Metodología para la Evaluación del Desempeño de Compensadores Serie Síncronos Estáticos (SSSC) utilizando Machine Learning

PROPONENTES:

NOMBRE:	Jaime Dwaigth Pinzón Casallas			
ÁREA:	Dirección Operaciones Corporativas			
CARGO:	Especialista Operaciones Corporativas			
EMPRESA:	ISA Interconexión Eléctrica SA ESP			
PAÍS:	Colombia			
CORREO:	jpinzon@isa.com.co			
	AUTOR:	**X**	**COAUTOR:**	

NOMBRE:	Camilo Moreno Cossio			
ÁREA:	Aseguramiento Operación			
CARGO:	Analista Evaluación Operación			
EMPRESA:	XM			
PAÍS:	Colombia			
CORREO:	cmoreno@xm.com.co			
	AUTOR:		**COAUTOR:**	**X**

RESUMEN

Los equipos Compensadores Serie Síncronos Estáticos (SSSC) se están integrando en los sistemas de potencia para varias aplicaciones de mejora de la estabilidad y optimización de la red, entre ellas el control de flujos de potencia y de congestiones. Los SSSC pueden operar en diferentes modos de control y siguiendo un objetivo de corriente, impedancia o tensión inyectada en serie con la línea de transmisión. Por lo anterior, es relevante analizar el desempeño durante la operación en tiempo real, por lo que en este artículo se presenta una metodología basada en modelos de aprendizaje computacional para determinar si cada equipo SSSC conectado al sistema eléctrico de potencia está operando correctamente. En la metodología se evalúan tres condiciones: 1) conmutaciones del equipo; 2) si se conecta o desconecta cuando debe hacerlo según su modo de control y parametrización; y 3) se evalúa el error de control, todo lo anterior para determinar el desempeño del equipo. La metodología es validada con datos de la operación de equipos SSSC integrados en el sistema de potencia colombiano, permitiendo evaluar el desempeño de los equipos ante diferentes condiciones de operación y así detectar posibles riesgos operativos y acciones de mejora en el control de flujos de potencia.

PALABRAS CLAVES: SSSC – FACTS - Analítica de datos - Control de flujo de potencia

CATEGORÍA: Energía - Operación

INTRODUCCIÓN

Es muy frecuente que las zonas que tienen la mejor calidad de los recursos generación renovables estén alejadas de las grandes ciudades y por consiguiente de una red de transporte de energía robusta y flexible. Lo anterior ha generado un embotellamiento en la integración de los proyectos de energía renovable, debido a las diferencias en el tiempo de desarrollo de estos proyectos con respecto al tiempo de desarrollo de la infraestructura tradicional basada en la construcción de nuevas líneas de transmisión [1].

De acuerdo con lo anterior, es aquí donde la integración de la tecnología SSSC, que tiene tiempos de desarrollo similares a los proyectos de generación renovables no convencionales, permite un mejor uso de la red existente, optimizando la capacidad de transporte y habilitando así la incorporación de nuevas plantas de generación [2], [3]. Esta tecnología utiliza electrónica de potencia

para aumentar o disminuir efectivamente la reactancia de un circuito dado, controlando así el flujo de potencia en tiempo real. Esto permite equilibrar los niveles de carga en las líneas de transmisión, distribuir los flujos, aliviar la congestión y optimizar la operación y el uso de las líneas de transmisión existentes [1].

En Colombia, las proyecciones indican que para 2032, la matriz energética estará compuesta por un 39% de generación solar fotovoltaica y un 9% de energía eólica. Esto representa una alta integración de fuentes de energía renovable no convencional. Según los estudios, esto debe ir acompañado de la construcción de un gran conjunto de líneas de transmisión para transportar la energía generada por estas plantas y evitar la congestión en la red de transmisión. En consecuencia, existen restricciones actuales y futuras en partes de la red de transmisión colombiana debido al aumento continuo de la demanda y la instalación planificada de parques solares y eólicos lejos de las grandes ciudades. Esto ha creado un cuello de botella en la integración de proyectos de energía renovable, debido a las diferencias en el tiempo de desarrollo entre estos proyectos y la infraestructura tradicional basada en la construcción de nuevas líneas de transmisión. Dados los desafíos mencionados en la construcción de nuevas líneas de transmisión, la tecnología SSSC representa una solución rápida y efectiva para mitigar las congestiones de flujo de energía actuales y futuras. Los operadores de redes de transmisión en Colombia ya han instalado doce unidades SSSC: dos en la subárea de Bolívar, dos en la subárea de Guajira-Cesar-Magdalena (GCM), tres en la zona de Antioquia y cinco nuevas unidades SSSC en la subárea del Atlántico. La Tabla 1 proporciona información sobre el equipo ya instalado y las futuras instalaciones, incluyendo la potencia nominal, el nivel de voltaje de las líneas de transmisión y el año de instalación.

