



NUEVOS DESAFÍOS,
MÁS OPORTUNIDADES
¡Sé parte de la transición!

EXPERIENCIAS DEL SISTEMA ELÉCTRICO COLOMBIANO EN LA VALIDACIÓN DE MODELOS DE GENERADORES BASADA EN INVERSORES

PROPONENTES:

NOMBRE:	Juan Camilo González Vélez		
EQUIPO:	Controles y modelos – Dirección Planeación de la Operación		
CARGO:	Analista controles		
EMPRESA:	XM		
PAÍS:	Colombia		
CORREO:	jgonzalez@XM.com.co		
	AUTOR:	X	COAUTOR:

NOMBRE:	Neby Jennyfer Castrillón Gutiérrez		
EQUIPO:	Controles y modelos – Dirección Planeación de la Operación		
CARGO:	Especialista controles Senior		
EMPRESA:	XM		
PAÍS:	Colombia		
CORREO:	njcastrillon@xm.com.co		
	AUTOR:		COAUTOR: X

NOMBRE:	Herney Alejandro Tamayo Florez		
EQUIPO:	Controles y modelos – Dirección Planeación de la Operación		
CARGO:	Analista controles		
EMPRESA:	XM		
PAÍS:	Colombia		
CORREO:	htamayo@Xm.com.co		
	AUTOR:		COAUTOR: X

RESUMEN

Ante la integración de fuentes de generación basada en inversores en el sistema eléctrico colombiano se han definido procedimientos para la validación de los modelos asociados con el fin de representar adecuadamente estas fuentes y atendiendo las características particulares de las mismas. Representar adecuadamente estas fuentes se constituye en un desafío y un requerimiento con el fin de poder establecer su impacto y preparar al sistema para que la transición a una operación con este tipo de generación se realice manteniendo las condiciones de confiabilidad en la operación del sistema.

El propósito de este trabajo es presentar el detalle del procedimiento de validación que se aplica para el sistema colombiano y que tiene como ventaja respecto al utilizado en otros sistemas eléctricos de potencia, el evaluar de forma objetiva la calidad de los modelos. Asimismo, se muestran resultados de aplicación de este considerando las fuentes de generación renovables no convencionales que se han integrado al sistema interconectado nacional.

Los resultados muestran como los requerimientos definidos a estos modelos permiten capturar la



NUEVOS DESAFÍOS,
MÁS OPORTUNIDADES
¡Sé parte de la transición!

respuesta de las plantas correspondientes tanto en el dominio estático como dinámico y con ello evaluar su impacto en la tensión, la frecuencia y la estabilidad del sistema. Se demuestra como el modelo es un eslabón determinante en la transición energética porque se constituye en la base para toma de decisiones actuales y una herramienta para evaluar el futuro de la operación y anticiparnos a las ventajas y desafíos asociados a las nuevas tecnologías.

PALABRAS CLAVES

Control de potencia/frecuencia, Control de potencia reactiva/tensión, estabilidad, generación basada en inversores, índice de coherencia, validación de modelos

CATEGORÍA

Crecimiento de los negocios actuales - Energía - Estudios

INTRODUCCIÓN

Entre el 2008 y el 2009, el sistema de potencia colombiano sufrió de Oscilaciones de muy baja frecuencia (0.04 – 0.06 Hz), que en algunos casos pusieron en alto riesgo la seguridad de la operación, provocando en algunos de ellos la pérdida de demanda. Ante este escenario se inició un proceso de búsqueda de las causas y soluciones para estas oscilaciones teniendo en cuenta que no son oscilaciones comunes en los sistemas de potencia. Como producto de este trabajo se implementaron algunas medidas operativas y se evidenció como los controles de los generadores tenían una influencia determinante en la aparición y control de estas oscilaciones; y en general en la estabilidad dinámica del sistema.

