
hacabralés@lalaguna.tecnm.mx
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3626-5180>

²Ortiz Castillo, Pablo Rogelio
Instituto Tecnológico de La Laguna. Torreón, Coahuila. México.
ROR ID: <https://ror.org/00xbw4a70>
hon.prortizc@lalaguna.tecnm.mx
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-6030-0442>

³García Viveros, Héctor
Instituto Tecnológico de La Laguna. Torreón, Coahuila. México.
ROR ID: <https://ror.org/00xbw4a70>
hgarcia@lalaguna.tecnm.mx
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5193-1276>

⁴Ruiz Ponce Gerardo Enrique
Instituto Tecnológico de La Laguna. Torreón, Coahuila. México.
ROR ID: <https://ror.org/00xbw4a70>
geruizp@lalaguna.tecnm.mx
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1423-4222>

Resumen - Este trabajo presenta un análisis comparativo del desempeño de un Compensador Estático Sincrónico (STATCOM) y un Compensador Estático de VAR (CEV) operando en modo de control de potencia reactiva; el objetivo es evaluar su contribución a la estabilidad de tensión en un sistema eléctrico de potencia. El estudio se realiza sobre un sistema sometido a condiciones de sobrecarga, cuyo límite operativo se determina mediante el método de flujos de potencia continuados usando la suite MATPOWER de MATLAB. Esta herramienta provee información de la matriz jacobiana y de los índices de participación normalizada, logrando identificar los nodos más sensibles a variaciones de carga. Con ello se define el punto crítico para la instalación de los Sistemas Flexibles de Transmisión de Energía en Corriente Alterna (FACTS). Posteriormente, se analiza el impacto de cada compensador sobre el perfil de tensión y la respuesta dinámica del sistema. Para ello, se simuló diferentes escenarios en estado estacionario para observar el comportamiento de las curvas Q-V. Para el análisis dinámico se implementaron diferentes niveles de cargabilidad críticos ante diferentes contingencias severas como sobrecargas puntuales, fallas de corto circuito trifásicas y desconexión de líneas con el propósito de evaluar las variables como la potencia reactiva en el punto de conexión (PCC), la dinámica de la tensión en buses críticos y el comportamiento angular de los generadores cercanos.

Palabras Clave - Cargabilidad, CEV, Compensación de Potencia Reactiva, Estabilidad de Tensión, FACTS, STATCOM.

Abstract - This paper presents a comparative performance analysis of a Static Synchronous Compensator (STATCOM) and a Static Var Compensator (SVC). Both devices operate in reactive power control mode to evaluate their contribution to voltage stability in an electrical power system. The study is performed on a system under high load conditions, using the Continuation Power Flow (CPF) method in the MATPOWER suite for MATLAB to determine its operating limit. This tool provides information regarding the Jacobian matrix and the normalized participation factors. This enables the identification of the most sensitive buses to load variations, thereby determining the critical location for the installation of Flexible AC Transmission System (FACTS) devices. Subsequently, the impact of each compensator on the voltage profile and the system's dynamic response is analyzed. To this end, various steady-state scenarios are simulated to observe the behavior of the Q-V curves. For the dynamic analysis, various critical loading levels were implemented under different severe contingencies, including localized overloads, three-phase short-circuit faults, and line outages. These analyses assess variables such as the reactive power at the Point of Common Coupling (PCC), the voltage dynamics at critical buses, and the rotor angle behavior of nearby generators.

Keywords - FACTS, Loadability, Reactive Power Compensation, SVC, STATCOM, Voltage Stability

I. INTRODUCCIÓN

El crecimiento sostenido de la demanda eléctrica ha llevado a que los sistemas eléctricos de potencia operen cada vez más cerca de sus límites de cargabilidad. Este entorno de operación incrementa la transferencia de potencia a través de las redes de transmisión, causando caídas de tensión, mayor demanda de potencia reactiva y una reducción del margen de estabilidad del sistema. Como consecuencia, los problemas asociados a la estabilidad de tensión se han convertido en una de las principales preocupaciones operativas en redes modernas, especialmente en aquellas con alta concentración de carga o con largas

distancias de transmisión (Taylor, 1994; Leonard, 2007; Tang, 2021).

De acuerdo con la literatura, los dispositivos de compensación reactiva surgen como una solución tecnológica clave para mitigar estos efectos (Rajarshee, 2015). En particular, los dispositivos FACTS, como el CEV y el STATCOM, permiten mejorar el perfil de tensión, incrementar el margen de estabilidad y optimizar la capacidad de transferencia de potencia del sistema (Jun, 2017; Meddeb, 2020). Su implementación contribuye a mantener niveles adecuados de voltaje bajo condiciones de alta carga y ante perturbaciones dinámicas, fortaleciendo la confiabilidad y la seguridad operativa del sistema eléctrico (Govind, 2024).

Resulta de interés analizar el desempeño de estas tecnologías bajo condiciones de cargabilidad crítica, con el fin de identificar sus ventajas operativas y su contribución al soporte de tensión en nodos vulnerables del sistema (Yan, 2023).

El análisis comparativo entre dispositivos FACTS orientados al soporte de potencia reactiva ha sido ampliamente abordado en la literatura, particularmente en la evaluación del desempeño entre compensadores basados en susceptancia controlada y compensadores basados en fuentes convertidoras de voltaje (VSC). Estos trabajos coinciden en que la incorporación de compensación dinámica permite mejorar el perfil de tensión, incrementar el margen de estabilidad y reducir el impacto de perturbaciones en sistemas eléctricos de potencia (Khaliq, 2014; Jun, 2017; Mosheer, 2020).

Diversas investigaciones han mostrado que ambos dispositivos contribuyen de manera efectiva a la regulación de tensión; sin embargo, presentan diferencias importantes en su respuesta dinámica. En particular, el compensador basado en VSC destaca por su capacidad de mantener la inyección de corriente reactiva aun en condiciones de baja tensión, proporcionando una mejor respuesta ante contingencias y mayor estabilidad transitoria (Govind, 2024), (Nazha, 2018).

Por otro lado, estudios aplicados en redes de distribución y transmisión han demostrado que, aunque los compensadores convencionales continúan siendo una solución viable para el control de tensión y la compensación de potencia reactiva, su desempeño puede verse limitado frente a variaciones rápidas de carga o disturbios severos, mientras que los compensadores síncronos ofrecen mayor flexibilidad operativa y capacidad de amortiguamiento (Rajarshee, 2015; Kumar, 2023).

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

2.1 Caso base – Entorno de Análisis.

El análisis se centra en la topología del sistema de 10 máquinas "New England Electric Power System" (IEEE 39 buses); este sistema representa una red de transmisión de tamaño intermedio con características dinámicas que representan condiciones reales de un sistema eléctrico de potencia. Este sistema modela la interconexión de una región con diversidad de generación y cargas.

Los datos eléctricos de líneas, transformadores y cargas están definidos en Anantha Pai, 1989. Estos datos permiten la validación y simulación de contingencias, la incorporación de cargas, fallas, o desconexiones, brindando una plataforma robusta para analizar la estabilidad de tensión bajo distintos

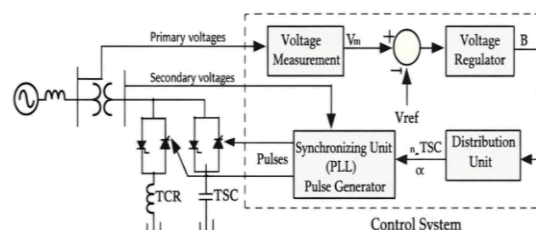
esquemas de compensación reactiva, mediante la intervención de dispositivos FACTS como lo son el STATCOM y el CEV. Asimismo, los modelos matemáticos de las máquinas síncronas fueron implementados en código mediante un esquema dinámico de 7 variables (modelo subtransitorio), capturando con mayor precisión la respuesta electromecánica y electromagnética ante perturbaciones severas. Además, las propias líneas de transmisión fueron representadas mediante el modelo equivalente en π , teniendo así una caracterización de los efectos de impedancia y susceptancia.