La integración de estos equipos en la red eléctrica transforma la operación convencional, basada en flujos de potencia determinados por impedancias fijas, en un sistema más flexible que puede variar dichas impedancias, ofreciendo así un mayor control sobre el flujo de potencia. Sin embargo, una configuración o parametrización inadecuada de los equipos SSSC puede causar problemas operativos o interacciones no deseadas con otros equipos y controles de la red, como se evidencia en experiencias operativas de equipos SSSC, mostradas en [4]. Por lo tanto, es esencial contar con herramientas para la detección automática de anomalías y la evaluación del desempeño de estos equipos. Estas herramientas permiten identificar situaciones de riesgo e implementar soluciones de mitigación mediante acciones preventivas y correctivas, lo cual es crucial para mantener la seguridad y confiabilidad de la red eléctrica.

En este artículo se presenta una metodología novedosa para evaluar el comportamiento y desempeño de los equipos SSSC, utilizando algoritmos integrados de aprendizaje automático y mediciones.

Líneas de transmisión	Tensión Nominal [kV]	Capacidad SSSC [MVAr]	Año de puesta en servicio
Envigado -Ancón	110	3	2021
Guayabal - Ancón Sur	110	6	2022
Envigado - Guayabal	110	3	2022
Líneas Termocandelaria - Ternera 1 y 2	220	120	2022
Santa Marta - Termoguajira	220	90	2023
Santa Marta - Termocol	220	150	2023
Líneas Sabana -Tebsa 1 y 2	220	120	2024
Sabana - Caracolí	220	30	2024
Líneas Flores - Nueva Barranquilla 1 y 2	220	60	2024

Fuente: Elaboración propia

Tabla 1. Instalaciones SSSC en Colombia

La integración de estos equipos en la red eléctrica transforma la operación convencional, basada en flujos de potencia determinados por impedancias fijas, en un sistema más flexible que puede variar dichas impedancias, ofreciendo así un mayor control sobre el flujo de potencia. Sin embargo, una configuración o parametrización inadecuada de los equipos SSSC puede causar problemas operativos o interacciones no deseadas con otros equipos y controles de la red, como se evidencia en experiencias operativas de equipos SSSC, mostradas en [4]. Por lo tanto, es esencial contar con herramientas para la detección automática de anomalías y la evaluación del desempeño de estos equipos. Estas herramientas permiten identificar situaciones de riesgo e implementar soluciones de mitigación mediante acciones preventivas y correctivas, lo cual es crucial para mantener la seguridad y confiabilidad de la red eléctrica.

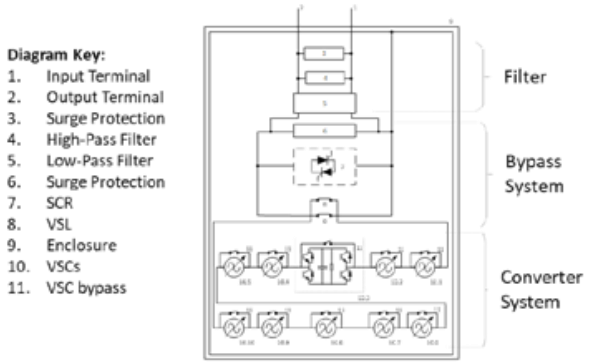
En este artículo se presenta una metodología novedosa para evaluar el comportamiento y desempeño de los equipos SSSC, utilizando algoritmos integrados de aprendizaje automático y mediciones.

1. OPERACIÓN SSSC

1.1 PRINCIPIOS DE OPERACIÓN DE SSSC

Los SSSC son equipos FACTS de compensación serie basados en electrónica de potencia, los cuales inyectan una tensión con un desfase de 90 grados en adelanto o en atraso con respecto a la corriente de línea, logrando así emular el comportamiento de un reactor o un capacitor serie, respectivamente, y de esta forma controlar el flujo de potencia por la línea de transmisión de forma dinámica según la consigna del operador.

