

M-SSSC como tecnología habilitadora de la integración de energía renovable en Colombia

C.E. BORDA*	J.A. CALDERON	J.G. ORTEGA	S. HINCAPIE	A. DUQUE
Smart Wires Inc.	ISA	ISA INTERCOLOMBIA	Smart Wires Inc.	Smart Wires Inc.
Colombia carlos.borda ¹	Colombia jacalderon ²	Colombia jortega ³	Colombia sebastian.hincapie ¹	Colombia alejandros.duque ¹

Resumen – En el presente artículo se muestran los resultados del proceso de planeación de la expansión de la red en Colombia, en una zona con alto potencial de desarrollo de proyectos de generación renovables no convencionales como solar y eólico, y con fuertes limitaciones para la expansión tradicional de la transmisión. Como resultado se muestra la ubicación y el modo de operación de los dispositivos M-SSSC que permiten la integración de la generación renovable en el horizonte de planeamiento cumpliendo los criterios de operación y confiabilidad establecidos en la normatividad colombiana.

Keywords: FACTS – Compensación serie – M-SSSC – expansión de la transmisión

1 INTRODUCCIÓN

Para el cumplimiento de las metas de desarrollo sostenible y ambientales de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, las naciones se han embarcado en el cambio de su matriz energética hacia una matriz con mayor participación de energía renovable. Sin embargo, es muy frecuente que las zonas que tienen la mejor calidad de los recursos 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. De acuerdo con lo anterior, es aquí donde la integración de la tecnología M-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.

El presente estudio inicia con un diagnóstico de la operación del sistema en estado estacionario, los cuales se realizan en los años 2022, 2023, 2024 y 2032, en periodos de demanda máxima, media y mínima, para condiciones de operación normal (Red N) y ante contingencias sencillas (N-1). Posteriormente, se realizaron simulaciones considerando la actuación de los dispositivos M-SSSC. Los resultados permitieron validar el correcto desempeño de los dispositivos M-SSSC para eliminar las sobrecargas de las líneas de transmisión congestionadas al considerar escenarios con alta integración de generación en la zona de estudio.

2 TECNOLOGÍA M-SSSC

El dispositivo tipo FACTS M-SSSC, que se muestra en la Figura 1 (izquierda), inyecta una tensión en cuadratura con la corriente de la línea, ya sea en atraso o en adelanto, proporcionando la funcionalidad de un condensador serie o un reactor serie respectivamente. Sin embargo, a diferencia de las soluciones serie tradicionales, el M-SSSC puede inyectar el voltaje de forma independiente de la corriente de la línea como se observa en la Figura 2 (izquierda) de tal forma que controla la reactancia efectiva que se inyecta como se observa en la Figura 2 (derecha).

* Calle 7D# 43A – 40, Medellín, Colombia – ¹@smartwires.com ²@isa.com.co ³@intercolombia.com



- Diagram Key:**
1. Input Terminal
 2. Output Terminal
 3. Surge Protection
 4. High-Pass Filter
 5. Low-Pass Filter
 6. Surge Protection
 7. SCR
 8. VSL
 9. Enclosure
 10. VSCs
 11. VSC bypass

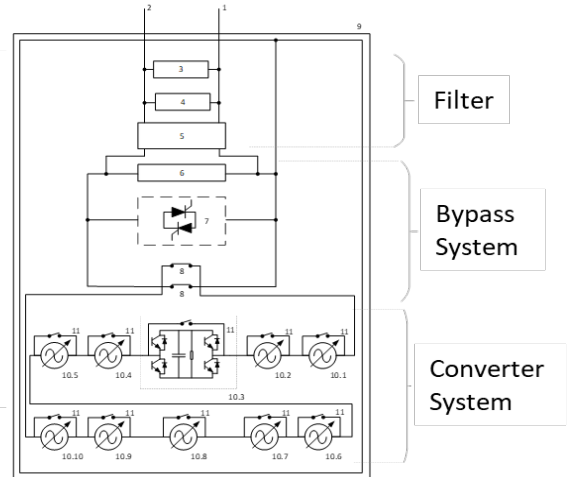


Figura 1. Instalación M-SSSC (izquierda) y diagrama eléctrico (derecha) [1]

