

Anexos 1 a 4 Por el cual se establecen los requerimientos para la obtención y validación de los parámetros de las unidades y plantas de generación y los modelos del sistema de control asociados a las unidades y plantas de generación eólicas y solares fotovoltaicas conectadas al SDL con capacidad efectiva neta o potencia máxima declarada igual o mayor a 5 MW y se definen las pautas para las pruebas y reajustes de los controles asociados

Subcomité de Controles



Revisión	Fecha	Descripción
0	2022-01-03	Presentación Primer borrador
1	2022-01-20	Publicación Primer borrador
2	2022-02-14	Recomendación del acuerdo

ANEXO 1

Criterios de agrupación para el cálculo de unidades equivalente aplicables a plantas de generación eólicas y solares fotovoltaicas conectadas al SDL con capacidad Efectiva Neta o Potencia Máxima Declarada igual o mayor a 5 MW

OBJETIVO

Este anexo presenta los criterios de agrupación que deben ser considerados al definir las unidades equivalentes de las plantas de generación eólicas y solares fotovoltaicas objeto de la resolución CREG 148 de 2021.

Se entiende como Unidad Equivalente a la agregación de unidades de generación (UG) tales como inversores o aerogeneradores que comparten las características comunes presentadas a continuación.

Los modelos de simulación de las plantas eólicas y solares a ser entregados al CND y los Operadores Regionales – OR estarán compuestos de una o varias unidades equivalentes dependiendo del cumplimiento de los criterios presentados a continuación.

METODOLOGÍAS DE AGRUPACIÓN

Los criterios a tener en cuenta al momento de formular la unidad equivalente de plantas de generación eólicas y solares fotovoltaicas son:

Unidades Eólicas: Una unidad equivalente eólica está compuesta por aerogeneradores que comparten todas las características indicadas a continuación:

- Tipo de inversor utilizado por los aerogeneradores (fabricante, modelo, capacidad) (si aplica).
- Configuraciones de los relés de protección de los aerogeneradores.
- Configuración de controladores y de valores de referencia de control: Hace referencia a los mismos ajustes de los parámetros de los controladores a nivel de inversor/conversor/ unidad generadora.
- Mismo control de planta.
- Mismo tipo de aerogenerador (Tipo I, II, III, IV¹ o el que corresponda).

Unidades Solares: Una unidad equivalente solar está compuesta por inversores que comparten todas las características indicadas a continuación:

- Tipo de inversor (fabricante, modelo, capacidad).
- Configuraciones de los relés de protección.
- Configuración de controladores y de valores de referencia de control: Hace referencia a los mismos ajustes de los parámetros de los controladores a nivel de inversor/conversor.
- Mismo control de planta.

¹ Los tipos de aerogenerador se refieren a la tecnología utilizada para la conversión de la energía. Tipo I corresponde a máquinas de inducción con velocidad fija, Tipo II corresponde a máquinas de inducción con deslizamiento variable, Tipo III corresponde a máquinas asíncronas doblemente alimentadas (DFIG) y Tipo IV corresponde a tecnología de conversión tipo full converter.

- Mismo tipo de panel (móvil o fijo) en el lado DC. Si es móvil, se deben agrupar según algoritmo de seguimiento.

ANEXO 2

Formato para el reporte de los modelos validados y controles asociados de las plantas de generación eólicas y solares fotovoltaicos conectadas al SDL con capacidad Efectiva Neta o Potencia Máxima Declarada igual o mayor a 5 MW

OBJETIVO

Este anexo define los lineamientos para el reporte de los modelos validados de la planta de generación y de sus controles asociados.

INFORME DE MODELOS VALIDADOS

1. INFORMACIÓN REQUERIDA

Los informes de modelos validados deberán presentarse a través de los medios establecidos por el CND en formato Adobe Portable Document Format (PDF). Cada informe debe incluir:

- Tabla de contenido
- Generalidades de las pruebas
- Descripción de la planta de generación y sus componentes principales asociados.
- Descripción de los sistemas de control de la planta: control de frecuencia/potencia activa, control de potencia reactiva/tensión (por cada unidad equivalente y a nivel de planta) y cualquier otro sistema de control asociado a los sistemas auxiliares de la planta (compensación, baterías).
- Descripción de la metodología de agregación utilizada, de acuerdo con los criterios establecidos en el Anexo 1.
- Descripción de los detalles de las pruebas de validación realizadas
- Diagramas de bloques en dominio de Laplace del controlador de planta, controles eléctricos donde se identifique claramente las siguientes funciones y el valor de los parámetros correspondientes.
 1. Control de tensión (respuesta rápida de corriente reactiva, curva de carga, modos de control: factor de potencia, potencia reactiva, tensión con estatismo, incluyendo estatismo y banda muerta parametrizados). En caso de que se requiera una compensación adicional para cumplir con la curva de carga en el punto de conexión, se debe reportar el modelo del elemento correspondiente, así como también los filtros de armónicos que se incorporen en la planta.
 2. Voltage Ride Through: Soportabilidad para eventos de tensión.
 3. Control de frecuencia el cual debe incluir los parámetros que definen el tiempo de respuesta, estatismo y banda muerta.
 4. Velocidad de toma de carga y velocidad de descarga.
 5. Frequency Ride Through: Soportabilidad para eventos de frecuencia.
 6. Rampa de entrada y salida.
 7. Cambio de prioridad de P y Q.
 8. Modo de control ante fallas simétricas y asimétricas (Corriente balanceada, P constante, Q constante).

9. Valores de corto circuito para los inversores: parámetros subtransitorio pico, subtransitorio para fallas trifásicas, subtransitorio para fallas bifásicas, subtransitorio para fallas monofásicas, en estado estable, de secuencia negativa.
 10. Si el proyecto incluye sistemas de baterías, se debe incluir el modelo de las mismas en el cual se representen las características de estas tales como: capacidad nominal, tiempos de carga y descarga, controles disponibles con su respectivas constantes de tiempo y sistemas de protección asociados.
- Curvas comparativas del sistema real vs las obtenidas a través de simulación de los modelos validados.
 - Validación de funciones de control (VRT, FRT, Inyección rápida de corriente reactiva) a través de simulación.
 - Anexos que contengan los modelos validados implementados en la herramienta de simulación utilizada por el CND y que permitan simular todas las condiciones definidas en el Acuerdo.
 - Anexos con archivo de datos que contenga los resultados de las pruebas de validación para todos los sistemas de control (datos de prueba y de simulación) en formato de texto (.txt), con encabezados que identifiquen el nombre de la variable y las unidades de medición correspondientes, de acuerdo con el formato establecido en el Anexo 5.
 - Archivo en formato .xlsx debidamente diligenciado con el resumen de las pruebas ejecutadas (Anexo 5)

Mas detalles sobre los requerimientos listados arriba se presentan en las siguientes secciones de este Anexo.

2. GENERALIDADES

En este numeral informe se deben incluir los siguientes detalles:

- Nombre de la planta de generación bajo pruebas de validación
- Agente representante
- Ubicación geográfica de la planta de generación (Departamento, municipio, etc)
- Nombre de la persona responsable de las pruebas de validación
- Fecha y hora de realización de las pruebas

3. DESCRIPCION PLANTA DE GENERACIÓN Y SUS COMPONENTES

En este campo del informe se debe incluir la información relacionada a los elementos que constituyen la planta de generación. Se debe incluir como mínimo (siempre y cuando aplique):

- Tipo de generación (eólica, fotovoltaica)
- Ubicación geográfica de la planta (Departamento, municipio, etc)
- Número de turbinas (plantas eólicas), número de paneles (plantas solares fotovoltaicas).