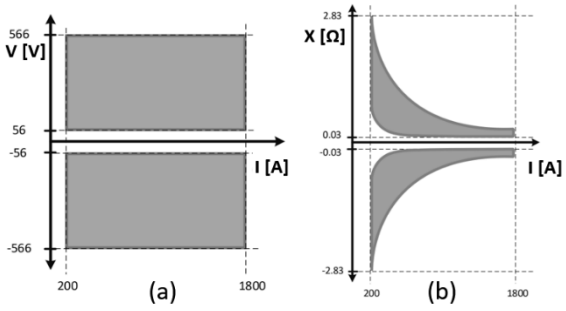
Los dispositivos SSSC se componen internamente por una serie de convertidores de fuente de tensión (Fig. 1), los cuales dependiendo del régimen de disparo de sus correspondientes puentes H pueden o no aportar a la inyección de tensión en un instante dado; esto permite construir una forma de onda a través de una serie de niveles DC que en conjunto forman una fuente de tensión sincrónica de estado sólido. Dicho régimen de disparo determinará la magnitud equivalente de tensión que será inyectada a la red y con sus controles internos asociados se alcanzará según determine el usuario, una reactancia equivalente bien sea positiva (inductiva) o negativa (capacitiva).



Fuente: Tomado de [5]

Gráfica 1. Configuración eléctrica SSSC

Las curvas características de los SSSC dependen de varios parámetros entre ellos sus valores mínimos y máximos de corriente de operación, los valores mínimos y máximos de tensión inyectada por el equipo en serie con la línea de transmisión. De esta manera se puede determinar la curva característica corriente-tensión (Fig. 2-(a)) y la curva corriente-reactancia (Fig. 2-(b)), en esta última se observa la reducción de la reactancia emulada por el SSSC a medida que aumenta la corriente que circula por el equipo.



Fuente: Tomado de [5]

Gráfica 2. Curva característica SSSC (a) corriente-tensión (b) corriente-reactancia

1.2 MODOS DE OPERACIÓN DE SSSC

Los dispositivos SSSC tienen cuatro posibles

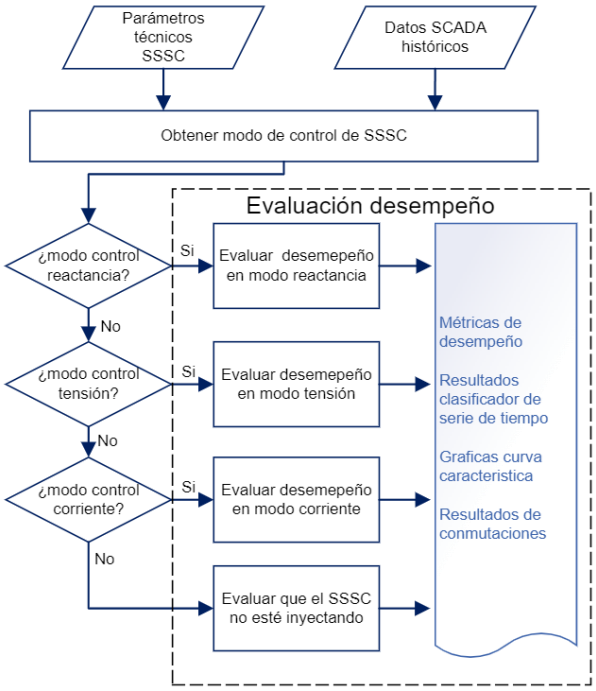
modos de operación:

- **Modo monitoreo:** En este modo, no se inyecta tensión ya que los equipos de baipás están cerrados y los convertidores están puenteados. La telemetría se envía a la sala de control a través del sistema de comunicación de extremo a extremo.
- **Modo control de reactancia:** En este método de control, el SSSC está configurado para generar una reactancia fija que es capacitiva o inductiva. En este método de control, el voltaje inyectado variará a medida que cambia la corriente de línea para mantener la reactancia en un valor establecido
- **Modo control de tensión:** En este modo el SSSC para generar una inyección de tensión fijo que sea capacitivo o inductivo. En este método de control, la reactancia emulada inyectada variará a medida que cambia la corriente de línea.
- **Modo control de corriente:** En este método de control, los SSSC regulan activamente la magnitud de la corriente a través de la instalación para mantenerse por debajo de un nivel determinado.

