

Jornadas de **Conocimiento** e **Innovación** 2026
ENERGÍA QUE DA **VIDA** A LA **TRANSICIÓN**

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

Autores
- Jaime D. Pinzón, PhD
- Camilo Moreno

isa
CONEXIONES QUE INSPIRAN

Contenido

- Introducción SSSC
- SSSC en Colombia
- Metodología propuesta
- Implementación y resultados
- Conclusiones



CONEXIONES QUE INSPIRAN

Información Interna

Introducción SSSC - ¿Por qué instalarlos?

- El aumento de la demanda de energía requiere nueva generación y transmisión.
- La transición energética está incrementando el uso de fuentes de energía renovables variables.
- Se necesita un control del flujo de potencia en tiempo real para garantizar la flexibilidad de la red.

Antecedentes



- Restricciones en la capacidad actual de las líneas de transmisión existentes.
- Rentabilidad en la ampliación de subestaciones e infraestructura eléctrica.
- Dificultades para obtener licencias ambientales para nuevas líneas de transmisión.

Problema



- Se está implementando una nueva tecnología SSSC para controlar eficazmente el flujo de potencia ajustando la reactancia de un circuito en tiempo real.
- SSSC ayuda a equilibrar la carga, distribuir los flujos, aliviar la congestión y optimizar el uso de las líneas existentes.