El sistema de 39 buses permite contrastar estas tecnologías en condiciones equivalentes de carga y perturbación, evaluando parámetros como la variación de voltaje en nodos débiles, la velocidad de recuperación, y la capacidad de soporte de cargabilidad antes del colapso de tensión.

Las figuras 1 y 2 presentan una comparación visual entre las arquitecturas de control del CEV y el STATCOM, destacando los componentes clave que definen su funcionamiento y capacidades.

Figura 1

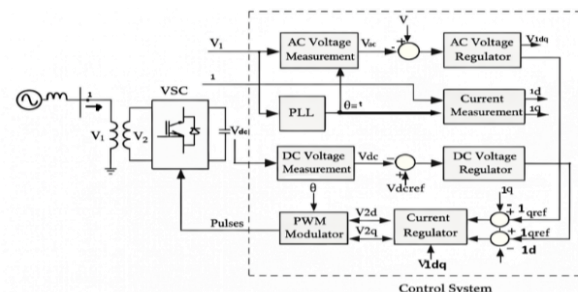
Esquema de control del CEV (Hingorani, 2000)



Como se observa en la figura 1, el CEV utiliza un sistema de control basado en el disparo de tiristores para regular la potencia reactiva. Está compuesto por una combinación de reactores controlados por tiristores (TCR) y condensadores conmutados por tiristores (TSC), los cuales se activan dependiendo de la necesidad del sistema (Sercan, 2008; Gole, 1990; Lefebvre, 1992). La tensión medida del sistema (V_m) se envía al regulador, donde se compara con una tensión de referencia (V_{ref}) y se ajusta el disparo de los dispositivos mediante una unidad de sincronización (PLL).

Figura 2

Esquema de control del STATCOM (Hingorani, 2000)



El STATCOM (figura 2) opera mediante la VSC que genera una tensión en sus terminales capaz de inyectar o absorber potencia reactiva, dependiendo de las condiciones de la red. Su funcionamiento se basa en la medición de tensión y corriente en

los lados AC y DC, un lazo de control de tensión (AC Voltage Regulator) y un regulador de corriente (Current Regulator) que maneja las componentes en cuadratura (V_q , V_d). Además, incorpora un modulador PWM para generar las señales de conmutación de la VSC.

Existen modelos de prueba mundialmente aceptados, como el sistema IEEE empleado en este estudio, que han sido ampliamente utilizados para la evaluación de fenómenos de estabilidad y desempeño dinámico en sistemas eléctricos de potencia, debido a su representatividad y validación en la literatura especializada (Anderson, 2003). El sistema eléctrico analizado (IEEE 39 Buses), corresponde a uno de estos modelos de referencia, el cual ha sido previamente validado mediante simulación y presenta resultados consistentes con los reportados en estudios similares (Anantha, 1989). Bajo condiciones base, el sistema muestra un comportamiento robusto y estable; de acuerdo con la base de datos del modelo y los resultados del flujo de potencia en operación nominal, los perfiles de tensión se mantienen dentro de rangos aceptables y no se observan violaciones en los límites operativos.

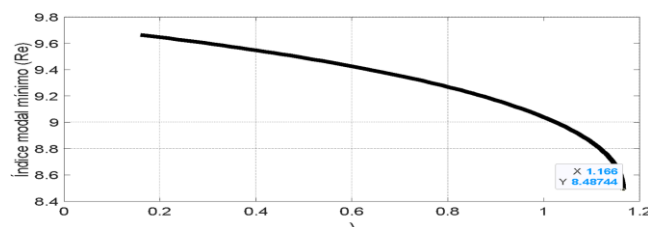
2.2 Caso de estudio – Estado Estacionario

Con el propósito de evaluar el comportamiento del sistema bajo condiciones más exigentes, se aplicó un factor de cargabilidad incremental mediante flujos de potencia continuados (CPF sus siglas en ingles), (Gutiérrez, 2004). Esta herramienta es utilizada en el análisis de estabilidad de tensión, ya que permite evaluar el comportamiento del sistema eléctrico conforme la demanda de carga se incrementa de manera progresiva. A diferencia del flujo de carga convencional, que proporciona una solución estática para un punto operativo específico, el CPF traza la trayectoria completa de operación del sistema mediante la introducción de un parámetro de cargabilidad (λ), el cual escala gradualmente la demanda de potencia. Este método se basa en técnicas de continuación numérica que permiten superar las limitaciones de convergencia de los algoritmos tradicionales cerca del punto de colapso, posibilitando así la obtención de la curva característica P-V o bien Q-V (dependiendo del estudio) y la identificación precisa del margen de estabilidad del sistema. El valor máximo del parámetro λ corresponde al límite de cargabilidad, punto en el cual el sistema pierde la capacidad de mantener niveles de tensión aceptables. Este procedimiento permitió llevar progresivamente al sistema hacia su límite operativo, incrementando la demanda de carga en toda la red. Como resultado, la zona que resultó atractiva para hacer el análisis es donde están localizados los generadores de los buses 31 y 39 (figura 4), siendo esta zona una de las que tienen mayor sensibilidad a la variación en la tensión con respecto al aumento de carga, teniendo una fuerte exigencia de potencia reactiva. Particularmente, en la zona identificada como crítica, los niveles de tensión y los flujos de potencia reactiva reflejan un estado de operación estable, sustentado por la proximidad de fuentes de generación y la adecuada capacidad de transmisión de las líneas asociadas. Esto confirma que, en su condición base, el sistema no presenta problemas estructurales de estabilidad de tensión y cuenta con suficiente soporte reactivo para satisfacer la demanda.

El método CPF se emplea también para determinar el nivel máximo de cargabilidad del sistema. Este análisis permitió determinar que el límite de cargabilidad global del sistema, considerando un reparto proporcional de generación, es de $\lambda = 1.166$ (figura 3). Dicho valor representa el punto de colapso de tensión, más allá del cual el sistema no puede mantener su estabilidad de tensión.

Figura 3

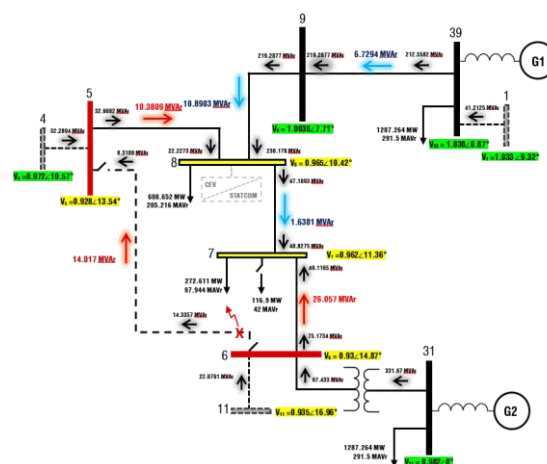
Índice modal mínimo del sistema vs. carga.