2 METODOLOGÍA PROPUESTA

La metodología propuesta para evaluar el desempeño de los equipos SSSC se presenta en la Grafica 3. La evaluación del desempeño se aplica para cada SSSC obteniendo resultados de métricas y visualizaciones de forma automática.

Las entradas de esta metodología son datos de tiempo real del sistema de supervisión, control y adquisición de datos (SCADA), almacenados en sistemas de históricos, como: corriente a través del dispositivo o la línea de transmisión (I), valores inyectados por el equipo de reactancia (X) o tensión (V), valores objetivo de tensión (VO), reactancia (XO) o corriente (IO), el modo de operación, adicionalmente otras señales de estados de equipos de seccionamiento como los relacionados al baipás. Por otra parte, se requieren parámetros técnicos de los equipos como las corrientes y tensiones mínimas y máximas del equipo, y parámetros de la corriente mínima de inyección (CMI) y umbral de corriente para permanecer en modo inyección (UCPMI) cuando el equipo está en rampa de descenso de inyección.



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3. Diagrama de flujo de la evaluación de desempeño de SSSC

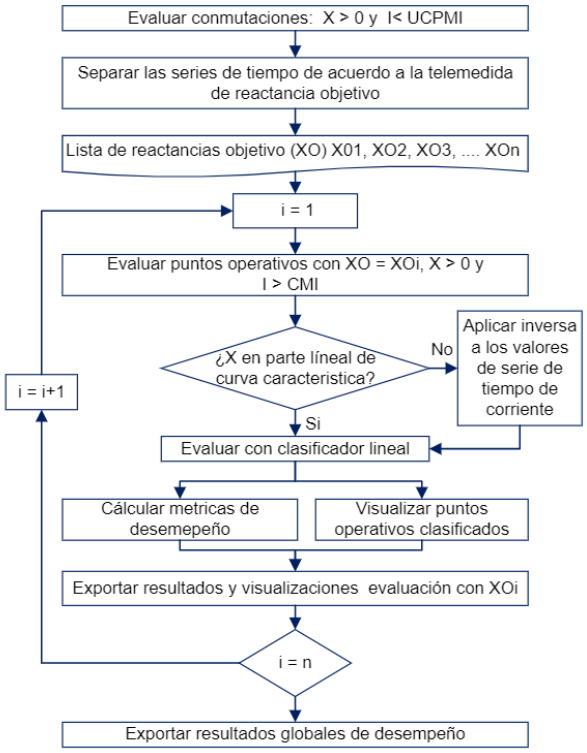
Posteriormente, con los datos del modo de operación se define qué tipo de evaluación de desempeño realizar, entre los tipos están la evaluación de desempeño para el control de reactancia, tensión o de umbral de corriente, o por fuera de esos modos como el modo monitoreo, para esta última la evaluación se realiza teniendo en cuenta que el equipo no debe inyectar.

Los resultados de evaluación del desempeño son métricas de desempeño, resultados de los clasificadores de series de tiempo entrenados para cada modo de operación de forma tabular y visualizaciones, gráficas de curva característica del SSSC y resultados del análisis de conmutaciones del equipo.

En la Gráfica 4 se presenta la metodología para evaluar el desempeño en modo control de reactancia. En esta metodología con los datos de SCADA y los parámetros técnicos se siguen los siguientes pasos:

- **Paso 1:** Se evalúan las conmutaciones para valores de corriente menores a la corriente de no inyección, en estos valores la reactancia inyectada debe ser cero, sin embargo, debido a las rampas de bajada en ohm/s se encuentran puntos operativos con corrientes menores a corriente de no inyección y con inyección de reactancia por el SSSC diferente de 0 Ω. Se evalúan el porcentaje de puntos operativos con respecto al total de puntos operativos evaluados y se obtiene el valor *ct* (cantidad de transitorios o conmutaciones) y se compara con un umbral *μ*. Si *ct* supera este umbral es detectado como una anomalía y se exporta información en detalle de esta evaluación, en caso contrario se exporta únicamente *ct*.
- **Paso 2:** Con los datos de series de tiempo de I, X, XO se dividen los datos de acuerdo con las diferentes reactancias objetivo XO.
- **Paso 3:** Para cada valor de reactancia se evalúa los puntos operativos en que la X es mayor a cero y la corriente mayor a CMI. En esta primera evaluación se define si el punto operativo está en la parte lineal o la no lineal de la curva característica.
- **Paso 4:** Se realiza la predicción del valor de impedancia de acuerdo con la corriente circulando por el equipo SSSC.
  - Para los puntos operativos en la parte lineal se utiliza un clasificador lineal entrenado con los valores de la curva característica corriente-reactancia.
  - Para los puntos operativos en la parte no lineal de la curva característica se realiza una conversión del valor inverso de la corriente con el fin de linealizar el comportamiento y utilizar un clasificador lineal entrenado con los valores de la característica inversa de corriente-reactancia.
- **Paso 5:** Se calculan las métricas de clasificación: error cuadrático medio (MSE), raíz del error cuadrático medio (RMSE), error absoluto medio (MAE) y puntaje R2.
- **Paso 6:** Se generan visualizaciones con los puntos operativos y clasificación de desempeño con la metodología.
- **Paso 7:** Se exporta los resultados y métricas de desempeño.