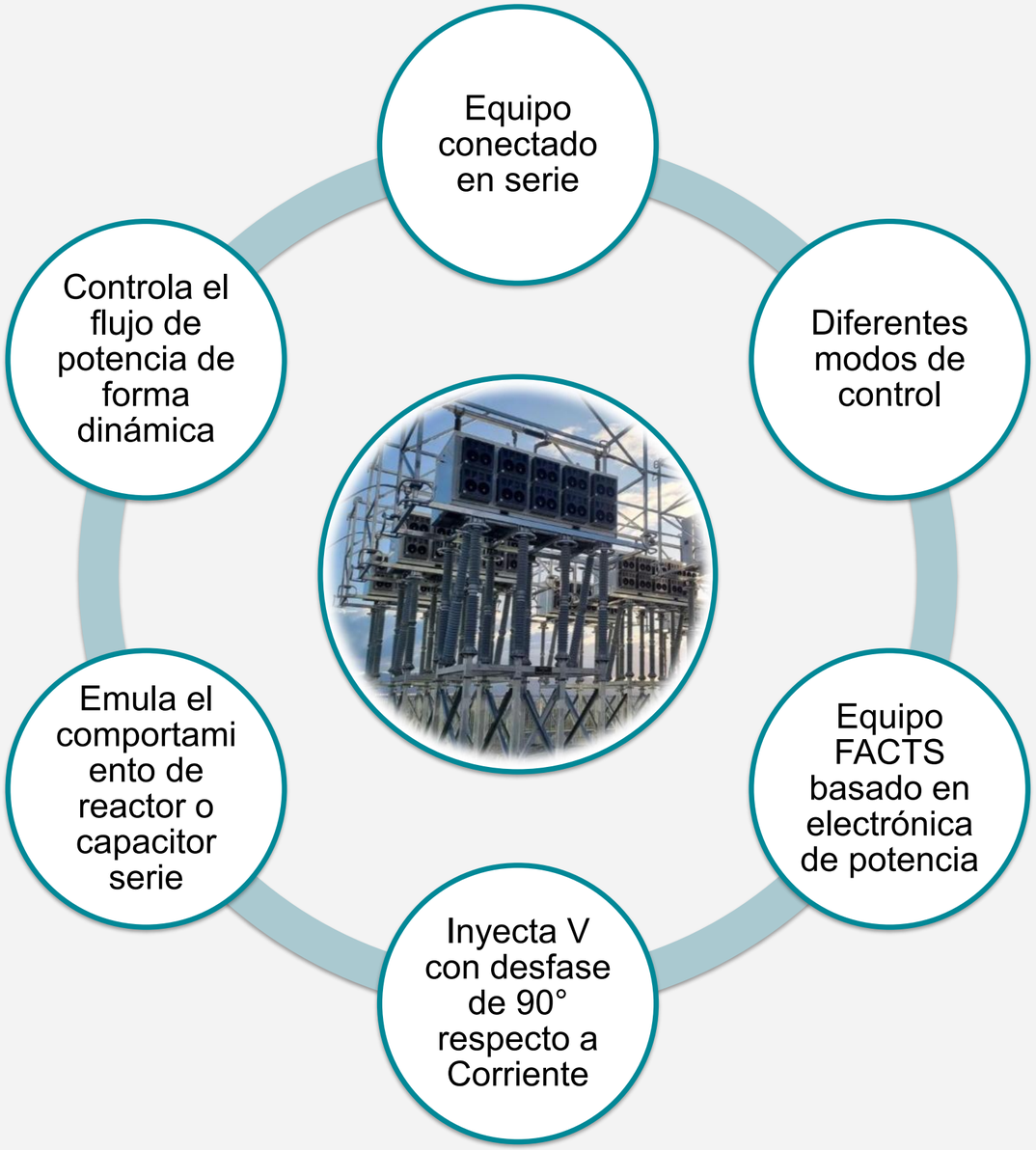
Solución



isa
CONEXIONES QUE INSPIRAN

Información Interna

Introducción SSSC

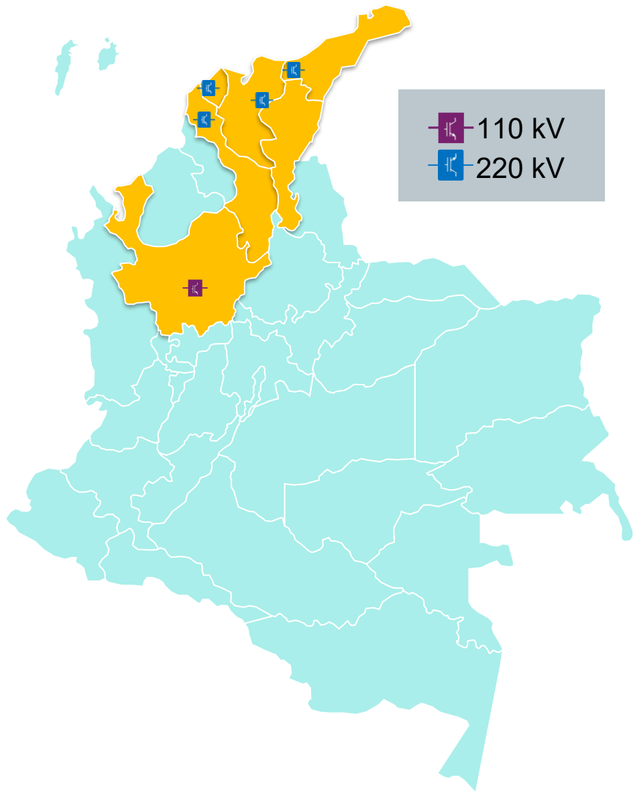


- **M** — **Modo monitoreo**
- **Ω** — **Modo reactancia**