Con base en este resultado, se procedió a llevar el sistema a este nivel de cargabilidad que equivale a un 16.6% de carga adicional para realizar el estudio de estabilidad de tensión. Considerando este valor para el sistema eléctrico, la zona analizada tuvo una dinámica más crítica tal y como se muestra en la figura 4. Esta figura presenta esta zona con una condición que implica altas variaciones en los perfiles de tensión, mayores exigencias en la transmisión de potencia reactiva y un estado de mayor estrés en los generadores aledaños en comparación con otras zonas de la red. Lo anterior sugiere una mayor susceptibilidad de dicha área ante incrementos en la carga y una posible condición de riesgo frente a perturbaciones.

Figura 4

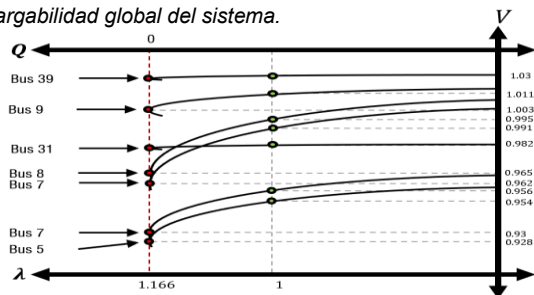
Zona crítica del sistema ante condiciones operativas de sobrecarga.



Mediante las curvas Q-V puede visualizarse gráficamente el comportamiento que tuvo el sistema ante la incorporación progresiva de carga hasta alcanzar el punto máximo de cargabilidad. Estas curvas permiten identificar la relación entre la potencia requerida en el nodo de estudio y la magnitud de tensión correspondiente, mostrando cómo, a medida que aumenta la demanda, el sistema necesita un mayor soporte reactivo para sostener niveles adecuados de tensión tal y como se puede visualizar en la figura 5.

Figura 5

Dinámica de curvas Q-V de los buses de la zona crítica ante el aumento de cargabilidad global del sistema.



Durante el incremento de carga, la trayectoria de las curvas exhibe una reducción gradual del margen de estabilidad, reflejada en la pendiente cada vez más pronunciada cercana al punto crítico. En esta región, pequeñas variaciones en la demanda provocan cambios significativos en la tensión, indicando una sensibilidad del sistema y una operación próxima al límite de estabilidad. El punto de bifurcación (mínimo) de la curva representa la condición de máxima cargabilidad, donde el sistema pierde su capacidad de encontrar un nuevo estado de equilibrio ante incrementos adicionales de carga.

La estrategia para corregir esta problemática que pone en riesgo la estabilidad de tensión en el sistema eléctrico se basa en identificar un punto estratégico para la instalación del dispositivo FACTS. La elección de este punto estratégico de esta zona crítica resulta en un bus que presenta una alta sensibilidad ante las variaciones de tensión en comparación con el resto de dicha zona. El punto que destacó en este análisis es el segundo nodo PQ con la mayor carga total en el sistema, registrando una demanda de 522 MW y 176 MVAR, pero con el aumento de cargabilidad este punto pasó a tener una carga de 608.652 MW y 205.216 MVAR, estamos hablando del bus 8. Dada la magnitud de esta carga y su ubicación estratégica dentro de la topología del sistema, este bus resultó ser el punto óptimo para la instalación de estos dos dispositivos FACTS tal y como se ve en la figura 4. Para el dimensionamiento de ambos compensadores (STATCOM y CEV) se consideró la magnitud de la demanda conectada en el bus 8, así como los flujos de potencia provenientes de las unidades generadoras G1 y G2. A partir de estas condiciones operativas se determinó una capacidad simétrica nominal de compensación de ± 300 MVA, de manera que el compensador pudiera cubrir los déficits reactivos en condiciones críticas sin saturarse. Tomando como referencia los parámetros base reportados para los modelos fasoriales del CEV y el STATCOM de ± 100 MVA, los parámetros para este estudio se presentan en las tablas 1 y 2 (Hingorani, 2000).

Tabla 1

Parámetros del modelo fasorial del CEV

PARÁMETRO	VALOR
P base	300 MVA
Límites de Q	$Q_c = 300$ MVAR $Q_L = -300$ MVAR
Retardo promedio de disparo de tiristores	4ms

De igual forma, se presentan los parámetros del STATCOM utilizados para este análisis comparativo, seleccionados para ser de una capacidad equivalente al CEV.

Tabla 2

Parámetros del modelo fasorial del STATCOM

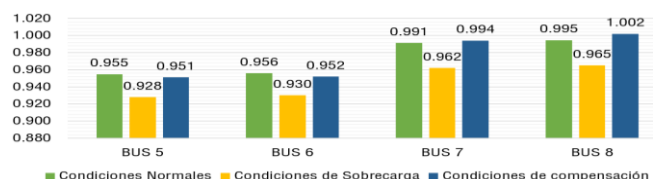
PARÁMETRO	VALOR
Capacidad nominal	± 300 MVA
Impedancia	0.22 pu
Capacitancia	1.875 mF
Tensión de CD	50 kV
Ganancias en el regulador de tensión	$K_p = 3$ $K_i = 6$
Ganancias en el regulador de corriente	$K_p = 5$ $K_i = 20$ $K_f = 1$

Finalmente, los valores de referencia seleccionados para este análisis resultaron estar de acuerdo a los estudios realizados previamente: para el caso del STATCOM se estableció una potencia reactiva de referencia $Q_{ref} = -0.8$ pu, mientras que, para el CEV, con base en la ecuación que relaciona la potencia reactiva con la susceptancia del compensador, se fijó una susceptancia de referencia $B_{ref} = -0.8$ pu. De esta manera, ambos dispositivos pueden operar bajo condiciones equivalentes de compensación reactiva para efectos comparativos.

Analizando la zona crítica bajo la influencia de estos compensadores, con los parámetros mencionados en la sección anterior, los resultados mostraron una influencia positiva (véase figura 6). A continuación, se hace una comparativa completa de los resultados obtenidos en el análisis de estado estacionario en los buses de estudio de la zona crítica cuando el sistema opera en condiciones normales; después, cuando el sistema está sometido a los niveles críticos de cargabilidad ($\lambda = 1.166$) y finalmente cuando está bajo la influencia de la compensación con los parámetros ya establecidos.

Figura 6

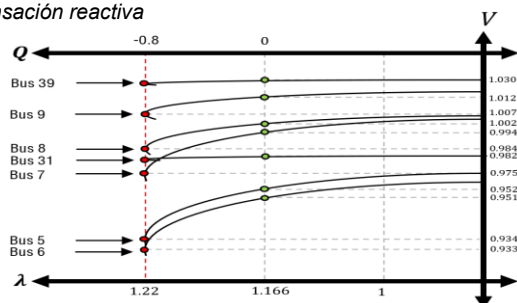
Tensiones medidas en los buses de estudio en la zona crítica analizada



Bajo la acción de los compensadores, las curvas Q-V de los buses pertenecientes a la zona crítica analizada presentaron un comportamiento más favorable, evidenciando una mejora en la capacidad del sistema para sostener niveles adecuados de tensión ante incrementos de carga. En particular, se observa un desplazamiento del punto de colapso hacia mayores niveles de demanda y un incremento en el margen de operación seguro. Esto indica que la inyección controlada de potencia reactiva fortalece el soporte de tensión en la zona crítica, reduciendo la cercanía al límite de estabilidad, tal y como se muestra en la figura 7.