- Unifilar con las características de conexión de la planta.
- Transformador de conexión: Incluir toda la información de la placa de características. Indicar si cuenta con un control automático de tensión y cómo es su principio de funcionamiento.
- Longitud de los circuitos de conexión.
- Compensación adicional que se vaya a incluir para cumplir con los requisitos de curva de carga en el punto de conexión. Se debe describir el tipo de compensación (capacitiva, inductiva, fija, SVC, STATCOM) y la capacidad nominal.
- Representación del consumo de servicios auxiliares con el tipo de carga que se considere la representa. Indicar el porcentaje de cada tipo de carga que define el consumo (motores, aire acondicionado, iluminación, etc).
- Número de inversores, modelo y fabricante.
- Descripción de las unidades equivalentes consideradas, indicando claramente el procedimiento para definir las y el número de elementos asociados (inversores, transformadores, etc).
- Si el proyecto incluye sistemas de almacenamiento de energía eléctrica con baterías (SAEB), se debe incluir el modelo correspondiente y las características de estos: capacidad nominal, tiempos de carga y descarga, funciones de control disponibles, etc.
- Para cada unidad generadora se debe especificar los valores nominales: (Potencia aparente nominal S (MVA), Voltaje en terminales (kV), Factor de potencia nominal $\cos \phi$, Corriente nominal del inversor In (A) (si aplica)).
- Potencia nominal de la planta de generación P (MW), voltaje nominal en punto de conexión Vpoc (kV).
- Descripción de la configuración de los sistemas de control de planta (Power plant controller, PPC) de la planta de generación. En este punto se debe especificar la estructura general de control de la planta, especificando si existen diferentes configuraciones en los controladores de los inversores que constituyen la planta.
- Velocidad de toma de carga: Este parámetro puede ser un único valor en MW/minuto para el rango entre 0 y la potencia nominal de la planta, o estar definida para máximo 5 intervalos de potencia de la planta desde 0 MW hasta la potencia nominal. El reporte se realizará mediante la herramienta que el CND disponga y deberá considerar los valores definidos en la Tabla A2.1:

Límite Inferior [MW]	Limites Superior [MW]	Velocidad de toma de carga [MW/Minuto]
-------------------------	--------------------------	---

Tabla A2.1. Formato de reporte de información de las velocidades de toma de carga

- Velocidad de descarga: Este parámetro ser un único valor en MW/minuto o estar definida para máximo 5 intervalos de potencia de la planta desde la potencia nominal hasta 0 MW. El reporte se realizará mediante la herramienta que el CND disponga y deberá considerar los valores definidos en la Tabla A2.2:

Límite Inferior [MW]	Limites Superior [MW]	Velocidad de descarga [MW/Minuto]
-------------------------	--------------------------	--------------------------------------

Tabla A2.2. Formato de reporte de información de las velocidades de descarga

4. DESCRIPCION GENERAL PRUEBAS DE VALIDACION

Se debe realizar una descripción de las pruebas, definiendo:

- Fecha y hora de las pruebas.
- Tipo de prueba: por unidad equivalente o a nivel de planta.
- Datos de la perturbación: tipo (escalón, inyección de registro), magnitud, punto de inyección, tiempo en el cual se realiza la perturbación.
- Condiciones iniciales de la prueba según el tipo de prueba:
- Prueba a nivel de planta: voltaje en punto de conexión (V_{poc}), potencia activa en el punto de conexión (P_{poc}), potencia reactiva en el punto de conexión (Q_{poc}), voltaje en terminales de las unidades equivalentes en servicio (V_t), potencia activa de las unidades equivalentes en servicio (P), potencia reactiva de las unidades equivalentes en servicio (Q), número de unidades generadoras en paralelo en las unidades equivalentes en servicio e impedancia equivalente de la red.
- Prueba a nivel de unidad equivalente: voltaje en terminales de la unidad equivalente (V_t), potencia activa de la unidad equivalente (P) potencia reactiva de la unidad equivalente (Q), número de unidades generadoras en paralelo en la unidad equivalente e impedancia equivalente de la red.
- Bases utilizadas en los modelos para llevar las variables a p.u.

En las secciones 7 y 8 de este Anexo se presentan detalles adicionales sobre las pruebas específicas para las funciones de control de potencia activa y reactiva

5. VERIFICACIÓN AGREGACION DE LAS UNIDADES EQUIVALENTES DE LA PLANTA

En esta parte del informe debe describirse la metodología de agrupación utilizada (Anexo 1) para determinar las unidades equivalentes de la planta, sea que se modele la planta como una sola unidad equivalente o como varias.

6. REPORTE PARÁMETROS DE LA PLANTA DE GENERACIÓN

En esta parte del informe se deben reportar al menos los parámetros de la planta de generación definidos en el Artículo Siete del presente Acuerdo, resaltando cuáles parámetros difieren de lo inicialmente reportado.

En los anexos se debe incluir los datos utilizados para construir las curvas reales y las simuladas asociadas a las pruebas realizadas en campo, y especificadas en el presente Acuerdo, utilizadas para obtener los parámetros de la planta de generación. Los datos asociados deben enviarse en formato de texto (.txt) , considerando la misma estampa de tiempo para ambas curvas y utilizando el formato definido en el Anexo 5 del presente Acuerdo.