La evaluación del desempeño en el modo de control de tensión se realiza como la explicada previamente del modo control de reactancia en la parte lineal de la curva característica dado que en su comportamiento en tensión inyectada es lineal.



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 4. Diagrama de flujo de la evaluación de desempeño de SSSC en modo control de reactancia

3 IMPLEMENTACIÓN Y RESULTADOS

La metodología propuesta se implementó en Python con consulta a los sistemas de históricos de los datos operativos para la evaluación de siete equipos SSSC actualmente instalados y en

operación en el sistema interconectado colombiano todos han operado en modo de control de reactancia. Estos equipos están instalados en diferentes niveles de tensión, cuatro en 220 kV y los otros tres en 110 kV.

La herramienta desarrollada permite evaluar el desempeño de forma automática de todos o algunos de los SSSC especificados, y para un periodo entregado por el usuario como dato de entrada. Para este artículo se mostrarán resultados de la evaluación de desempeño de uno de los SSSC en el modo de control de reactancia para un mes completo de operación. El equipo tiene las características mostradas en la Tabla 2.

Parámetro	Valor
Corriente mínima	100 A
Corriente máxima	1800 A
Tensión mínima	56 V
Tensión máxima	566 V
UCPMI	170 A
CMI	200 A

Fuente: Elaboración propia

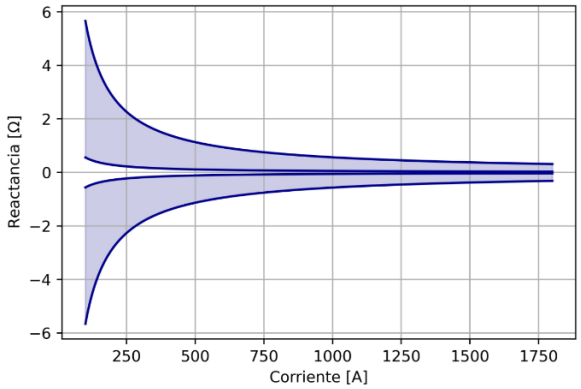
Tabla 2. Parámetros de SSSC de ejemplo

3.1 CURVA CARACTERÍSTICA

A partir de los parámetros de corrientes y tensiones mínimas y máximas se obtiene la característica corriente-reactancia del SSSC. Como la que se muestra en la Gráfica 5, en la que se observa la característica no lineal de la inyección de reactancia con respecto a la corriente.

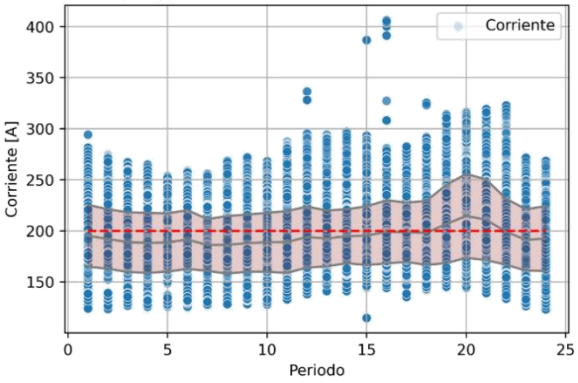
3.2 ESTADÍSTICA DE CORRIENTE

Los resultados de la corriente por periodos del día que circula por el equipo SSSC durante el mes de operación analizado se muestra en la Gráfica 6. La línea punteada en rojo es la CMI y los valores sombreados son los valores entre la media ± 1 desviación estándar. De los valores de la corriente se observa que la media para la mayoría de los periodos es cercana al CMI por lo que en gran parte del tiempo el equipo SSSC estaría operando.