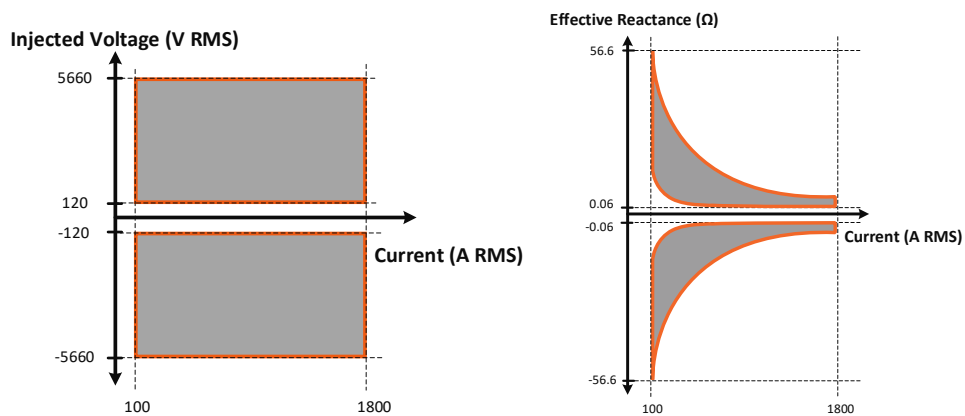


Figura 2. Rango operativo de tensión del M-SSSC (izquierda) y Rango operativo de reactancia (derecha)

Un M-SSSC consiste en un arreglo serie de VSCs como se ve en la Figura 1 (derecha). El puente H de cada convertidor usa IGBTs para inyectar una tensión directamente a la red y así mantener una reactancia objetivo. Lo anterior se logra midiendo la corriente de la línea en magnitud y ángulo de fase para determinar la magnitud de tensión a inyectar y el instante en que se comanda la operación de los IGBTs. El dispositivo M-SSSC puede operar en varios modos de control incluyendo voltaje fijo y reactancia fija. Adicionalmente, puede recibir comandos desde los centros de control vía SCADA. De esta forma se puede hablar de despachar la reactancia de la línea dependiendo de las necesidades del sistema.

3 AREA DE ESTUDIO Y ESCENARIOS

A continuación, se muestran las topologías y consideraciones de proyectos de generación a considerar en los escenarios 2022, 2023 y 2024. Dentro del sistema eléctrico colombiano, la zona GCM es una de las más importantes del norte del país, ya que concentrará gran parte de las futuras Energías Renovables No Convencionales (ERN) del sistema. A través de los estudios eléctricos desarrollados se evidenció el

agotamiento de la red imposibilitando la conexión oportuna de nueva generación dentro de los plazos