7. LINEAMIENTOS INFORMACION REQUERIDA EN EL INFORME CON RESPECTO AL CONTROL DE POTENCIA REACTIVA/TENSIÓN Y SUS PRUEBAS CORRESPONDIENTES

El informe debe incluir la siguiente información con respecto al control de potencia reactiva /tensión de la planta y las pruebas de validación asociadas

Descripción del controlador

En este campo se debe incluir:

- Fabricante.
- Modelo del equipo.
- Modos de operación disponibles (control de potencia reactiva, factor de potencia, Tensión, Prioridad potencia activa/reactiva, Otro: especificar cuando se cuenten con modos que dadas las condiciones del sistema se puedan activar).
- Modo de operación normal (por defecto es control de voltaje con estatismo).
- Arquitectura del control de potencia reactiva/tensión de la planta
- Control automático de taps bajo carga (si aplica)

Pruebas de validación

Se debe realizar una descripción de las pruebas que permitan reproducirlas, definiendo:

- Fecha y hora de las pruebas.
- Tipo de prueba: con unidad sincronizada a la red o en vacío (si aplica)
- Configuración de los controles (Modo de control del PPC Q/V/fp/off).
- Datos de la perturbación: tipo (escalón, inyección de registros), magnitud, punto de inyección, tiempo en el que se realiza la perturbación.
- Condiciones iniciales de la prueba según el tipo:
- A nivel de planta: voltaje en punto de conexión (V_{poc}), potencia activa en el punto de conexión (P_{poc}), potencia reactiva en el punto de conexión (Q_{poc}), voltaje en terminales de las unidades equivalentes en servicio (V_t), potencia activa de las unidades equivalentes en servicio (P), potencia reactiva de las unidades equivalentes en servicio (Q), número de unidades generadoras en paralelo en las unidades equivalentes en servicio e impedancia equivalente de la red.
- A nivel de unidad equivalente (si aplica): voltaje en terminales de la unidad equivalente (V_t), potencia activa de la unidad equivalente (P) potencia reactiva de la unidad equivalente (Q), número de unidades generadoras en paralelo en la unidad equivalente e impedancia equivalente de la red.
- Reporte de cualquier modificación sobre los parámetros del control que haya sido necesaria para la realización de cada prueba.
- Bases utilizadas en los modelos para llevar las variables a p.u.

Verificación de la validez del modelo del control de potencia reactiva/tensión

- Se deben presentar la comparación de las curvas reales y simuladas que demuestren la validez del modelo del control de potencia reactiva/tensión. Las

curvas deben contener las variables especificadas en el Anexo 5 del presente Acuerdo.

- Asimismo, en caso de ser posible, se deben presentar las señales asociadas a la salida del control de planta (señales de corriente activa y corriente reactiva) y a la señal de conmutación de modo de prioridad potencia activa/reactiva.

Todas las curvas incluidas deben tener las siguientes características:

- Etiquetas para los ejes y las correspondientes unidades de medida.
- Títulos para cada gráfica indicando la prueba que fue desarrollada.
- Escala para ambos ejes definida de tal forma que permita visualizar la dinámica de las señales.

En los anexos se debe incluir los datos utilizados para construir las curvas reales y las simuladas en formato de texto (.txt) considerando la misma estampa de tiempo y resolución para ambas curvas y reportando el nombre de la variable y las unidades correspondientes, utilizando el formato definido en el Anexo 5 del presente Acuerdo

En caso de identificarse un comportamiento inestable en este control cuando la unidad está interconectada en las pruebas realizadas, se debe proponer un reajuste para el control correspondiente, mostrando a través de simulación y ante perturbaciones tipo escalón el impacto de este reajuste para los 3 modos de control.