Estas señales motivaron que XM y lo agentes generadores, a través del CNO, emprendieran un programa para la obtención de los modelos validados de los controles asociados a las unidades de generación despachadas centralmente en el sistema (Regulador de Velocidad –RV-, Sistema de Excitación y PSS). Este trabajo derivó en el desarrollo, aprobación y aplicación de un Acuerdo CNO, en el que se establecieron los procedimientos y requisitos mínimos para la obtención de

dichos modelos y se definieron criterios de ajuste de RVs para mejorar la estabilidad del sistema. Esta condición se constituyó en el inicio y el impulso para capitalizar la experiencia en el proceso de validación de modelos dinámicos y aplicarla a otras tecnologías. Es así como, para favorecer la transición energética y evaluar el impacto de la integración de generación basada en inversores (GBIs), cuya expectativa para el sistema colombiano a 2032 es del orden de 15.823 MW, se definieron lineamientos de validación para los modelos de las plantas de generación eólicas y solares fotovoltaicas a través de Resoluciones CREG [1] (Comisión de Regulación de Energía y gas) y Acuerdos del CNO [2] (Consejo Nacional de Operación). La definición de los lineamientos se constituyó en un reto dado que, sin bien se cuenta con una experiencia basada en la generación sincrónica, se deben considerar las particularidades de las nuevas tecnologías y mantener criterios objetivos de evaluación de la calidad de los modelos, que son definidos para el caso colombiano para asegurar su robustez y que aún están en proceso de ser desarrollados en otros sistemas eléctricos de potencia.

Este artículo presenta las particularidades de esta validación que tiene dentro de sus

isa

CONEXIONES QUE INSPIRAN



NUEVOS DESAFÍOS,
MÁS OPORTUNIDADES
¡Sé parte de la transición!

objetivos evaluar las necesidades del sistema eléctrico colombiano ante la integración de GBIs, verificar el cumplimiento de requisitos técnicos definidos en la normativa para mantener condiciones de calidad y seguridad en la operación ante el desplazamiento de generación sincrónica y acercar el modelo eléctrico a la realidad del sistema. En la sección 1 se detallan los requerimientos definidos en la regulación. Posteriormente, en la sección 2 se describe el procedimiento de validación. En la Sección 3 se incluyen los resultados de aplicación del procedimiento. Finalmente, en la sección 4 se presentan las conclusiones y trabajos futuros.

1 MARCO REGULATORIO

Teniendo en cuenta la importancia de contar con modelos que reflejen la realidad de las plantas de generación, la CREG, a través de las Resoluciones 060 de 2019, 148 de 2021 y 101 011 de 2022, definió requisitos o consideraciones a tener en cuenta para la validación de los modelos asociados a las plantas eólicas y solares fotovoltaicas. A continuación, la Tabla 1 resume los aspectos más importantes definidos en estas Resoluciones:

Resolución CREG [1]	Alcance	Aspectos más importantes
060 de 2019	Generadores solares fotovoltaicos y eólicos conectados a nivel de STN y STR	Modelo preliminar – 6 meses antes de entrar en operación reportar modelos de simulación RMS que incluyan los requisitos técnicos para: el control de la frecuencia y la potencia activa, control de tensión y potencia reactiva y permitir ajuste de parámetros de estas funcionalidades.
148 de 2021	Generadores solares fotovoltaicos y eólicos conectados a nivel de SDL con capacidad superior a 5 MW	Modelo validado – 30 días hábiles siguientes

		a la entrada en operación comercial se deberán entregar los modelos validados para simulación RMS considerando metodología de validación definida mediante Acuerdo CNO
101 011 de 2022	Generadores solares fotovoltaicos y eólicos conectados a nivel de SDL con capacidad entre 1 y 5 MW	El CND deberá publicar en su página web una guía para la construcción y presentación de los modelos de planta teniendo en cuenta los requisitos establecidos en este capítulo. La guía deberá incluir algún procedimiento de validación y ajuste del modelo luego de la entrada en operación del generador, y debe ser aprobada mediante Acuerdo C.N.O. La guía está definida mediante Acuerdo CNO e incluye requerimientos de modelos preliminares y modelos validados.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 1. Resumen marco normativo

Tal como se evidencia en la Tabla 1, la experiencia adquirida a través de la validación a modelos asociados a la generación sincrónica evidenció la necesidad de incorporar requerimientos de calidad de modelos para todas las plantas de generación eólica o solar fotovoltaica conectadas a nivel de STN o STR o para las plantas mayores a 1 MW conectadas a nivel de SDL. También se observa que con respecto a los modelos se encuentran dos etapas, la etapa de modelos preliminares en la cual los requerimientos se definen a través de guías publicadas por el CND. En este caso los requerimientos más importantes que aplican son:

isa

CONEXIONES QUE INSPIRAN



NUEVOS DESAFÍOS,
MÁS OPORTUNIDADES
¡Sé parte de la transición!