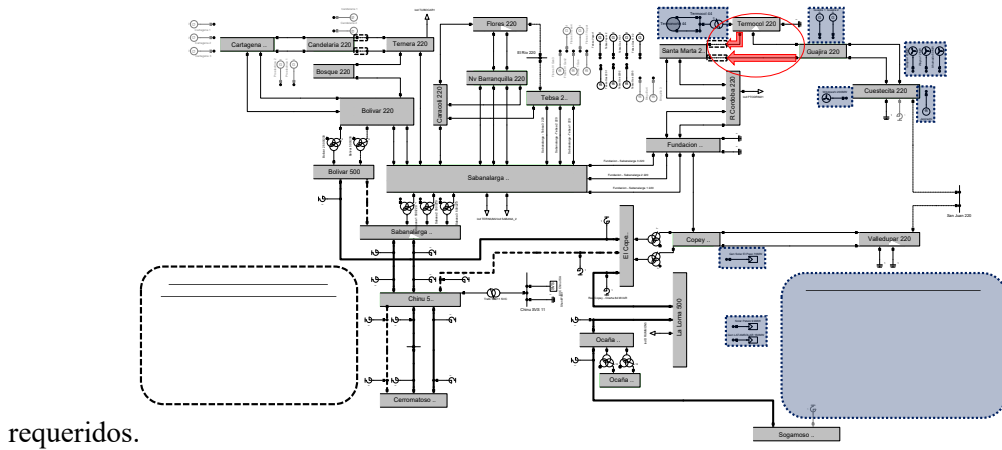


Figura 3. Diagrama unifilar de la topología analizada para el año 2022

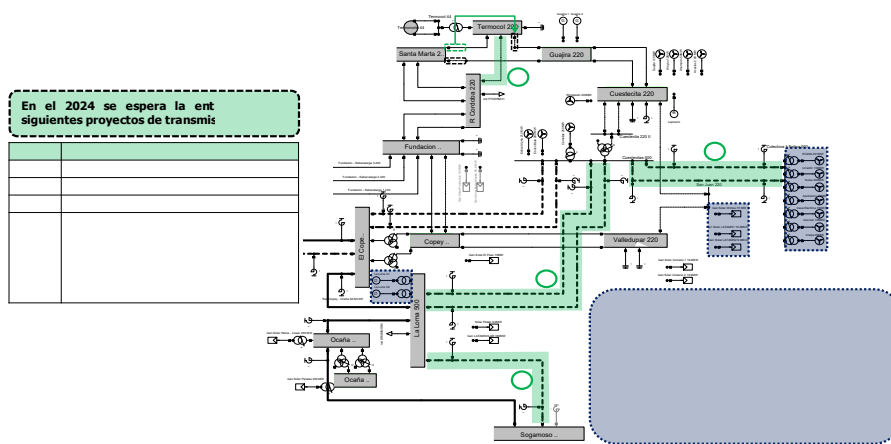


Figura 4. Diagrama unifilar de la topología analizada para el año 2024

4 CRITERIOS TECNICOS DE DESEMPEÑO DEL SISTEMA

Para los análisis que se realizaron, se tuvieron en cuenta todos los criterios eléctricos definidos en el Código de Redes de Colombia [2], y especialmente en el Código de Planeamiento.

En general, se verifica el cumplimiento de los requerimientos de calidad, seguridad y confiabilidad para la operación y planeación del Sistema de Transmisión Nacional (STN), que a continuación se resumen los más relevantes:

4.1 Calidad

- ✓ La tensión en las barras de carga a nivel de 500, 230 y 115 kV no debe ser inferior al 90% del valor nominal.
- ✓ La tensión en las barras de carga a nivel de 230 y 115 kV no debe ser superior al 110%, o al 105% en barras de 500 kV.

4.2 Seguridad

- ✓ La cargabilidad de los transformadores se mide por su capacidad de corriente nominal, para tener en cuenta las variaciones de tensión de operación con respecto al nominal del equipo.
- ✓ La operación del sistema dentro de los límites de carga determinados anteriormente, exceptuando la sobrecarga de transformadores, se consideran como operación normal. Fuera de ellos, el sistema se considera que está en estado de alerta o de emergencia.

4.3 Confiabilidad

- ✓ Se seleccionó el método determinístico con el criterio N 1 para el análisis de confiabilidad, según el cual el STN debe ser capaz de transportar en estado estable la energía desde los centros de generación hasta las subestaciones de carga en caso normal de operación y de indisponibilidad de un circuito de transmisión a la vez.
- ✓ En el análisis de estado estacionario se consideran solo contingencias sencillas en las líneas de transmisión y en los transformadores.