Diagrama de bloques

- Se debe incluir el diagrama de bloques en el dominio de Laplace (s) del control de potencia reactiva/tensión incluyendo el control eléctrico de los modelos de las unidades equivalentes, el control eléctrico a nivel de planta, limitadores (si aplican), la representación de la curva de carga correspondiente, lazo de inyección rápida de reactivos, *Voltage Ride Through* y selector de prioridad de potencia activa/reactiva.
- Asimismo, se debe adjuntar dicho modelo en formato digital de manera que pueda simularse su comportamiento y obtener a partir de esta simulación los resultados que se reportan en el informe. El modelo correspondiente debe ser implementado en la herramienta utilizada por el CND y debe estar definido con base en la capacidad declarada de la planta de generación y de sus unidades equivalentes.

Parámetros

- Se debe reportar una tabla con los parámetros validados incluidos en el diagrama de bloques y las bases usadas para la obtención de los mismos en p.u.

Verificación de inyección rápida de corriente reactiva y *Voltage Ride Through*

Las pruebas descritas a continuación son realizadas para verificar los modelos asociados al lazo de inyección rápida de corriente reactiva y a la función de *Voltage Ride Through*. Para esto, se debe presentar el detalle y los resultados de las simulaciones realizadas para verificar el comportamiento ante fallas en el punto de conexión de la planta de generación considerando los parámetros de operación sincronizada. **Esta validación se basa en simulaciones y no incluye pruebas en campo.** En este caso se debe incluir como mínimo la siguiente información:

- Descripción de las condiciones iniciales de la planta de generación: voltaje en punto de conexión (V_{poc}), potencia activa en el punto de conexión (P_{poc}), potencia reactiva en el punto de conexión (Q_{poc}), voltaje en terminales de las unidades equivalentes en servicio (V_t), potencia activa de las unidades equivalentes en servicio (P), potencia reactiva de las unidades equivalentes en servicio (Q), número de unidades generadoras en paralelo en las unidades equivalentes en servicio e impedancia equivalente de la red.
- Curva de carga obtenida durante las pruebas correspondientes a este parámetro: Se debe parametrizar cada unidad equivalente cuidando que la característica de curva de carga en el punto de conexión sea igual a la que se encuentre reportada ante el CND.
- Para la simulación del desempeño de la función de *Voltage Ride Through*, se deben simular dos cortocircuitos trifásicos con impedancia cero en el punto de conexión: uno de 100 ms de duración y otro de 200 ms de duración. Éstos se deben realizar en los 3 modos de control posibles del PPC. Para cada falla, se debe reportar una gráfica por cada una de las siguientes variables: Tensión en el punto de conexión con la característica de VRT superpuesta, potencia activa en el punto de conexión y potencia reactiva en el punto de conexión.
- Adicionalmente, el modelo de la función *Voltage Ride Through* debe incluir el aporte de las componentes de secuencia positiva y negativa durante huecos de tensión simétricos y asimétricos. Para verificar que cuenta con este aporte, se deben simular dos fallas: una monofásica y otra bifásica a tierra con impedancia cero en el punto de conexión y de 100 ms de duración. Para cada falla, se debe reportar una gráfica por cada una de las siguientes variables medidas en el punto de conexión: Voltaje de secuencia positiva con corriente de secuencia positiva superpuestos con la potencia reactiva y voltaje de secuencia negativa con la corriente de secuencia negativa superpuestos con la potencia reactiva. En estas pruebas se verificará que la corriente reactiva adicional de secuencia positiva sea proporcional al cambio del voltaje de secuencia positiva. Estos valores deberán ser tabulados utilizando los formatos establecidos en el Anexo 5 y evaluados en dos puntos: entre 2-3 ciclos y entre 5-6 ciclos de iniciada la falla o hueco de tensión.
- Para la simulación del desempeño de la función de inyección rápida de reactivos, se debe simular también un escalón de tensión de 0.15 p.u. ascendente y descendente con 1 s de duración. Ésta se debe realizar en los 3 modos de control posibles del PPC. Para cada escalón, se debe reportar una gráfica por cada una de las siguientes variables: Tensión en el punto de conexión, potencia activa en el punto de conexión y potencia reactiva en el punto de conexión.