- Representación de mínima información (transformador en punto de conexión (si existe), sistemas auxiliares, transformador equivalente MT/BT (si existe), impedancia equivalente entre el lado de media tensión del transformador de generación y el lado de media tensión del transformador de conexión, transformador zigzag de conexión a tierra, según su ubicación, impedancia equivalente entre el punto de conexión y el punto de acople al modelo de red del SDL entregado al CND.
- Cálculo de unidades equivalentes para representar de forma agregada la planta.
- Diagramas de bloques en dominio de Laplace del controlador de planta, controles eléctricos donde se identifique claramente las siguientes funciones: control de tensión, VRT (soportabilidad ante eventos de sub o sobre tensión, control de frecuencia, velocidad de toma de carga y velocidad de descarga, soportabilidad ante eventos de sobre o subfrecuencia, rampas operativas para arranque y parada, etc.

Los requerimientos asociados a la etapa de validación de modelos para generadores eólicos y solares fotovoltaicos se encuentran definidos en los Acuerdos CNO indicados en la Tabla 2

Número Acuerdo CNO [2]	Alcance	Aspectos más importantes
1359	Plantas conectadas al STN y STR	• Incluye requerimientos de validación y seguimiento a calidad de modelos. • El agente generador valida los modelos y los envía al CND para revisión.
1529	Plantas con capacidad	• Incluye requerimientos de validación y seguimiento a calidad de

	mayor a 5 MW conectadas al SDL	• modelos. • El agente generador valida los modelos y los envía al CND para revisión.
1606	Plantas con capacidad entre 1 y 5 MW conectadas al SDL	• Incluye tanto lineamientos para modelos preliminares como para validación de modelos • El agente generador valida modelos y se los envía al OR quien revisa informes y cumplimiento de calidad de modelos y los envía al CND. • Aplicación a plantas no despachadas centralmente. • Incluye lista de chequeo preparada por el OR para enviar al CND en la que se certifique que se cumple con información requerida en informes de validación de modelos e índices de calidad, así como criterios de calidad del modelo implementado en la herramienta de simulación utilizada por el CND.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2. Acuerdos aplicables a modelos de GBIs

En todos los Acuerdos citados en la Tabla 2 se definen los aspectos que se listan a continuación, que deben ser considerados por los agentes generadores en procura de garantizar que los modelos representen las plantas, se cumplan con los criterios definidos en la regulación vigente y se mantenga la información en el tiempo.

- Plazos y condiciones para el reporte inicial o actualización de los modelos ante modernizaciones, cambios de parámetros o fallas de desempeño de modelos.
- Definición de índices de calidad con los

isa

CONEXIONES QUE INSPIRAN



NUEVOS DESAFÍOS,
MÁS OPORTUNIDADES
¡Sé parte de la transición!

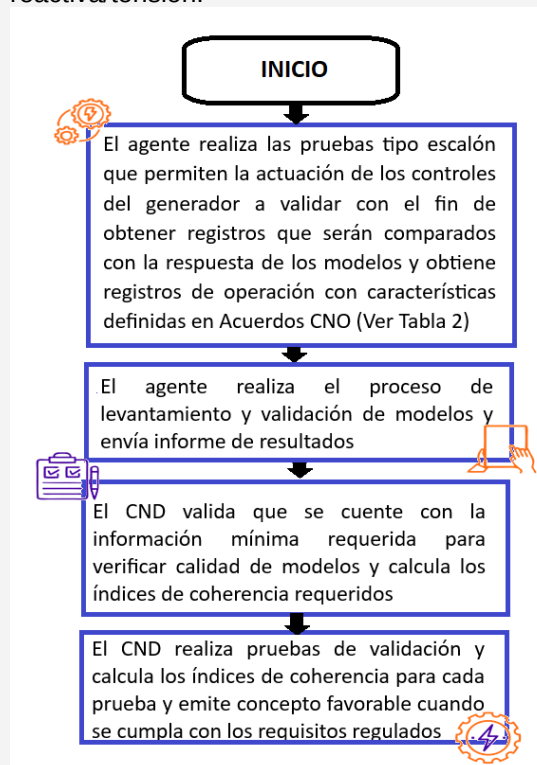
umbrales respectivos, los cuales deben ser cumplidos al comparar los registros de campo con los resultados de las simulaciones en algunas variables especificadas tanto para el control potencia/frecuencia como para el control potencia reactiva/tensión.