Figura 7

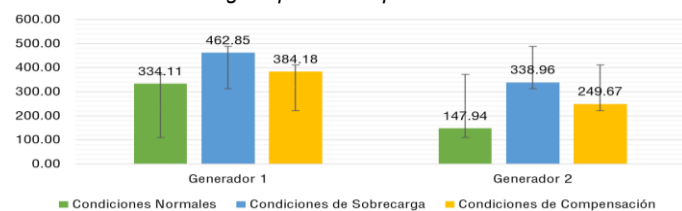
Dinámica de curvas Q-V de los buses de la zona crítica ante compensación reactiva



Finalmente, se analiza la comparación del desempeño de las máquinas pertenecientes a la zona crítica analizada (G1 y G2) respecto a su aporte de potencia reactiva en los tres escenarios operativos evaluados tal y como se muestra en la figura 8. En condiciones normales de operación, ambas unidades suministran niveles de Q dentro de rangos aceptables de sus límites operativos; posteriormente, bajo condiciones de alta cargabilidad, se observa una mayor exigencia operativa reflejada en un incremento significativo de la potencia reactiva entregada. Por último, al incorporarse la compensación reactiva en el bus 8, se evidencia un alivio en la demanda de soporte de Q por parte de los generadores, reduciéndose la cantidad de potencia reactiva suministrada y mejorando a su vez los márgenes operativos y térmicos de las máquinas.

Figura 8

Potencia reactiva entregada por las máquinas de la zona crítica analizada



2.3 Caso de estudio – Análisis Dinámico

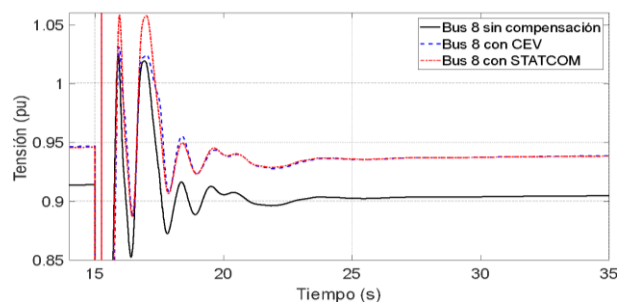
Para evaluar el desempeño dinámico de potencia, se considera inicialmente un escenario de operación en condición de sobrecarga, estableciendo un nivel de cargabilidad global de $\lambda = 1.12$, equivalente a un incremento del 12% respecto a la demanda nominal. Esta condición permite analizar el comportamiento del sistema cercano a sus límites operativos y, por tanto, en un estado más sensible a perturbaciones.

Adicionalmente, se estudia la respuesta de los compensadores ante un evento severo asociado a la estabilidad de tensión. Para ello, se simula una contingencia consistente en una falla trifásica transitoria sólidamente aterrizada ubicada en la línea que comunica los buses 5 y 6, tal y como se observa en la figura 4. La perturbación permanece activa durante 15 ciclos de la frecuencia fundamental, tras los cuales se ejecuta la maniobra de liberación correspondiente. Este escenario permite evaluar la capacidad del sistema y de los dispositivos de compensación para sostener la tensión, recuperar el equilibrio y evitar la pérdida de estabilidad posterior a la falla.

A continuación, en la figura 9 se presentan las señales de tensión registradas en el bus seleccionado para la instalación de los compensadores (bus 8), con el objetivo de realizar una comparación directa de su comportamiento bajo distintos escenarios operativos.

Figura 9

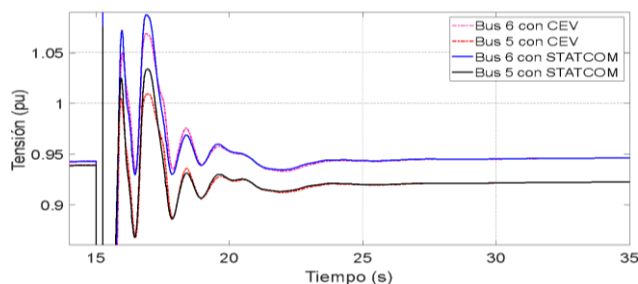
Tensiones en bus 8 ante liberación de falla de 15 ciclos por desconexión de línea 5-6



De la misma forma, se hace el estudio comparativo en los buses de extremos (Bus 5 y 6) de la línea desconectada con el objetivo de ver la dinámica que tuvieron las tensiones. Los resultados se muestran en la figura 10.

Figura 10

Tensiones en buses 5 y 6 ante liberación de falla de 15 ciclos por desconexión de línea 5-6



Del análisis realizado puede inferirse que, en ausencia de compensación, el sistema opera con niveles de tensión más reducidos, evidenciando una mayor susceptibilidad a la caída de tensión ante la contingencia. En cambio, al conectar los compensadores, se observa una recuperación efectiva de la magnitud de tensión, contribuyendo al soporte reactivo en los nodos analizados. Asimismo, puede apreciarse que las velocidades de respuesta de ambos dispositivos frente a la perturbación resultan muy similares, lo cual indica que, para este tipo de evento, los tiempos de actuación de los esquemas de control no presentan diferencias significativas en el restablecimiento inicial de la tensión.

Por otro lado, las tres respuestas conservan una forma oscilatoria prácticamente equivalente, manteniendo la dinámica electromecánica natural del sistema. La acción de los compensadores no modifica la frecuencia ni el patrón de las oscilaciones, diferenciándose únicamente en la amplitud de las mismas, ya que el soporte de potencia reactiva reduce la profundidad de las desviaciones de tensión sin intervenir directamente en los modos propios de oscilación del sistema.

Un aspecto adicional de interés dentro de la comparación entre

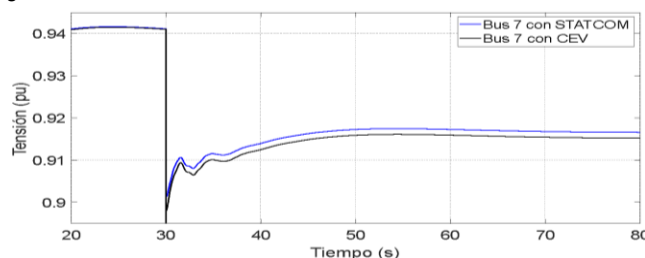
ambos compensadores es su capacidad de respuesta frente a contingencias severas caracterizadas por perfiles bajos de tensión. Este escenario resulta representativo de condiciones reales de operación, por ejemplo, cuando se conecta una carga de gran magnitud en un punto donde el sistema ya se encuentra operando en régimen permanente cercano a su límite máximo de cargabilidad.

Con el propósito de evaluar este comportamiento, se plantea un nuevo caso de estudio consistente en la incorporación de una carga en el bus 7, siendo este bus otro nodo tipo PQ dentro de la zona crítica analizada. Esta carga adicional que se incorpora se caracteriza por ser equivalente al 50% de su demanda original, tal y como se ilustra en la figura 4.

Como primera parte, se analiza la dinámica de la tensión en el bus 7, punto en el que se incorporó la carga.