- **V** — **Modo tensión**
- **I** — **Control corriente**

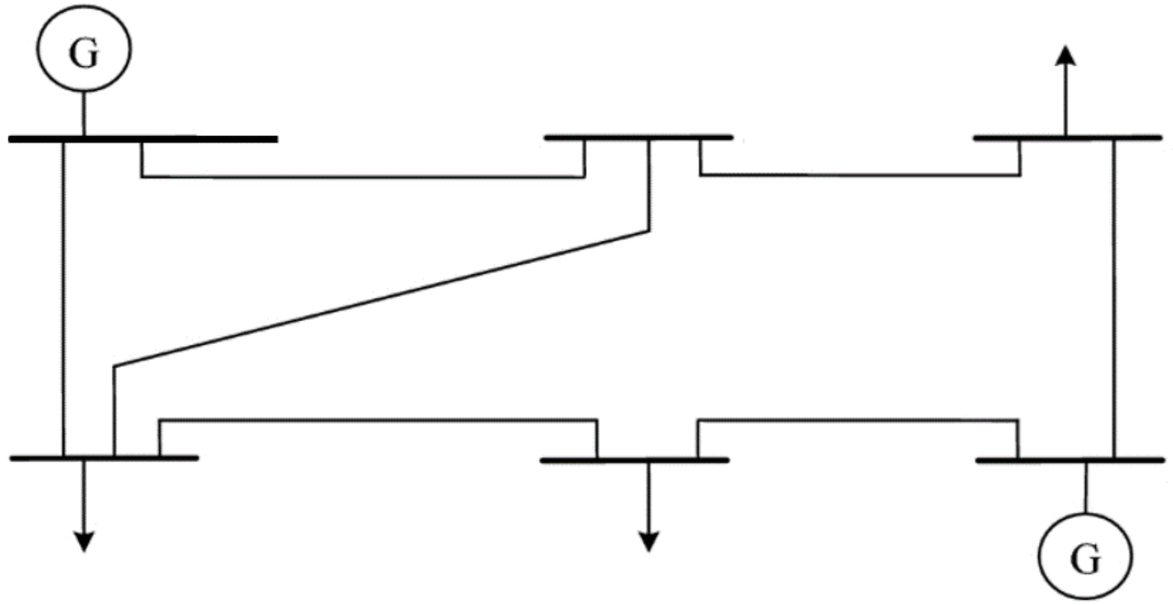
isa
CONEXIONES QUE INSPIRAN

Información Interna

SSSC en Colombia



Departamentos con instalaciones de SSSC (12 equipos)