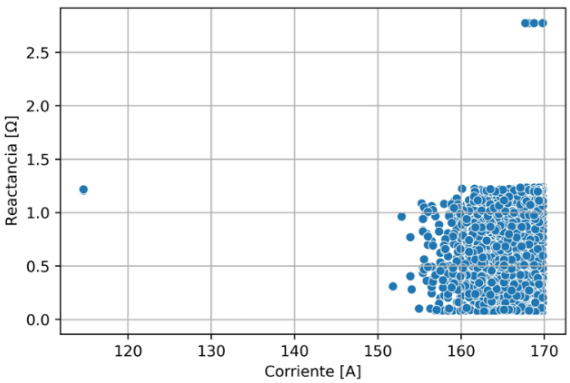
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 5. Curva característica corriente-reactancia SSSC



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 6. Corriente SSSC por periodo del día



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 7. Puntos operativos con I < UCPMI y diferente de cero.

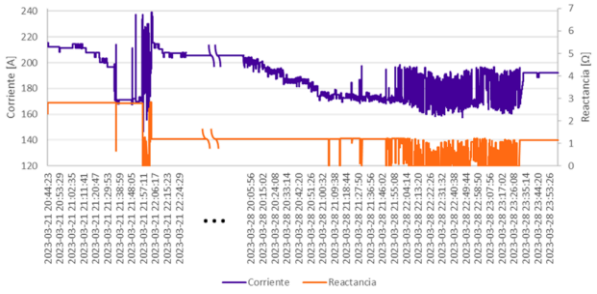
3.3 EVALUACIÓN DE CONMUTACIONES

Del análisis de conmutaciones se obtuvo que para el tiempo analizado de este SSSC el valor de ct es del 7.96 % del total de puntos operativos analizados, se tomó como umbral el μ de 2 %, por lo que en esta evaluación supera ese valor y es relevante revisar la condición operativa del equipo con respecto a las conmutaciones. En la Gráfica 7 se observan los valores de transitorios de conmutación.

3.4 EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO

3.4.1 SERIE DE TIEMPO

En la Gráfica 8, a modo de ejemplo, se presenta las series de tiempo de corriente y reactancia para algunos de los días evaluados.

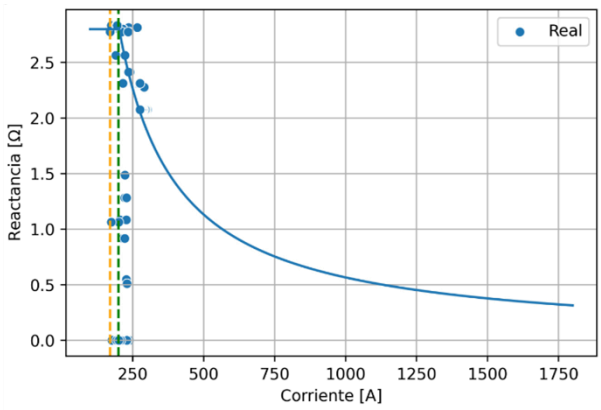


Fuente: Elaboración propia

Gráfica 8. Serie de tiempo de corriente y reactancia.

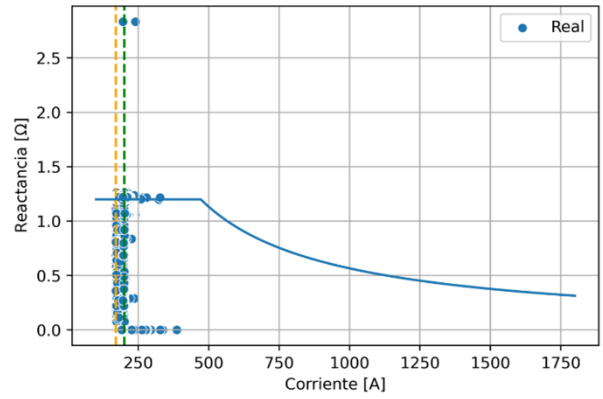
3.4.2 PUNTOS OPERATIVOS

En las Gráficas 9-(a) y (b) se presentan los puntos operativos de corriente - reactancia monitoreados para dos XO configuradas en el SSSC, 2.8 y 1.2 Ω, respectivamente. Adicionalmente, en las gráficas se observa la curva de operación para cada reactancia configurada del SSSC, precisamente estos valores son los datos con los que se entrena el clasificador lineal ya sea con la corriente o la inversa de la corriente. En las gráficas de esta sección la línea punteada amarilla hace referencia al UCPMI y la verde al CMI.