4.4 Criterios adicionales

Adicional a los criterios anteriores establecidos por el Código de Planeamiento, normalmente se han tenido en cuenta otros criterios para la planeación de la expansión del STN, que a continuación se indican, los cuales apuntan a garantizar una adecuada calidad y optimización del STN existente, sin caer en incumplimiento o contradicción con el Código de Redes:

- ✓ No se permiten sobrecargas en condiciones de operación normal.
- ✓ No se permiten sobrecargas en condiciones de operación de contingencia sencilla en líneas o transformadores del STN (condición de emergencia), por encima de la capacidad declarada por cada propietario.
- ✓ No se permiten violaciones en los límites de absorción o inyección de reactivos de los generadores y de las compensaciones dinámicas.
- ✓ Las maniobras de compensaciones no deben provocar variaciones de tensión mayores al 5%.

5 METODOLOGÍA

Se realiza un diagnóstico mediante simulaciones de flujo de carga y teniendo en cuenta la actuación de los dispositivos M-SSSC. Acorde a esta condición, los análisis se realizaron en un escenario de alta generación en la zona de influencia, que es donde se evidencia la restricción asociada al corredor Guajira – Santa Marta – Termocol (Bonda) 220 kV. Se considera que, para los demás escenarios de generación posibles, donde no se evidencie la restricción en el corredor Guajira – Santa Marta – Termocol (Bonda) 220 kV, los equipos SSSC estarían en estado de monitoreo, es decir, con el Bypass activo, ya que las mismas no se requerirían para el control de restricciones. Se realizaron flujos de carga en AC en los escenarios de los años 2022, 2023, 2024 y 2032 en periodos de demanda máxima, media y mínima para condiciones de operación normal y ante contingencias sencillas (N-1) de la zona de influencia.

Para la operación, se consideran los equipos M-SSSC en modo reactancia fija, en el que se establece un valor fijo de inyección de reactancia serie, el cual no cambia en función de la corriente de la línea, por lo que el voltaje inyectado varía de forma directamente proporcional a la corriente.

6 RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados para escenarios 2022 y 2024. Para el escenario del año 2022, se identifica la restricción en el anillo Guajira – Santa Marta – Termocol (Bonda) 220 kV, como se muestra a continuación en la Figura 5:

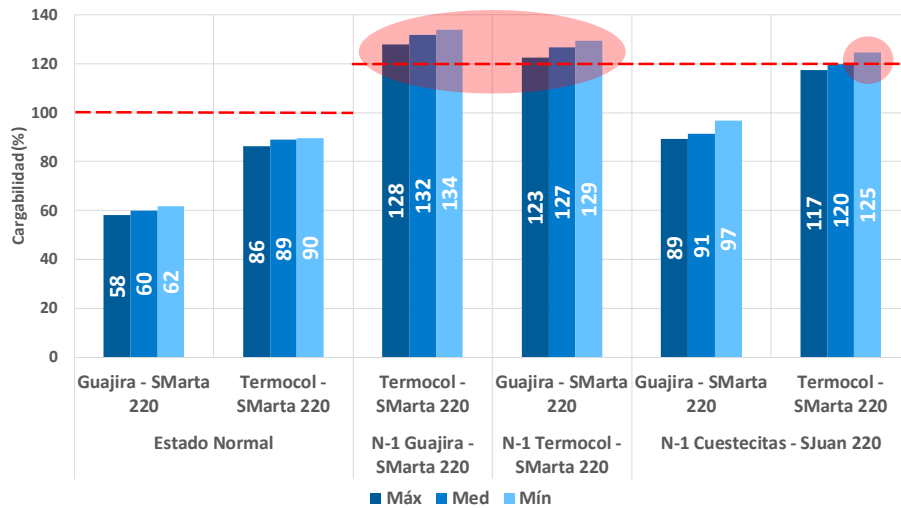


Figura 5. Restricción en el anillo Guajira – Santa Marta – Termocol (Bonda) 220 kV evidenciada en el 2022 sin considerar M-SSSC

Acorde a lo anterior, se calcula la reactancia a inyectar por los M-SSSC en los circuitos Guajira – Santa Marta 220 kV y Termocol (Bonda) – Santa Marta 220 kV para controlar la restricción en los diferentes periodos donde se evidencia, cuyo valor se detalla a continuación en la Tabla 1:

Tabla 1. Reactancia a inyectar en Guajira – Santa Marta 220 kV y Termocol (Bonda) – Santa Marta 220 kV para controlar la restricción con M-SSSC en modo reactancia fija en el 2022

Línea	Cap. Nominal (A)	Cap. Emergencia (A)	Máx. corriente evidenciada (A)	Corriente objetivo (A)	X de la línea (Ohms)	X a inyectar (Ohms)	X final (Ohms)
Guajira – Santa Marta	656	787	848	<780	45.16	17	62.16
Termocol (Bonda) – Santa Marta	656	787	878		5.70	27	32.70

Finalmente, se verifica mediante flujos de carga que el cambio de reactancia en las líneas Guajira – Santa Marta 220 kV y Termocol (Bonda) – Santa Marta 220 kV sea efectivo para controlar la restricción en todos los casos y que no existan restricciones adicionales, por lo que se realizan todas las N-1 del área de influencia, teniendo en cuenta la operación de los M-SSSC en modo reactancia fija e inyectando el valor detallado en la Tabla 1.

En la Figura 6 se muestran los resultados de cargabilidades más altas evidenciadas, de las cuales ninguna supera la capacidad de los equipos, lo que permite concluir que en el 2022 se puede controlar la restricción del anillo Guajira – Santa Marta – Termocol (Bonda) 220 kV mediante la operación de los M-SSSC en modo reactancia fija y no se genera ninguna restricción adicional.

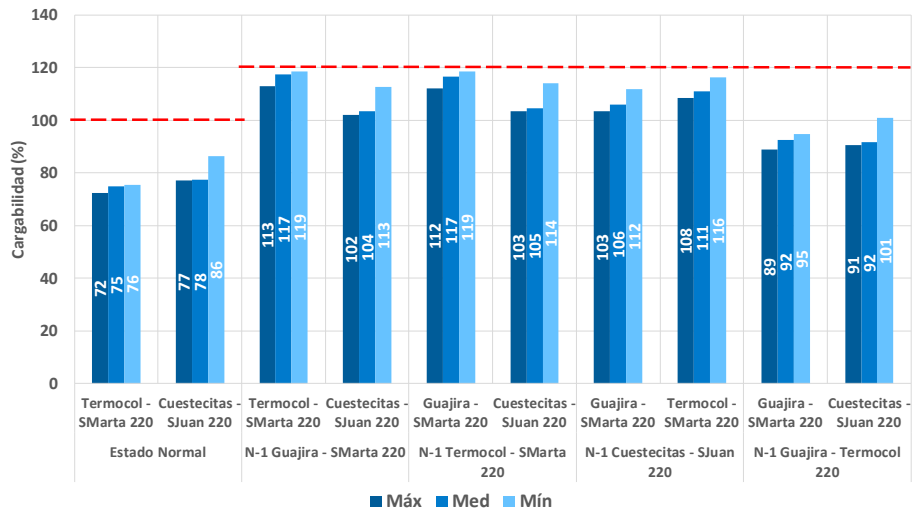


Figura 6. Cargabilidad de elementos principales de GCM con M-SSSC en modo reactancia fija en el 2022

Desde el alcance de los análisis de estado estacionario, se observa cómo podría ser el uso de los M-SSSC en modo reactancia fija y sus beneficios para lograr evacuar toda la generación a conectarse en el escenario año 2022, evitando tener que limitar generación para cubrir la restricción del anillo Guajira – Santa Marta – Termocol (Bonda) 220 kV.

En el escenario 2024 se pueden presentar diferentes topologías teniendo en cuenta que se esperan cuatro (4) importantes proyectos de transmisión, los cuales pueden tener atrasos en la entrada en operación, por lo que se analizan los siguientes casos:

Tabla 2. Topologías analizadas en el escenario 2024

Caso	1 Colectora – Cuestecitas 1 y 2 500 kV	2 Cuestecitas – La Loma 1 y 2 500 kV	3 La Loma – Sogamoso 500 kV	4 Río Córdoba – Bonda 220 kV
A	X			
B	X	X		
C	X	X	X	
D	X	X		X (*)
E	X	X	X	X (*)

(*) Con la entrada de este proyecto, se considera la reubicación de los M-SSSC de Bonda (Termocol) – Santa Marta 220 kV a Guajira – Bonda (Termocol) 220 kV.