- Variables sobre las cuales se verifica la coherencia de curvas.
- Plazos de revisión de informes por parte del CND y operador de red (Acuerdo CNO 1606) y para respuesta a comentarios por parte del agente.
- Guía de pruebas mínimas para realizar la validación de modelos.
- Detalle de las características de los informes a entregar de tal manera que documenten las características de la planta, las funciones de control disponibles, el cálculo de las unidades equivalentes, diagramas de bloques de los elementos dinámicos, detalle de las pruebas realizadas y se anexen los modelos validados en la herramienta de simulación utilizada por el CND incluyendo la verificación de coherencia entre los registros y las simulaciones.
- Formatos en Excel que se deben diligenciar con el detalle de las pruebas realizadas.

2 PROCEDIMIENTO DE VALIDACIÓN DE MODELOS DE GBIS

La Gráfica 1 ilustra el procedimiento de validación de modelos realizado por el CND. Es importante indicar que el proceso representado en la Gráfica 1 se realiza ante modernizaciones, cambios de parámetros, integración de nuevas plantas, inadecuado desempeño del modelo o imposibilidad de realizar seguimiento. Los controles que se validan corresponden a control de potencia

activa/frecuencia y control de potencia reactiva/tensión.



Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 1. Proceso de validación de modelos

Como se observa en la Gráfica 1, el proceso se inicia con el desarrollo de las pruebas en campo realizadas a las plantas de generación con el fin de llevar a cabo el levantamiento de los modelos, y finaliza si se cumple con los requerimientos de calidad definidos en los Acuerdos CNO reportados en la Tabla 2. Luego de que se cuenta con el concepto favorable del CND, el agente gestiona el cambio de parámetro correspondiente que se oficializa con la emisión de un Acuerdo CNO. Finalmente se realiza la actualización del modelo validado en la Base de datos que



NUEVOS DESAFÍOS,
MÁS OPORTUNIDADES
¡Sé parte de la transición!

contiene el modelo eléctrico del sistema de potencia colombiano.

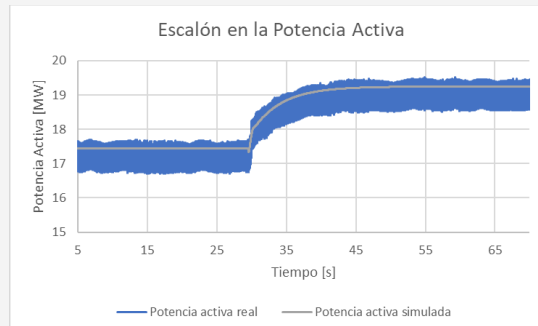
Como se observa en la Gráfica 1, el proceso de validación de modelos incluye el cálculo de índices de coherencia que evalúan cuantitativamente la diferencia de magnitud y forma entre las señales reales y simuladas asociadas a los controles indicados, considerando umbrales de referencia. Esta evaluación permite un análisis objetivo de la calidad de los modelos y garantiza el cumplimiento de criterios de calidad de estos.

En el proceso de validación también se verifica la estabilidad de los controles y se solicita ajustes a estos en caso de ser necesario.