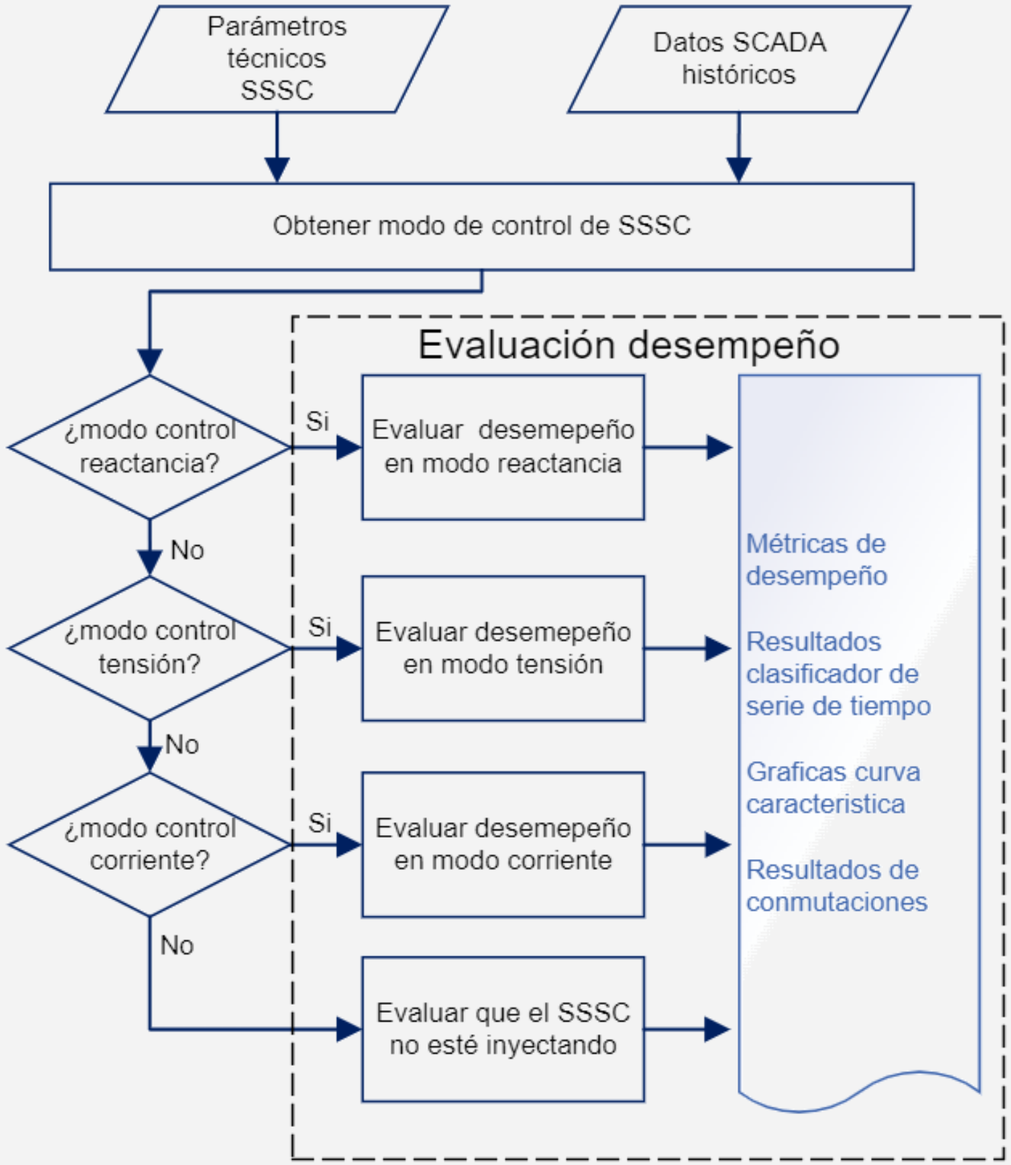
Aplicación de mitigación de restricciones por nueva generación convencional y renovable de algunos de los SSSC instalados en Colombia