Figura 11

Tensiones en bus 7 ante sobrecarga permanente de 50% adicional de su carga nominal



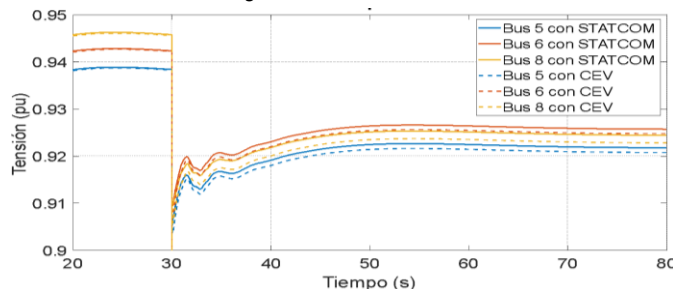
En la figura 11 se observa que, previo a la incorporación de la nueva carga, la tensión en el bus 7 presenta prácticamente la misma magnitud y comportamiento dinámico para ambos compensadores. Sin embargo, en el instante de conexión la carga produce una caída abrupta en la tensión. A partir de ese momento, ambos dispositivos actúan rápidamente para restablecer el nivel de tensión hacia un nuevo punto de operación estable, aunque el STATCOM destaca por exhibir una respuesta ligeramente más rápida que el CEV.

Asimismo, puede apreciarse que el desempeño del CEV se degrada en comparación con el STATCOM, ya que el error de compensación con este dispositivo aumenta ante la perturbación de la conexión de la carga, manteniendo niveles de tensión más bajos durante el proceso de recuperación.

Se analizan también las tensiones en los buses aledaños al bus 7 pertenecientes a la zona crítica, observando el desempeño que tomaron los valores de tensión ante esta perturbación.

Figura 12

Tensiones en los buses 5, 6 y 8 ante sobrecarga permanente en bus 7 de 50% adicional de su carga nominal



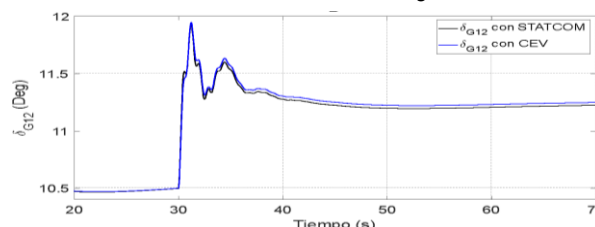
En la figura 12 podemos observar que el comportamiento es consistente también en los demás buses, a diferencia de que las magnitudes de la tensión no son tan críticas como las que se pudieron analizar en el bus 7.

Finalmente, se analiza el comportamiento electromecánico de las máquinas ubicadas en la zona crítica estudiada (G1 y G2). Para ello, se evalúan las variaciones del ángulo del rotor y de la velocidad angular durante la contingencia aplicada, con el propósito de determinar en qué medida la acción de compensadores influye sobre la dinámica propia de los generadores y sobre el intercambio de potencia entre el sistema mecánico y eléctrico. De esta manera, es posible identificar si el soporte de tensión que se ocasiona por la inyección de potencia reactiva contribuye únicamente al perfil de tensión o si también repercute en la estabilidad dinámica de las unidades de generación.

En la figura 13 se presentan las diferencias angulares entre las dos máquinas con y sin la presencia del STATCOM.

Figura 13

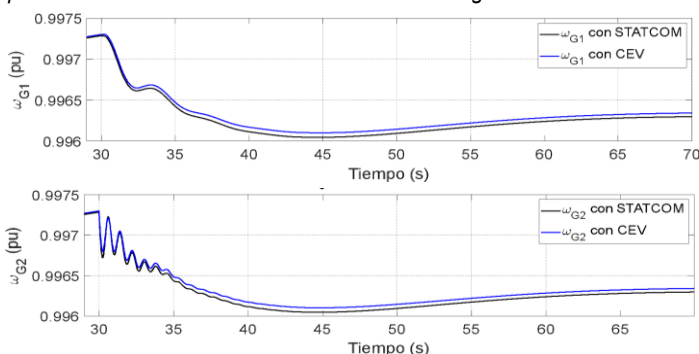
Diferencia angular del rotor en las máquinas G1 y G2 ante sobrecarga permanente en B7 de 50% adicional de su carga nominal



Finalmente, en la figura 14 se analizan las velocidades angulares de los dos generadores.

Figura 14

Diferencia angular del rotor en las máquinas G1 y G2 ante sobrecarga permanente en bus 7 de 50% adicional de su carga nominal



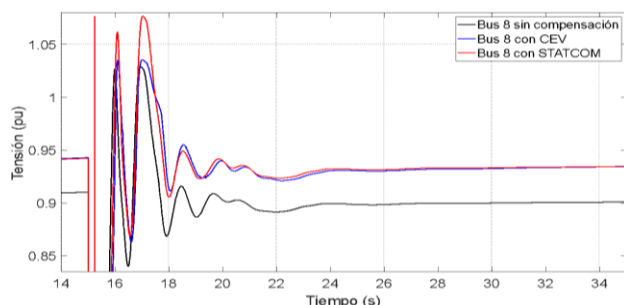
Para la última etapa de este análisis comparativo, el sistema se somete a un nivel de cargabilidad límite ($\lambda = 1.166$); es decir, a una condición en la que cualquier incremento adicional de demanda global provocaría la pérdida de estabilidad de tensión y, en consecuencia, un posible colapso de tensión. Bajo este régimen operativo crítico se aplica nuevamente la perturbación consistente en una falla trifásica sólidamente aterrizada en la línea de transmisión que conecta los buses 5 y 6.

El objetivo de este escenario es el desempeño dinámico de las tensiones cuando el sistema opera en sus márgenes extremos,

condición en la cual la red se vuelve altamente sensible ante variaciones de carga o disturbios (figura 5). En primer lugar, se analizan las señales de tensión en el bus donde se ubica la compensación (bus 8), con el fin de observar la capacidad de los dispositivos para sostener el nivel de tensión y amortiguar la severidad de la perturbación bajo condiciones cercanas al colapso.

Figura 15

Tensiones en bus 8 ante liberación de falla de 15 ciclos por desconexión de línea 5-6



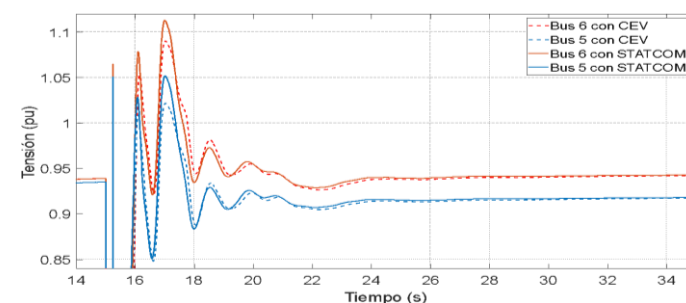
En la figura 15, se muestra la evolución del perfil de voltaje en el bus 8, considerado como parte de la zona débil previamente identificada. Debido a la cargabilidad del sistema, el nivel de la tensión en ese bus se ubica aproximadamente en 0.91 pu. Se observa que una vez que se ha liberado la falla, se presentan oscilaciones y, sin ningún tipo de compensación, el voltaje se estabiliza en un valor de aproximadamente 0.90 pu, evidenciando una reducción significativa respecto a su valor pre-falla de 0.91 pu. Después, se evaluó el comportamiento del sistema al implementar el CEV y el STATCOM. En ambos casos, el voltaje en el bus 8 mejora notablemente, estabilizándose en aproximadamente 0.935 pu. Al comparar los resultados entre ambas tecnologías, se evidencia que el STATCOM presenta un perfil de voltaje ligeramente más elevado que el CEV, lo cual se traduce en una mejor calidad de voltaje post-falla. Además, la amplitud de oscilación durante el régimen transitorio con STATCOM resulta ligeramente menor que la observada con el CEV, sugiriendo un mayor grado de amortiguamiento dinámico ofrecido por la VSC. La respuesta dinámica de las tensiones en los buses 5 y 6 (figura 16) evidencia niveles reducidos debido al alto grado de cargabilidad del sistema cuando opera sin dispositivos de compensación. Al incorporar el compensador, se observa una mejora en los niveles de tensión respecto al escenario sin compensación, causando un efecto positivo sobre el soporte de voltaje.