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 9-(a). Puntos operativos de SSSC para una XO de 2.8 Ω.

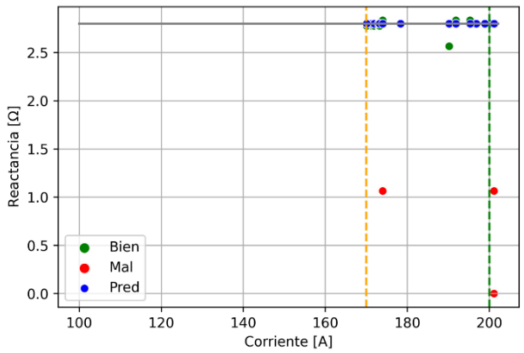


Fuente: Elaboración propia

Gráfica 9-(a). Puntos operativos de SSSC para una XO de 1.2 Ω.

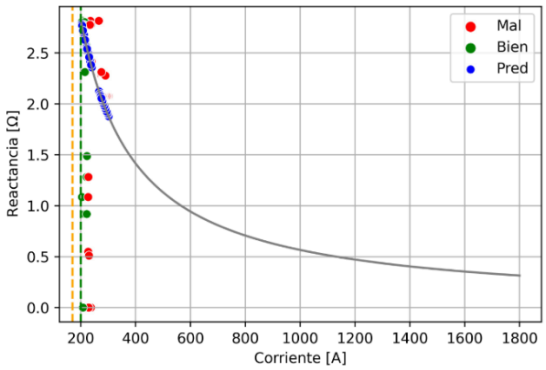
3.4.3 CLASIFICACIÓN DE DESEMPEÑO

En la clasificación del desempeño se utiliza el valor de la predicción del clasificador (Pred) en los diferentes valores de XO y se compara con cada punto operativo y si este es menor al ± 10 % de error lo marca como “Bien” de lo contrario lo marca como “Mal”. En las Gráfica 10-(a) y (b) se presenta la clasificación con reactancia 2.8 Ω en la zona lineal y no lineal, respectivamente, y en la Gráfica 10-(c) con reactancia de 1.2 Ω.



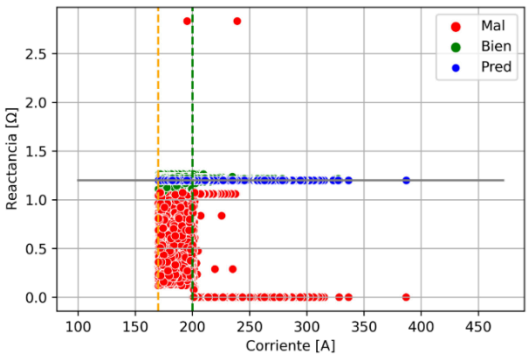
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 10-(a). Clasificación de desempeño de SSSC para una XO de 2.8 Ω zona lineal



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 10-(b). Clasificación de desempeño de SSSC para una XO de 2.8 Ω zona no lineal.



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 10-(c). Clasificación de desempeño de SSSC para una XO de 1.2 Ω zona lineal.

De la clasificación se observan varios puntos con clasificación “Mal” en zonas en las que el equipo debía inyectar y la X es cero o con valores muy por debajo de su XO. Los valores con mal desempeño entre UCPMI y CMI se pueden deber a rampas de subida o bajada en estados de conmutación del equipo.

3.4.4 MÉTRICAS DE DESEMPEÑO

La evaluación del desempeño global del SSSC se realiza con métricas de clasificación como el MSE, RMSE, MAE, puntaje R2. La Tabla 3 presenta los resultados de las métricas de desempeño para diferentes condiciones operativas.

Reactancia (Ω) - XO	Tipo	Métrica	Criterio Buen Desempeño	Desempeño
2.8	Lineal	MSE	< 0.15	Bueno
2.8	Lineal	RMSE	< 0.15	Malo
2.8	Lineal	MAE	< 0.15	Bueno
2.8	Lineal	R2	> 0.8	Malo
2.8	No lineal	MSE	< 0.15	Bueno
2.8	No lineal	RMSE	< 0.15	Malo
2.8	No lineal	MAE	< 0.15	Malo
2.8	No lineal	R2	> 0.8	Malo
1.2	Lineal	MSE	< 0.15	Malo
1.2	Lineal	RMSE	< 0.15	Malo
1.2	Lineal	MAE	< 0.15	Malo
1.2	Lineal	R2	> 0.8	Malo

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. Resultados de métricas de desempeño

De las métricas de desempeño global para los diferentes XO se obtiene que el equipo tuvo mal desempeño durante el tiempo de operación analizado dado que no cumple la mayoría de las métricas analizadas.