isa
CONEXIONES QUE INSPIRAN

Información Interna

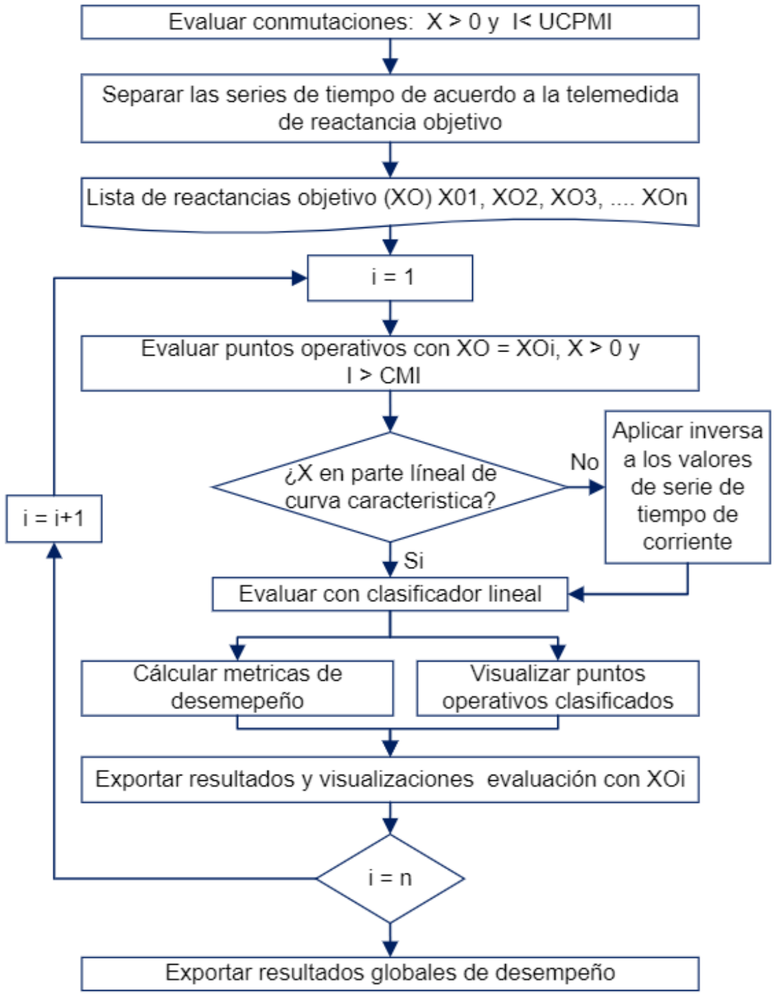
Metodología propuesta

- La evaluación del desempeño se aplica para cada SSSC obteniendo resultados de métricas y visualizaciones de forma automática.
- Se utiliza algoritmos de clasificación para evaluar los diferentes puntos operativos.
- Permite evaluar el desempeño del control del SSSC.
- Detecta y evalúa conmutaciones en la inyección.
  Evalúa cuando el SSSC debe estar inyectando o no de acuerdo a las condiciones operativas.
- Evalúa el desempeño tanto en la parte lineal como en la parte no lineal de las curvas características de operación.



isa
CONEXIONES QUE INSPIRAN

Metodología propuesta – Evaluación desempeño en modo reactancia



Mediciones de tiempo real de SCADA :

- Corriente a través del dispositivo (I)
- Valores inyectados de reactancia (X)
- Valores objetivo de reactancia (XO)
- Modo de operación
- Señales de estados de equipos de seccionamiento.

Parámetros técnicos de los SSSC.

- Las corrientes y tensiones mínimas y máximas del equipo
- Corriente mínima de inyección (CMI)
- Umbral de corriente para permanecer en modo inyección (UCPMI)

Métricas de desempeño utilizadas:

- Cantidad de transitorios o conmutaciones (ct)
- Error cuadratico medio (MAE)
- Raíz del error cuadrático medio (RMSE)
- Error absoluto medio (MAE)
- Puntaje R2

isa
CONEXIONES QUE INSPIRAN

Información Interna

Implementación y resultados

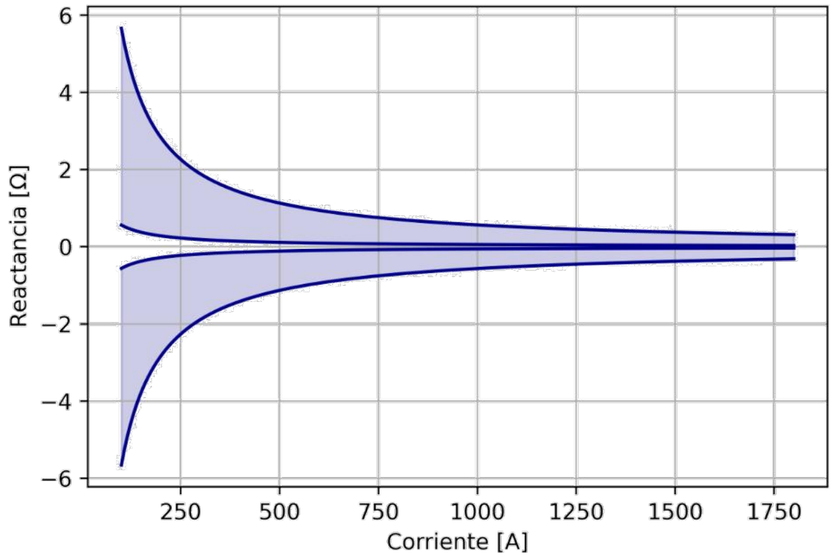
La metodología propuesta se implementó en Python con consulta a los sistemas de históricos de los datos operativos para la evaluación de los SSSC actualmente instalados y en operación.