Durante la ocurrencia de la falla, las tensiones en ambos buses —tanto con compensación como sin ella— experimentan una caída abrupta hasta valores prácticamente nulos, debido a la naturaleza de la falla. Una vez despejada la falla mediante la maniobra de liberación de la línea, el sistema muestra un proceso de recuperación natural en el caso sin compensación. En particular, en el bus 6 la tensión en régimen permanente se restablece a valores muy cercanos a los niveles previos a la falla, lo cual está directamente relacionado con la influencia de la unidad generadora cercana (G2), que aporta soporte de potencia reactiva y contribuye a la estabilización del nodo.

El bus 5 presenta una mayor afectación en el perfil de tensión. Esta condición se atribuye principalmente a la elevada demanda y a las pérdidas de potencia reactiva asociadas a las características eléctricas de las líneas de transmisión conectadas a este nodo, limitando su capacidad de recuperación, convirtiéndolo en un punto más vulnerable desde el punto de vista de la estabilidad de voltaje.

Figura 16

Tensiones en buses 5 y 6 ante liberación de falla de 15 ciclos por desconexión de línea 5-6



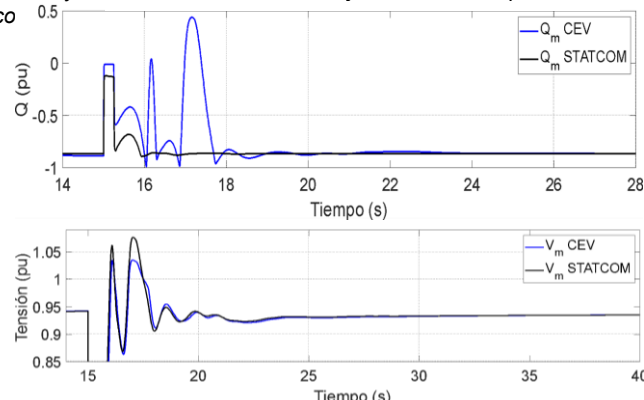
2.4 Análisis comparativo de la respuesta dinámica en el punto común de acoplamiento.

La figura 17 muestra la evolución de la tensión en terminales y la potencia reactiva en el PCC tras la aplicación de una falla trifásica transitoria de 15 ciclos. A partir de estas gráficas es posible establecer diferencias claras en el desempeño dinámico entre el CEV y el STATCOM.

Ambos compensadores logran restablecer el voltaje del sistema después de la perturbación, estabilizándolo alrededor de 0.935 pu, mostrando su capacidad para proporcionar soporte de potencia reactiva y contribuyendo a la recuperación de la tensión. Sin embargo, se observan diferencias importantes en la dinámica transitoria. En el caso del CEV, la tensión presenta un sobreimpulso seguido de oscilaciones antes de alcanzar el régimen permanente, mostrando un comportamiento similar al STATCOM dado al control sometido. Asimismo, la potencia reactiva muestra variaciones abruptas con picos más elevados y un comportamiento oscilatorio más marcado durante los primeros segundos posteriores a la falla. Este comportamiento es consistente con la naturaleza discreta de la conmutación de los TCR y TSC, que limita la suavidad de la regulación.

Figura 17

Tensión y Potencia reactiva del CEV y STATCOM en punto común de aco



Por otro lado, el STATCOM evidencia una respuesta más amortiguada. A pesar de que también presenta un sobreimpulso inicial, la amplitud de las oscilaciones de tensión es ligeramente menor y el sistema alcanza el régimen permanente de manera más uniforme. En cuanto a la potencia reactiva, se observa una inyección más controlada, con menor variación de pico y una transición más suave hacia el estado estable. Este comportamiento se atribuye a la arquitectura y parámetros de la VSC, que permiten un control continuo y más preciso de la corriente reactiva.

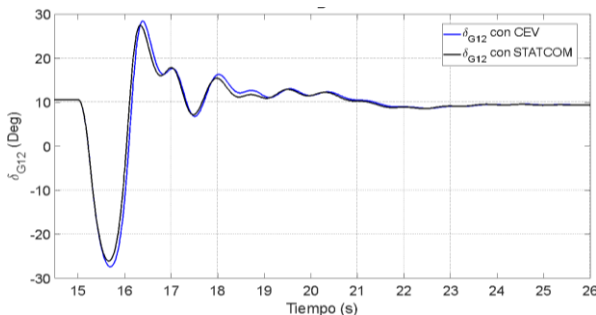
2.5 Análisis del comportamiento electromecánico ante la liberación de falla

Tal y como se mencionó en el segundo caso de estudio, el análisis del comportamiento electromecánico posterior a la liberación de la falla constituye una etapa fundamental para evaluar la estabilidad del sistema eléctrico. Durante este proceso, los generadores intercambian potencia, manifestándose en oscilaciones de ángulo y velocidad que determinan si el sistema logra restablecer el sincronismo o evoluciona hacia una condición inestable. Es por eso por lo que no basta con verificar únicamente la recuperación del nivel de tensión, sino que es importante estudiar la respuesta dinámica de las máquinas.

Para este análisis, la presencia de compensadores operando en modo de control de potencia reactiva adquiere un aspecto interesante que puede observarse en la respuesta de las señales de las máquinas.

Figura 18

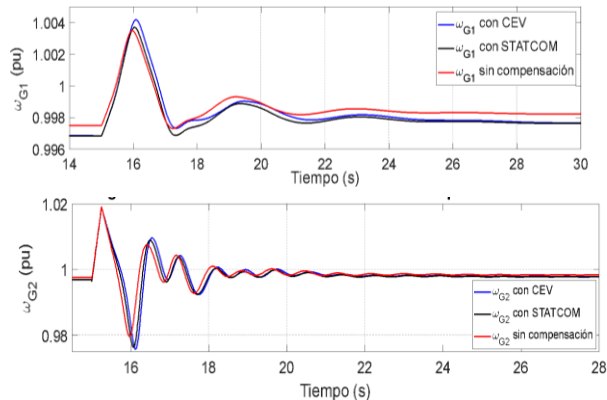
Diferencia angular del rotor en las máquinas G1 y G2 ante liberación de falla de 15 ciclos por desconexión de línea 5-6



En la figura 18 se observa la evolución temporal de la diferencia angular del rotor de los generadores G1 y G2 ($\delta_{G1,G2}$) tras la liberación de la falla trifásica transitoria. En la gráfica se observa que la aplicación de la falla provoca una desviación considerable del ángulo del rotor respecto a su condición previa de operación. Al considerar los casos con compensación, la influencia de la inyección de potencia reactiva se manifiesta principalmente en el régimen permanente, donde el ángulo alcanza nuevos valores estables. Asimismo, se aprecia que la dinámica del ángulo bajo la influencia del STATCOM presenta una recuperación de unos cuantos milisegundos más rápida en comparación con la obtenida cuando interviene el CEV.

Figura 19

Velocidad angular en G1 y G2 ante liberación de falla de 15 ciclos por desconexión de línea 5-6



Finalmente, en la figura 19, correspondiente a la velocidad angular de los generadores G1 y G2 ($\omega_{G1,G2}$), se observa que durante el periodo transitorio ambos presentan variaciones asociadas al intercambio de potencia entre los sistemas mecánicos y eléctricos. En ausencia de compensación, las desviaciones de velocidad muestran una amplitud relativamente menor, aunque el tiempo requerido para alcanzar el estado estacionario es prolongado.