4 IMPACTO DE LA IMPLEMENTACIÓN EN EL CENTRO NACIONAL DE DESPACHO (CND)

Con la implementación de la metodología y herramienta se han identificado condiciones de anomalías en la operación de los equipos SSSC, con ello, riesgos actuales y futuros en la operación, y acciones para mitigar nuevas condiciones de riesgo en la confiabilidad y seguridad de la red eléctrica. Adicionalmente, debido a que estos equipos se integraron recientemente se requiere conocer los impactos en la red eléctrica y capitalizar lecciones aprendidas para la mejora de los procesos.

Por otro lado, los resultados de la herramienta y de la evaluación del desempeño han demostrado la necesidad de un proceso transversal en el CND desde la planeación de la operación hasta el cierre del ciclo operativo en la evaluación de la operación para la operación segura y confiable y la optimización de los recursos y equipamiento en red completa, mantenimientos y en la seguridad de la red.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Debido a las condiciones actuales de operación del sistema interconectado colombiano, es necesario optimizar el uso de la infraestructura existente. Por ello, los SSSC se están implementando como una tecnología innovadora para el control de flujos de potencia.

Se ha presentado una metodología para evaluar el desempeño de los equipos SSSC, que forman parte de los recursos basados en inversores. Esta metodología evalúa tres condiciones clave: las conmutaciones del equipo, su conexión o desconexión según el modo de control y parametrización, y el error de control. Gracias a esta evaluación exhaustiva, se puede asegurar un funcionamiento óptimo y confiable de los equipos SSSC, contribuyendo así a la estabilidad y eficiencia del sistema eléctrico.

Basada en modelos de inteligencia artificial, esta metodología ha demostrado ser efectiva para determinar la correcta operación de cada equipo SSSC conectado al sistema eléctrico de potencia. Su implementación ha permitido identificar condiciones de operación en equipos reales del sistema interconectado colombiano, tales como conmutaciones, errores en los valores de inyección y condiciones de no inyección indeseadas.

6 REFERENCIAS

[1] N. Castrillón, J. D. Pinzón, J. González, C. Zapata, y C. Moreno, «SSSC Model Validation Experience for the Colombian Power System», en *CIGRE Paris Session 2024*, CIGRE, 2024.

[2] C. E. Borda, J. A. Calderon, J. G. Ortega, S. Hincapie, y A. Duque, «M-SSSC como tecnología habilitadora de la integración de energía renovable en Colombia», en *XIX Encontro Regional Ibero-Americano do CIGRE-ERIAC*, 2023.

[3] Z. Zhao y A. Soroudi, «Optimal Deployment of Mobile MSSSC in Transmission System», *Energies*, vol. 15, n.º 11, p. 3878, 2022.

[4] J. D. Pinzón y C. Moreno, «Operation of Static Series Synchronous Compensators integrated into the Colombian Power System: Challenges, Experiences and Lessons Learned», en *CIGRE Paris Session 2024*, CIGRE, 2024.

[5] C. A. Ordoñez y D. Schweer, «Modular static synchronous series compensator (M-SSSC): EMT modeling for real-time and offline simulations», en *XIX Encontro Reg. Ibero-Americano do CIGRE-ERIAC*, 2023.

HOJA DE VIDA DE LOS AUTORES

Jaime Dwaigth Pinzón Casallas

Ingeniero Eléctrico, 2013, Universidad Distrital, Colombia
Especialista Eficiencia Energética, 2015, Universidad de Alcalá, España
Doctor en Ingeniería Eléctrica, 2019, Universidad Nacional de San Juan, Argentina
Posdoctorado en Ingeniería, 2025, Universidad Distrital.
Cargo actual: Especialista Operaciones Corporativas
ISA Interconexión Eléctrica SA ESP

Camilo Moreno Cossio

Ingeniero Electricista
Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín,
Cargo actual: Analista Evaluación Operación
XM SA ESP