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.

Parámetros de SSSC de ejemplo

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

Curva característica SSSC

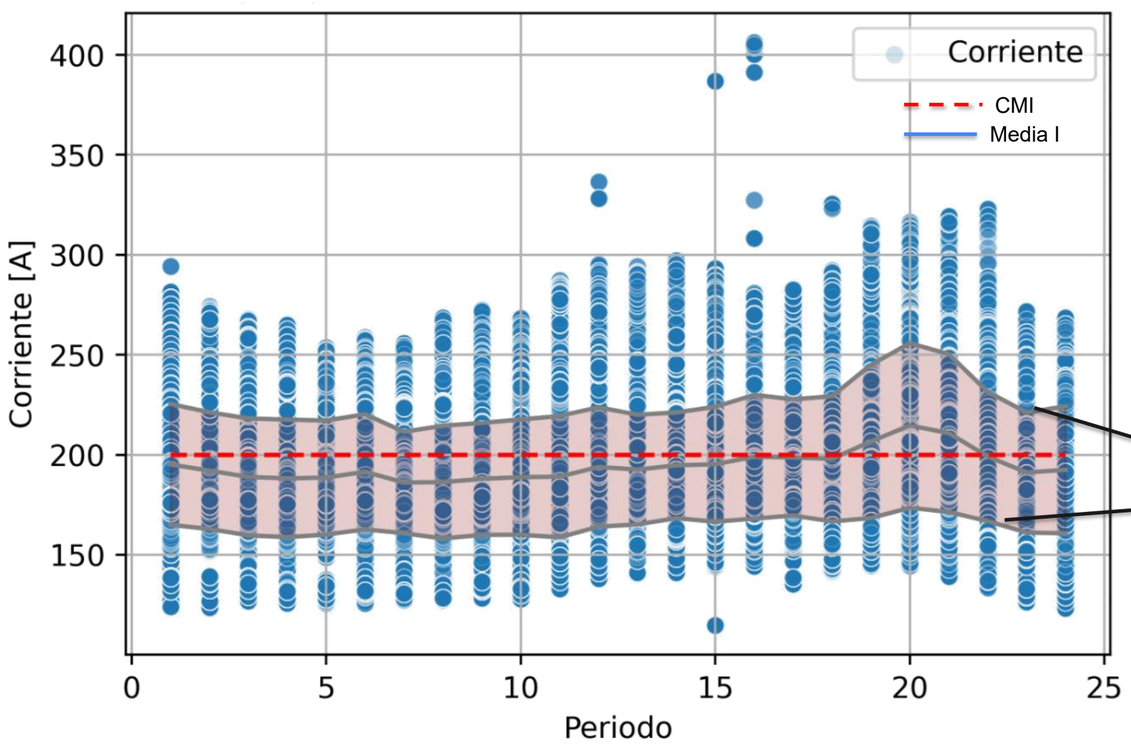


CONEXIONES QUE INSPIRAN

Información Interna

Implementación y resultados: Estadística de corriente

Corriente por periodos del día que circula por el SSSC



valores entre la media ± 1 desviación estándar

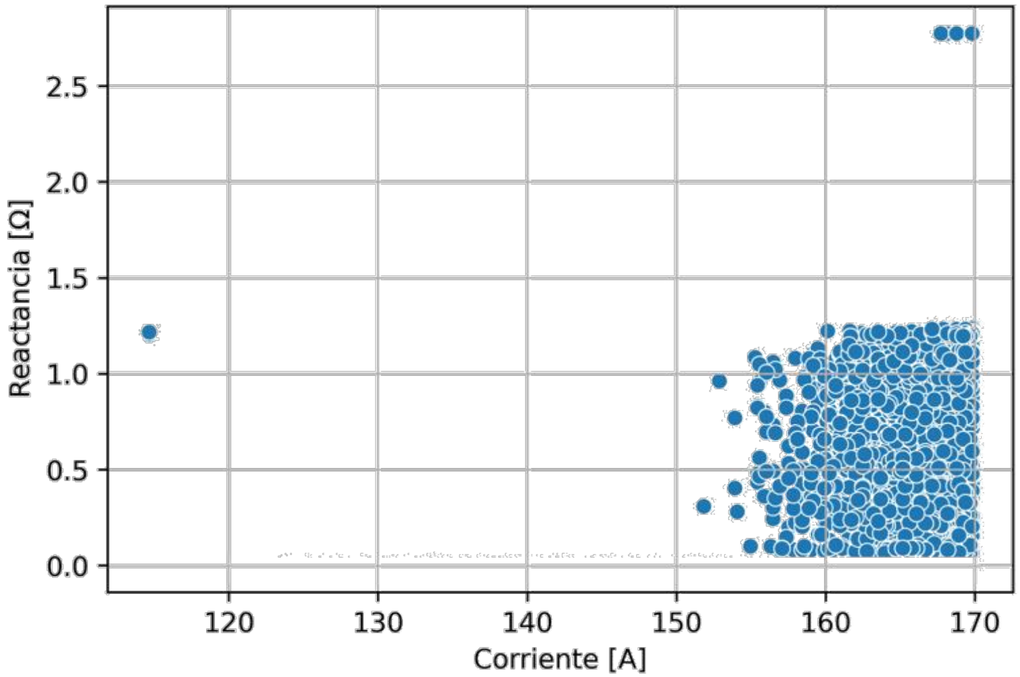
La media para la mayoría de los periodos es cercana al CMI por lo que en gran parte del tiempo el equipo SSSC estaría operando