Por otra parte, cuando se incorporan los compensadores, la respuesta de la velocidad angular no evidencia una mejora significativa en el amortiguamiento. Esto se debe a que la compensación de potencia dinámica no actúa directamente sobre la dinámica de velocidad de las máquinas, la cual está determinada principalmente por el balance de potencia activa entre la entrada mecánica y la potencia eléctrica entregada al sistema.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Comparación del desempeño dinámico y en régimen permanente entre el CEV y el STATCOM bajo los 3 diferentes escenarios

Continuando con este análisis comparativo del desempeño de los compensadores (CEV y STATCOM), se presentan las respuestas obtenidas en los diferentes casos de estudio. Se hace énfasis en el análisis de los tiempos de estabilización de la tensión y los valores obtenidos en régimen permanente, bajo los distintos niveles de cargabilidad a los que se sometió el sistema. Los análisis se realizaron para factores de cargabilidad tanto cercanos al límite como en condiciones límite de carga ($\lambda = 1.12$ y $\lambda = 1.166$).

Tabla 3

Desconexión de línea 5-6 ($\lambda = 1.12$)

DISPOSITIVO	$\lambda_{crítico}$	ESTABILIZACIÓN		V_m EN ESTADO STACIONARIO
		BUS	TIEMPO	
CEV	1.12	5	22.26 seg	0.9228 pu
		6	16.26 seg	0.9465 pu
		8	13.5 seg	0.9392 pu
STATCOM	1.12	5	12.7 seg	0.923 pu
		6	12.6 seg	0.9466 pu
		8	12.6 seg	0.9398 pu

Bajo un nivel de cargabilidad moderadamente elevado, ambos dispositivos de compensación logran mantener perfiles de tensión adecuados en los buses analizados, evidenciando que el sistema conserva un margen operativo aceptable. Sin embargo, la principal diferencia entre los compensadores se observa en la dinámica de recuperación de la tensión, tal y como se muestra en la tabla 3. El STATCOM presenta tiempos de estabilización significativamente menores en los tres nodos, mostrando una respuesta más rápida y uniforme frente a la perturbación. La reducción del tiempo de estabilización es particularmente notable en el bus 5, donde el STATCOM mejora la velocidad de recuperación en aproximadamente un 43% respecto al CEV, mientras que en los buses 6 y 8 la mejora se sitúa en torno al 25%, comprobando la mayor capacidad dinámica del STATCOM para restablecer niveles de tensión en condiciones de operación. En cuanto a los valores de tensión en régimen permanente, ambos dispositivos alcanzan niveles prácticamente equivalentes, con diferencias mínimas que indican que, para este nivel de cargabilidad, las dos tecnologías son capaces de proporcionar un soporte de voltaje efectivo. No obstante, el STATCOM mantiene valores ligeramente superiores, proporcionando un control más preciso del perfil de tensión.

Tabla 4
Sobrecarga en bus 7

DISPOSITIVO	$\lambda_{crítico}$	ESTABILIZACIÓN		V_m EN ESTADO STACIONARIO
		BUS	TIEMPO	
CEV	1.166	7	85.03 seg	0.9152 pu
		8	83.93 seg	0.9228 pu
STATCOM	1.166	7	82.75 seg	0.9165 pu
		8	82.66 seg	0.9244 pu

La incorporación de una condición de sobrecarga local en el bus 7 provoca un deterioro notable en la respuesta dinámica del sistema, reflejado en un incremento considerable de los tiempos de estabilización de la tensión en los buses analizados, según se indica en la tabla 4. Este comportamiento confirma la alta sensibilidad de la zona ante incrementos de demanda, situando al sistema en una condición operativa más cercana al límite de estabilidad. En este escenario, el STATCOM mantiene una ventaja dinámica frente al CEV, evidenciada por tiempos de estabilización ligeramente menores en ambos buses. Aunque la diferencia es moderada —del orden de 2% a 3%—, resulta consistente con el mejor desempeño dinámico del STATCOM observado en los escenarios anteriores, mostrando una recuperación más uniforme ante condiciones de estrés local. Respecto a los niveles de tensión en régimen permanente, ambos dispositivos logran sostener valores similares, indicando que la capacidad global de soporte reactivo sigue siendo suficiente para evitar una degradación severa de tensión. No obstante, se observa que el STATCOM presenta una ligera mejora en los buses cercanos, demostrando un mejor acoplamiento dinámico con la red y una distribución más efectiva de la compensación reactiva en la zona.

Tabla 5
Desconexión de línea 5-6 ($\lambda = 1.166$)

DISPOSITIVO	$\lambda_{crítico}$	ESTABILIZACIÓN		V_m EN ESTADO STACIONARIO
		BUS	TIEMPO	

CEV	1.166	5	44.17 seg	0.9184 pu
		6	42.93 seg	0.9432 pu
		8	45.12seg.	0.9348 pu
STATCOM	1.166	5	42.97 seg	0.9185 pu
		6	40.98 seg	0.9434 pu
		8	42.97seg	0.9346 pu

Al operar el sistema a su límite de cargabilidad, en la tabla 5, se observa un incremento significativo en los tiempos de estabilización de la tensión para ambos dispositivos, lo cual refleja un mayor esfuerzo dinámico requerido para restablecer el equilibrio del sistema bajo condiciones más exigentes. A este nivel de carga, la red se encuentra en una región operativa mucho más sensible.

El STATCOM continúa mostrando un desempeño ligeramente superior en términos de velocidad de respuesta, aunque la mejora es más moderada que en el caso de menor cargabilidad. En promedio, los tiempos de estabilización se reducen aproximadamente entre 3% y 5% respecto al CEV, lo que indica que, aun en condiciones al límite de estabilidad, el STATCOM conserva una ventaja dinámica, aunque menos pronunciada debido al alto estrés del sistema.

En cuanto a los niveles de tensión en régimen permanente, ambos dispositivos presentan valores prácticamente iguales, lo que sugiere que, en condiciones cercanas al punto de colapso, la capacidad de regulación en estado estable depende más de la disponibilidad global de potencia reactiva del sistema que del tipo específico de compensador. No obstante, el STATCOM mantiene una ligera tendencia a sostener valores marginalmente superiores en algunos nodos, lo que confirma su mayor precisión en el control. Finalmente cabe resaltar que el propósito de estos dispositivos no es alcanzar los mejores niveles en cuanto a la regulación de la tensión, pues estos se encuentran en un modo de control de potencia reactiva, por lo que aquí lo importante es identificar cuál de las dos tecnologías fue la que logró mantener al sistema con buenos niveles de potencia reactiva bajo estas duras condiciones operativas tal y como lo muestra la figura 17, donde se hace la comparativa de la dinámica que presentaron las señales de potencia reactiva inyectada por los dos compensadores.

IV. CONCLUSIONES

El presente trabajo permitió evaluar el comportamiento dinámico y en estado estacionario de un sistema eléctrico de potencia sometido a condiciones de alta cargabilidad, mediante la comparación del desempeño de dos dispositivos FACTS: el STATCOM y el CEV. A partir del análisis de flujos continuos se determinó el límite máximo de cargabilidad del sistema, identificando la zona débil asociada principalmente al bus con mayor demanda de potencia, lo cual permitió establecer el punto óptimo para la instalación de los dispositivos de compensación. Los resultados de simulación en estado estable evidenciaron que ambos dispositivos contribuyen de manera efectiva a la mejora del perfil de tensión en el nodo crítico, incrementando el margen de estabilidad y reduciendo la sensibilidad del sistema ante variaciones de carga. No obstante, el STATCOM mostró un mejor desempeño en la estabilidad de tensión, debido a su capacidad de inyección de potencia reactiva prácticamente independiente

del nivel de tensión del sistema, lo que se tradujo en perfiles de voltaje ligeramente superiores respecto al CEV.