Sin considerar la actuación de los M-SSSC, se evidencian las siguientes restricciones detalladas a continuación en la Figura 7.

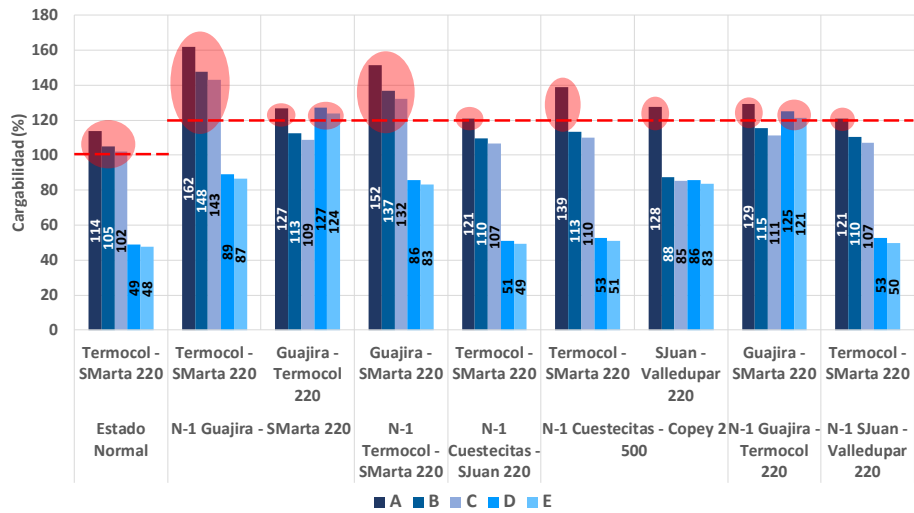


Figura 7. Restricción en el anillo Guajira – Santa Marta – Termocol (Bonda) 220 kV evidenciada en el 2024 sin considerar M-SSSC

Se encuentra la reactancia a inyectar por los M-SSSC para controlar las restricciones evidenciadas en las diferentes topologías, cuyo valor se detalla a continuación

Tabla 3. Reactancia a inyectar por M-SSSC para controlar las restricciones en modo reactancia fija en el 2024

Caso	Línea	Máx. corriente evidenciada (A)	Corriente objetivo (A)	X inicial (Ohms)	X a inyectar (Ohms)	X final (Ohms)
A	Termocol – Santa Marta	1062	<780	5.70	33.92 (*)	39.62
	Guajira – Santa Marta	994		45.16	20.04 (*)	65.2
B	Termocol – Santa Marta	968		5.70	29.05	34.75
	Guajira – Santa Marta	896		45.16	16.83	61.99
C	Termocol – Santa Marta	940		5.70	24.58	30.28
	Guajira – Santa Marta	868		45.16	12.72	57.88
D	Guajira – Termocol (**)	835		40.21	7.55	47.76
	Guajira – Santa Marta	820		45.16	5.78	50.94
E	Guajira – Termocol (**)	811		40.21	4.75	44.96
	Guajira – Santa Marta	796		45.16	3.2	48.36

Máxima capacidad del M-SSSC.

(**) Con la entrada del proyecto Bonda (Termocol) – Río Córdoba 220 kV (Casos D y E), se considera la reubicación de los M-SSSC de Termocol – Santa Marta 220 kV a Guajira – Termocol 220 kV

A continuación se muestran los resultados al considerar los valores de la Tabla 3.