isa
CONEXIONES QUE INSPIRAN

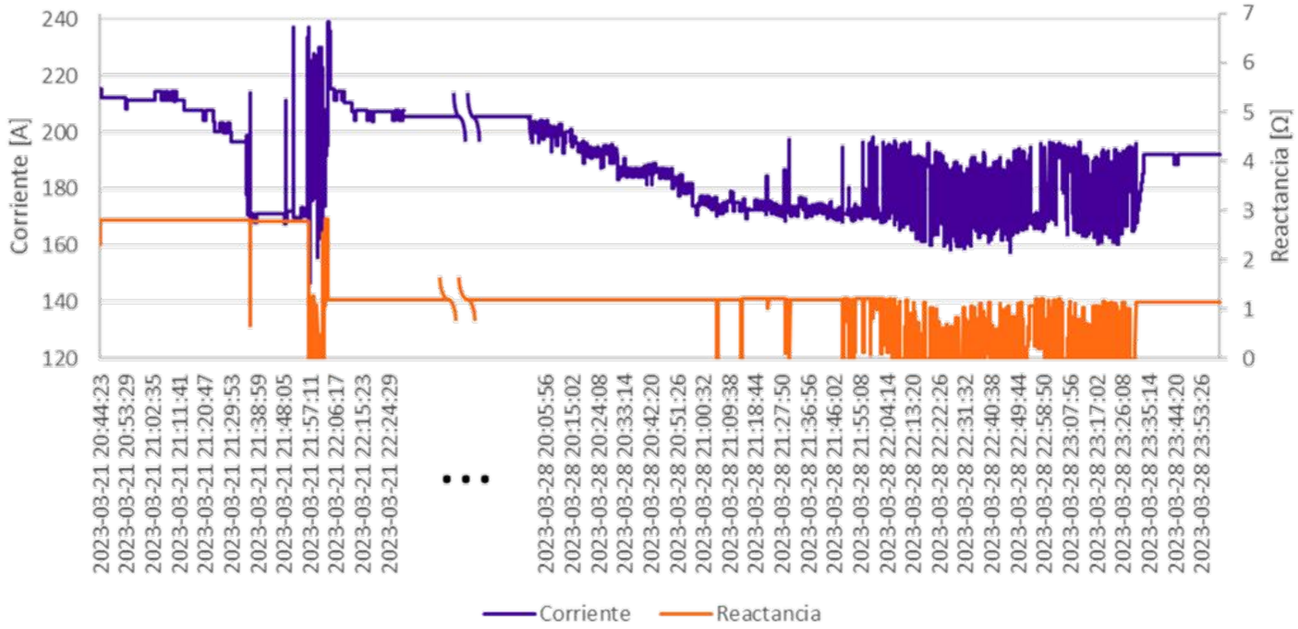
Información Interna

Implementación y resultados: Evaluación de conmutaciones

Puntos operativos con I < UCPMI y diferente de cero



Serie de tiempo de corriente y reactancia



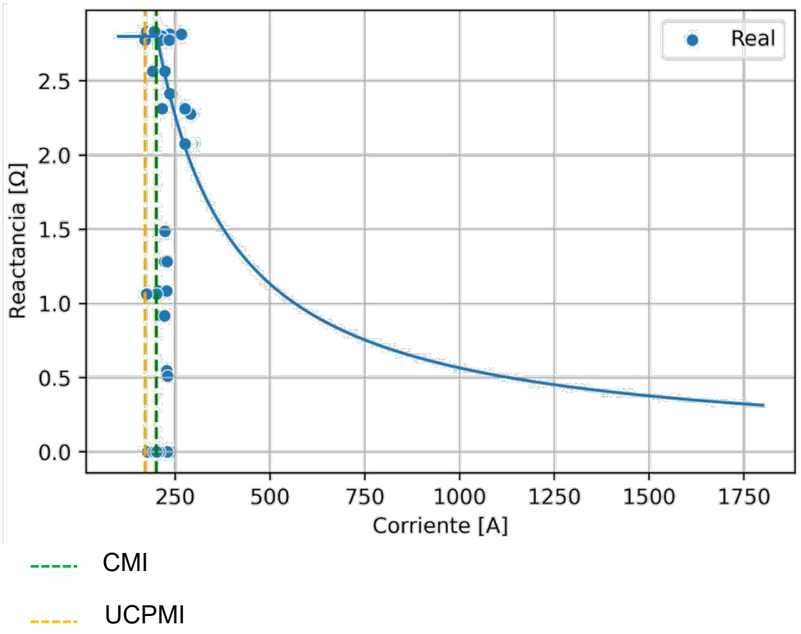
Indicador ct = 7,96 % > a referencia de 2 %

isa
CONEXIONES QUE INSPIRAN

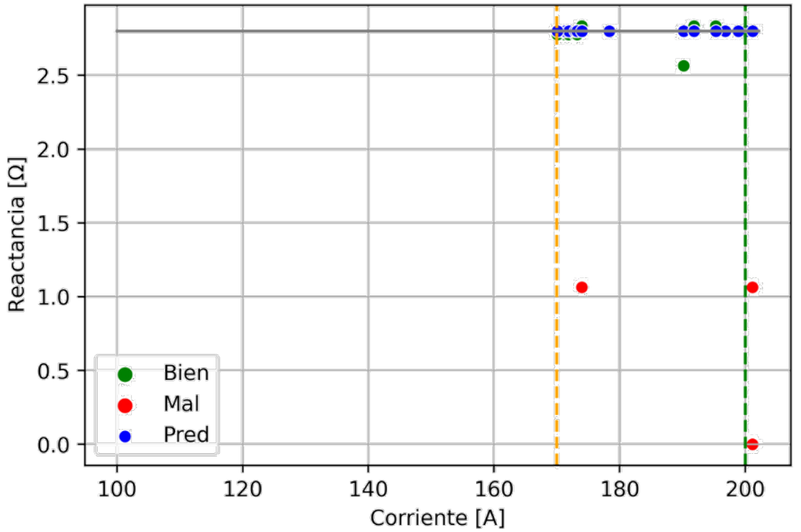
Información Interna

Implementación y resultados: Clasificación de desempeño

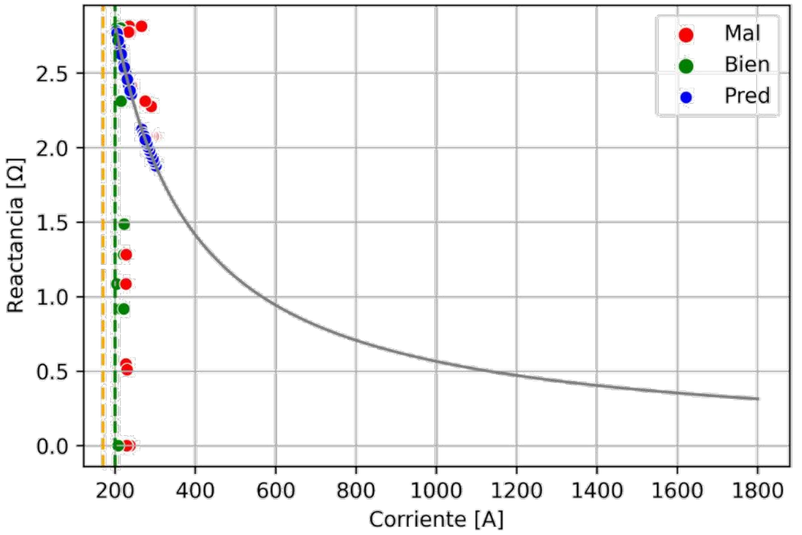
Puntos operativos de SSSC con XO de 2.8 Ohm