En el análisis dinámico ante una perturbación trifásica, se observó que la implementación de compensación reactiva mejora la amortiguación de las oscilaciones y acelera el proceso de estabilización del sistema. Particularmente, el STATCOM presentó menores amplitudes de oscilación y una respuesta más rápida, reflejando su mayor efectividad para mantener la estabilidad y el soporte de tensión durante eventos severos. Asimismo, el análisis de variables electromecánicas, como la diferencia angular y la velocidad del rotor, confirmó que la presencia de compensación reactiva contribuye a incrementar el amortiguamiento del sistema, siendo nuevamente el STATCOM el dispositivo con mejor desempeño.

En términos generales, los resultados obtenidos permiten concluir que, aunque ambos dispositivos FACTS son técnicamente viables para mejorar la estabilidad de la tensión, el STATCOM ofrece ventajas operativas significativas en escenarios de alta cargabilidad y condiciones dinámicas severas, principalmente por su rapidez de respuesta y mayor capacidad de control continuo de potencia reactiva. Este estudio sienta las bases para futuros trabajos orientados a la optimización de la ubicación y dimensionamiento de dispositivos FACTS en redes potencia, así como a la evaluación de su desempeño bajo escenarios con mayor penetración de generación renovable y condiciones operativas más complejas.

V. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la secretaria de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo económico recibido para el estudio del posgrado. También a la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de La Laguna por las facilidades brindadas para la realización de este trabajo.

VI. REFERENCIAS

Anantha Pai. (1989). *"Energy Function Analysis for Power System Stability"*. Springer.

Anderson P. M. and Fouad A. A., (2003). *Power System Control and Stability*. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press.

Gole A. M. and Sood V. K. (1990). "A static compensator model for use with electromagnetic transients' simulation programs," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 3. pp. 1398–1407.

Govind Prasad, Prof. A. K. Sharma. (2024) *Comparison Between Statcom And Svc Fact Device Using Matlab Simulation Software*.

Gutiérrez Martínez Víctor Javier. (2004). *"Aplicación de un Modelo de Continuación para el Análisis del Fenómeno de Colapso de Voltaje Estático en Sistemas Flexibles de Corriente Alterna"*. Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo, México, Noviembre.

Hingorani N. G., Gyugyi L., (2000). *"Understanding FACTS; Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems"*, IEEE® Press book.

Jun Qi, Wenbin Zhao, and Xiaoyan Bian, (2017), " *Comparative Study of SVC and STATCOM Reactive Power Compensation for Prosumer Microgrids with DFIG-based Wind Farm integration*," IEEE Access.

Jun Qi, Wenbin Zhao, Xiaoyan Bian. (2017) *Comparative Study of SVC and STATCOM Reactive Power Compensation for Prosumer Microgrids with DFIG-based Wind Farm Integration*.

Khaliq Ahmed, C. Veeresh, (2014), " *Comparatively Analysis Of Reactive Power Compensation Between STATCOM & SVC Compensation Technique Using Matlab/Simulink*," 30th November-2014, Mysore, India.

Kumar V. Mahtani Mahtani, (2023), " *STATCOM y SVC: Soluciones para la gestión de la potencia reactiva en redes eléctricas*".

Kundur P. (1994). *"Power System Stability and Control"*, EPRI Power System Engineering Series. McGraw Hill.

Lefebvre S. and Gerin-Lajoie L., (1992). "A static compensator model for the EMTP," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 2.

Leonard L. Grigsby. (2007) *"Power System Stability and Control"*, The Electrical Engineering Handbook Series, Taylor & Francis Group.

Meddeb A., Jmii H., Amor N. and Chebbi S., (2020) *"Voltage Stability Enhancement Using FACTS Devices"*, Hammamet, Tunisia, 2020, pp. 257-260.

Mosheer A. D., (2020) *"A comparative study of the impact of FACTS devices on the voltage stability in the power systems"*, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 745 012023.

Nazha Cherkaoui, Touria Haidi, Abdelaziz Belfqih, Faissal El Mariami, Jamal Boukherouaa, (2018), " *A Comparison Study of Reactive Power Control Strategies in Wind Farms with SVC and STATCOM*," in International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE) Vol. 8, No. 6.

Rajarshee Roy Choundhury. (2015). *Comparative Analysis of STATCOM and SVC Operation for Reactive Power Compensation in Electric Transmission Line* [Bachelor of Technology, Calcutta Institute of Engineering and Management].

Sercan Teleke, Tarik Abdulahovic, Torbjörn Thiringer, and Jan Svensson, (2008). "Dynamic performance comparison of synchronous condenser and SVC" IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23.

Tang Yong. (2021) *"Analysis on Power System Voltage Stability"*, Beijing: Science Press.

Taylor C. W. (1994). *"Power System Voltage Stability"*, EPRI Power System Engineering Series. McGraw Hill.

Yan Xu; Yuan Chi; Heling Yuan, (2023). *"Voltage Stability Indices"*, in Stability-Constrained Optimization for Modern Power System Operation and Planning, IEEE, pp.293-310.

No.	Rol	Descripción
		Nota 1: favor de eliminar los corchetes una vez colocado su nombre Nota 2: elimine el todo texto de apoyo que se proporcionó en los asteriscos de cada fila y debajo de cada nombre.
1	Conceptualización [Conceptualization]	Cabral-Camacho, H. A.; Ortiz-Castillo, P. R., García-Viveros H.
2	Curación de datos [Data curation]	Cabral-Camacho, H. A.; García-Viveros H.
3	Análisis formal [Formal analysis]	Cabral-Camacho, H. A.; Ortiz-Castillo, P. R., García-Viveros H.
4	Obtención de fondos [Funding acquisition]	Cabral-Camacho, H. A.; Ortiz-Castillo, P. R.
5	Investigación [Investigation]	[Cabral-Camacho, H. A.; Ortiz-Castillo, P. R., García-Viveros H.
6	Metodología [Methodology]	Cabral-Camacho, H. A.; García-Viveros H.
7	Administración del proyecto [Project administration]	Cabral-Camacho, H. A.; Ortiz-Castillo, P. R., García-Viveros H.; Ruiz-Ponce, G. E.
8	Recursos [Resources]	Cabral-Camacho, H. A.; Ortiz-Castillo, P. R., García-Viveros H.; Ruiz-Ponce, G. E..
9	Software [Software]	Cabral-Camacho, H. A.; García-Viveros H.
10	Supervisión [Supervision]	García-Viveros H.; Ruiz-Ponce, G. E.
11	Validación [Validation]	Cabral-Camacho, H. A.; Ortiz-Castillo, P. R., García-Viveros H.; Ruiz-Ponce, G. E.
12	Visualización [Visualization]	Cabral-Camacho, H. A
13	Redacción - borrador original [Writing – original draft]	Cabral-Camacho, H. A.; Ortiz-Castillo, P. R.
14	Redacción - revisión y edición [Writing – review & editing]	Cabral-Camacho, H. A.; Ortiz-Castillo, P. R., García-Viveros H.; Ruiz-Ponce, G. E.