2. RESULTADOS DE APLICACIÓN DE PROCEDIMIENTO DE CALIDAD DE MODELOS

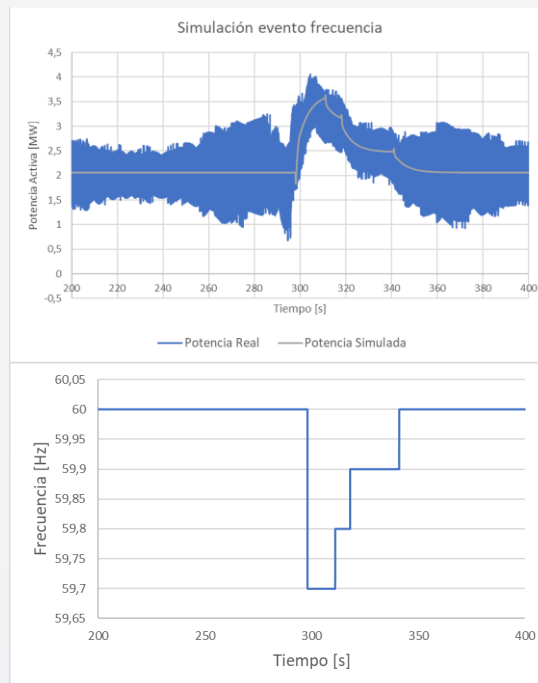
A continuación, se presentan los resultados de aplicación de validación de calidad de modelos de controles para una planta solar fotovoltaica conectada al Sistema de Transmisión Regional colombiano. Los resultados están asociados a:

- Validación del control de potencia activa/frecuencia: Estas pruebas incluyen escalones a varios niveles de carga, con y sin límite de velocidad e inyección de eventos de frecuencia para evaluar la respuesta ante perturbaciones. En la Gráfica 2 y la Gráfica 3 se muestran dos de estas pruebas, la primera asociada a un escalón en la potencia activa en carga alta y la segunda a un evento de frecuencia.



Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 2. Prueba escalón, control de potencia activa/frecuencia, carga alta



Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 3. Validación ante evento de frecuencia

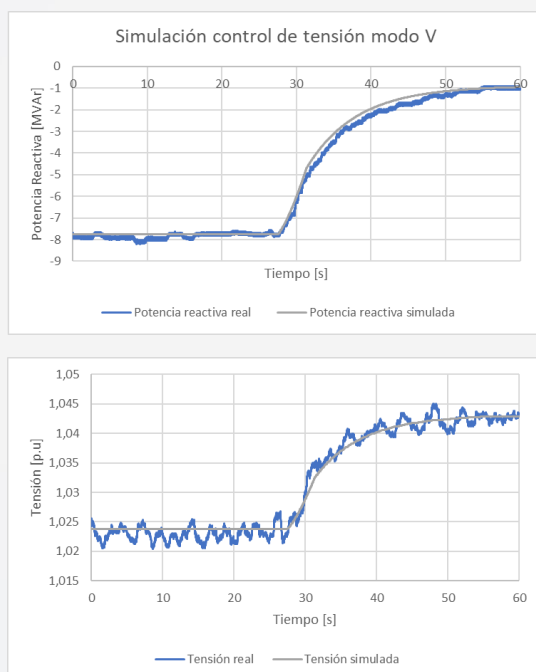
Las Gráficas 2 y 3 muestran una alta correlación entre las señales reales y



NUEVOS DESAFÍOS, MÁS OPORTUNIDADES ¡Sé parte de la transición!

simuladas. Esta verificación se realiza para varias condiciones y pruebas con el fin de tener una muestra estadística significativa que permita garantizar la calidad del modelo ante diversos escenarios operativos.

- Validación del control de potencia reactiva/tensión: Estas pruebas incluyen escalones a varios niveles de carga en los tres modos de control definidos por la reglamentación vigente: tensión, potencia reactiva y factor de potencia. La Gráfica 4 muestra el resultado de esta verificación para el modo de control de tensión (V).