Clasificación zona lineal



Clasificación zona no lineal

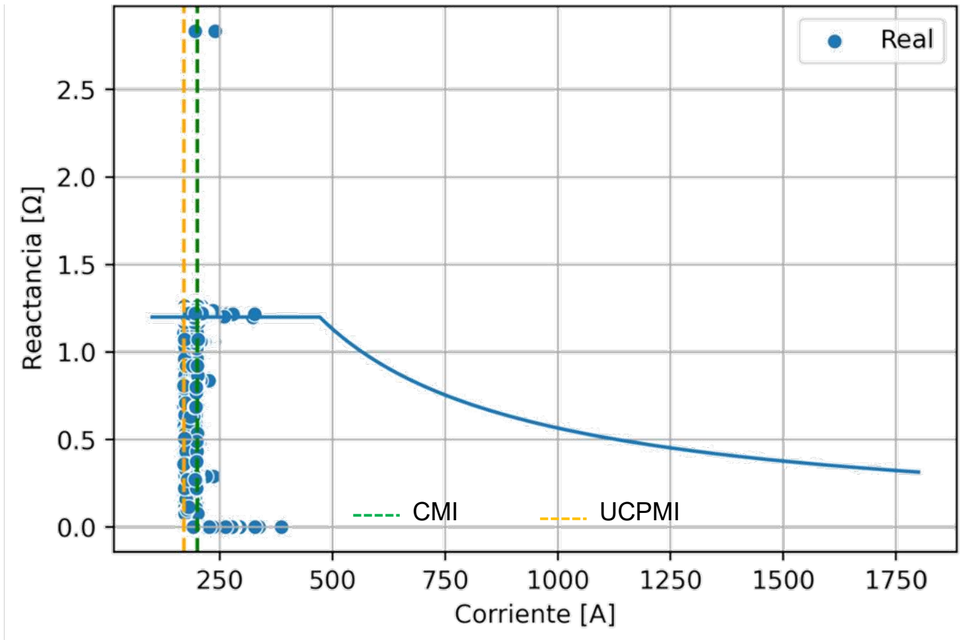


CONEXIONES QUE INSPIRAN

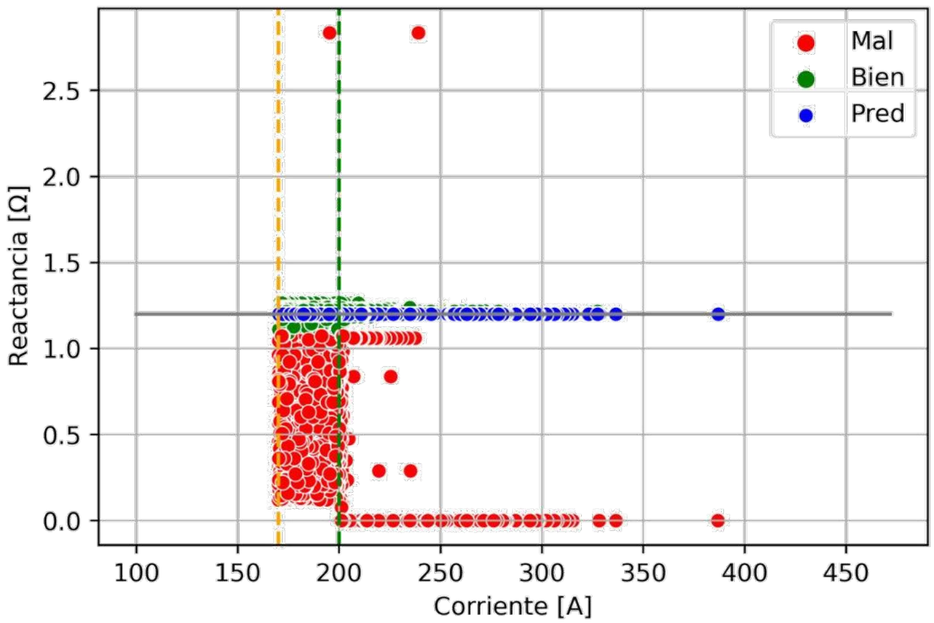
Información Interna

Implementación y resultados: Clasificación de desempeño

Puntos operativos de SSSC con XO de 1.2 Ohm



Clasificación zona lineal



CONEXIONES QUE INSPIRAN

Información Interna

Implementación y resultados: Métricas de desempeño



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

Reactancia (Ω) - XO	Tipo zona	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

isa
CONEXIONES QUE INSPIRAN

Información Interna

Conclusiones

- 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 presentó una metodología para evaluar el desempeño de los equipos SSSC. 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.

- Basada en modelos de machine learning, 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, tales como conmutaciones, errores en los valores de inyección y condiciones de no inyección indeseadas.

isa
CONEXIONES QUE INSPIRAN

Información Interna

¡GRACIAS!

Contacto autores:
Jaime D. Pinzón, PhD – jpinzon@isa.com.co
Camilo Moreno – cmoreno@xm.com.co

Jornadas de **Conocimiento** e **Innovación** 2026
ENERGÍA QUE DA **VIDA** A LA **TRANSICIÓN**

isa
CONEXIONES QUE INSPIRAN

Información Interna