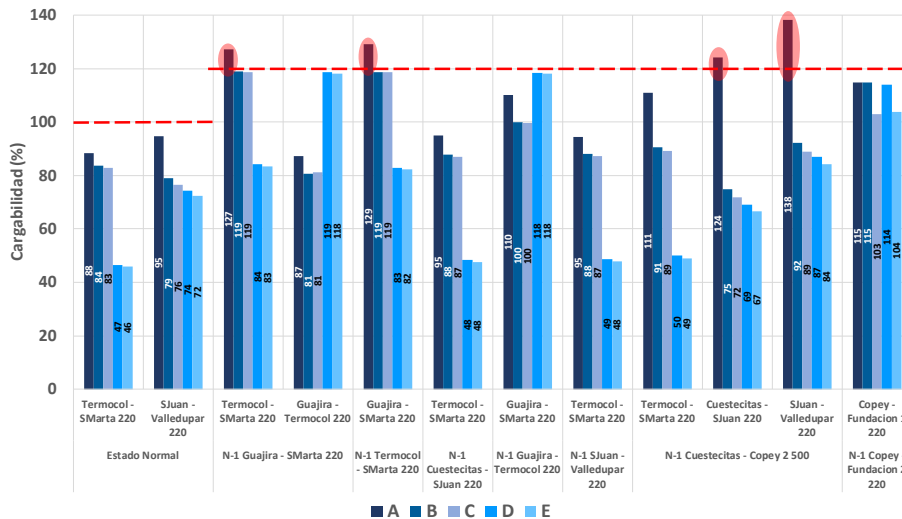


Figura 8. Restricción en el anillo Guajira – Santa Marta – Termocol (Bonda) 220 kV evidenciada en el 2024 considerando M-SSSC

Para la topología del Caso A (entrada del proyecto Colectora – Cuestecitas 1 y 2 500 kV junto con toda la generación eólica a conectarse en Colectora 500 kV), aun considerando la actuación de los M-SSSC no es suficiente para controlar las restricciones, ya que se evidencian los siguientes problemas:

- Sobrecarga en Cuestecitas – San Juan 220 kV en estado normal de operación en demanda máxima y mínima.
- Sobrecarga no admisible de Termocol (Bonda) – Santa Marta 220 kV ante N-1 de Guajira – Santa Marta 220 kV y viceversa, en demanda máxima, media y mínima.
- Sobrecarga no admisible de Cuestecitas – San Juan – Valledupar 220 kV ante N-1 de Cuestecitas – Copey 500 kV, en demanda máxima, media y mínima.

Sin embargo, de los 1792 MW de generación que se conectará en Cuestecitas 500 kV y Colectora 500 kV, los M-SSSC servirían para evacuar alrededor de 1300 MW (cerca del 72% del total de generación a conectarse en Cuestecitas 500 kV y Colectora 500 kV).

7 CONCLUSIONES

El uso de la tecnología M-SSSC permite aliviar las restricciones asociadas al transporte de energía por las líneas de transmisión en el área de influencia de los puntos en donde se conectarán nuevas fuentes de energía renovable no convencional. La flexibilidad ofrecida por la modularidad de los equipos hace que se puedan reubicar en otras subestaciones dependiendo de las necesidades del sistema a medida que cambia su topología y las necesidades de alivio de sobrecargas. Los resultados muestran que el mismo conjunto de equipos puede eliminar la sobrecarga en la mayoría de escenarios analizados, simplemente cambiando la ubicación y el valor de reactancia inyectada.

En el escenario en que las sobrecargas persisten, aún con el uso de la tecnología M-SSSC, se observa que, si bien no se puede integrar el 100% de la generación analizada, si permite la integración de forma segura y confiable de aproximadamente 1300 MW, lo que equivale al 72% de la generación analizada. Lo cual puede ir permitiendo la integración de generación de forma escalonada mientras se definen nuevos corredores de transmisión para evacuar la energía restante.

8 REFERENCES

- [1] “SmartValveTM - Smart Wires Inc.” <https://www.smartwires.com/smartvalve/> (accessed Jan 11, 2021).
- [2] Resolución CREG 025 de 1995. Código de Redes Colombia