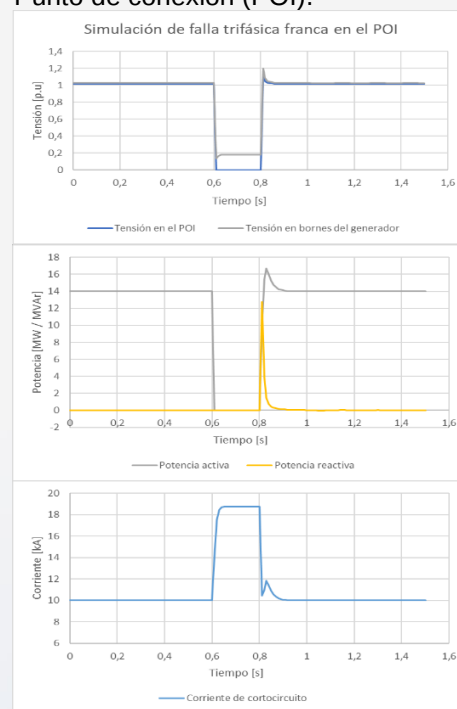
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 4. Prueba escalón, control de potencia reactiva/tensión, carga alta

En este caso también se tiene una

correlación alta entre la señal simulada y real.

- Validación de otros lazos de control: Adicional a las pruebas indicadas anteriormente, las cuales pueden ser corroboradas a través de registros en campo, se realizan unas pruebas adicionales a través de simulaciones dinámicas a los lazos de control de inyección rápida de reactivos y a la curva de carga, las cuales no es posible verificar en campo. La Gráfica 5 presenta la verificación realizada a la función de inyección rápida de reactivos ante una falla trifásica en el Punto de conexión (POI).



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 5. Prueba del lazo de inyección rápida de reactivos



NUEVOS DESAFÍOS, MÁS OPORTUNIDADES ¡Sé parte de la transición!

Los resultados de la Gráfica 5 permiten verificar la actuación correcta de este lazo de control, ya que se evidencia la priorización de inyección de corriente reactiva ante una falla franca en el punto de conexión, con la respectiva disminución de la potencia activa.

En la Tabla 3 se presentan los resultados de algunos de los índices de coherencia calculados para las pruebas presentadas de la Gráfica 2 a la Gráfica 4.

Prueba	EC [%]	EVF [%]	ESI [%]
Potencia activa/frecuencia	12.67	1.34	0
Potencia reactiva/ tensión	17.93	2.68	0
Evento de frecuencia	26.81	NA	NA

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. Resultados de índices de coherencia de curvas

Donde:

EC es el índice de error combinado. Debe ser $\leq 30\%$.

EVF es el índice de error de valor final. Debe ser $\leq 5\%$ para la variable tensión y $\leq 10\%$ para la potencia activa y reactiva.

ESI es el error de sobre-impulso. Debe ser $\leq 10\%$ para la variable tensión y $\leq 15\%$ para la potencia activa y reactiva.

Tal como se observa en la Tabla 3, los resultados confirman la calidad de los modelos y su correcta implementación para su uso en los estudios de planeamiento eléctrico.

3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados muestran una gran coherencia entre las señales obtenidas con los modelos comparadas con las asociadas a los registros,

lo cual se ratifica con los índices de coherencia definidos. Es importante destacar que los índices definidos para evaluar la calidad de los modelos de las GBIs son una aplicación que no se encuentra en otros sistemas de potencia, constituyéndose en un hito significativo para acercar el modelo a la realidad de la operación del sistema eléctrico colombiano. Cada modelo validado que se integra en la Base de datos del sistema eléctrico colombiano cumpliendo con los criterios de calidad requeridos aporta a la mejora en la información utilizada para la planeación de la operación del sistema favoreciendo su crecimiento y transición energética al permitir evaluar, preparar y definir las acciones requeridas en el sistema ante la integración de nuevas tecnologías y condiciones operativas.

Se recomienda aplicar los criterios cuantitativos para evaluar la calidad de los modelos a todas las tecnologías futuras de tal manera que el modelo eléctrico refleje la realidad del sistema eléctrico colombiano.

4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) [online]. <http://www.creg.gov.co>
- [2] Consejo Nacional de Operación (CNO). [online]. <http://www.cno.org.co>

HOJA DE VIDA DE LOS AUTORES

Neby Castrillón. Doctora en ingeniería Eléctrica – UNAL San Juan, Argentina (2010).

Juan González Magister en Ingeniería Eléctrica, UNAL - Sede Medellín (2019).

Alejandro Tamayo – Especialista Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica – UPB (2022).