8. LINEAMIENTOS INFORMACION REQUERIDA EN EL INFORME CON RESPECTO CONTROL DE POTENCIA ACTIVA/FRECUENCIA Y LAS PRUEBAS CORRESPONDIENTES

El informe debe incluir la siguiente información con respecto al control de potencia activa de la planta y las pruebas de validación asociadas

Descripción del controlador

En este campo se debe incluir:

- Fabricante del equipo.
- Modelo del equipo.
- Fecha de la(s) prueba(s).
- Modos de operación disponibles (control de potencia activa, regulación de frecuencia, respuesta rápida en frecuencia, Otro: especificar cuando se cuenten con modos que dadas las condiciones del sistema se puedan activar).
- Arquitectura del control de potencia activa/frecuencia de la planta

Pruebas de validación

Se debe realizar una descripción de las pruebas que permitan reproducirlas, definiendo:

- Fecha de las pruebas
- Tipo de prueba: con unidad sincronizada a la red o en vacío, si aplica.
- Datos de la perturbación: tipo (escalón, registro de frecuencia , etc), magnitud, punto de inyección, tiempo en el que se realiza la perturbación.
- Condiciones iniciales de la prueba según el tipo:
- Prueba a nivel de planta: voltaje en punto de conexión (V_{poc}), potencia activa en el punto de conexión (P_{poc}), potencia reactiva en el punto de conexión (Q_{poc}), voltaje en terminales de las unidades equivalentes en servicio (V_t), potencia activa de las unidades equivalentes en servicio (P), potencia reactiva de las unidades equivalentes en servicio (Q), número de unidades generadoras en paralelo en las unidades equivalentes en servicio e impedancia equivalente de la red.
- Prueba a nivel de unidad equivalente: voltaje en terminales de la unidad equivalente (V_t), potencia activa de la unidad equivalente (P) potencia reactiva de la unidad equivalente (Q), número de unidades generadoras en paralelo en la unidad equivalente e impedancia equivalente de la red.
- Modo de operación del control (Potencia, Frecuencia)
- Reporte de cualquier modificación sobre los parámetros del control que hayan sido necesarios para la realización de cada prueba.
- Bases utilizadas en los modelos para llevar las variables a p.u..

Verificación de la validez del modelo del control de potencia activa/frecuencia

Se deben presentar la comparación de las curvas reales y simuladas que demuestren la validez del modelo del control de potencia activa/frecuencia. Las curvas deben contener las variables especificadas en el Anexo 5 del presente Acuerdo.

Todas las curvas incluidas deben tener las siguientes características:

- Etiquetas para los ejes y las correspondientes unidades de medida
- Títulos claros para cada gráfica indicando la prueba que fue desarrollada
- Escala para ambos ejes definida de tal forma que permita visualizar la dinámica de las señales.

En los anexos se debe incluir los datos utilizados para construir las curvas reales y las simuladas en formato de texto (.txt) considerando la misma estampa de tiempo y resolución para ambas curvas y reportando el nombre de la variable y las unidades correspondientes, utilizando el formato definido en el Anexo 5 del presente Acuerdo.

En caso de identificarse un comportamiento inestable en este control cuando la unidad está interconectada en las pruebas realizadas, se debe proponer un reajuste para el control correspondiente, mostrando a través de simulación y ante perturbaciones tipo escalón el impacto de este reajuste.

Diagrama de bloques

Se debe incluir el diagrama de bloques en el dominio de Laplace (s), con el modelo validado del control de potencia activa/frecuencia incluyendo transductores, controlador (ajuste modo de operación con unidad sincronizada), actuadores y turbina (para generadores Tipo I-III, y para tipo IV en caso de que se requiera para el modelo de la respuesta rápida en frecuencia). [1]

El modelo correspondiente al conjunto: control de potencia activa/frecuencia, actuadores y turbina debe incluir un parámetro que permita variar el máximo aporte de potencia activa de la planta teniendo en cuenta la influencia de variables externas tales como la velocidad del viento en plantas eólicas y la radiación en plantas solares fotovoltaicas.

Parámetros

Se debe reportar una tabla con los parámetros validados incluidos en el diagrama de bloques y las bases usadas para la obtención de los mismos en p.u.

Verificación de *Frequency Ride Through*

Las pruebas descritas a continuación son realizadas para verificar los modelos asociados a la función de *Frequency Ride Through*. Se debe presentar el detalle y los resultados de las simulaciones realizadas para verificar la funcionalidad de *Frequency Ride Through* de la planta de generación considerando los parámetros de operación sincronizada. En este campo se debe incluir como mínimo la siguiente información:

- Descripción de las condiciones iniciales de la planta de generación: voltaje en punto de conexión (V_{poc}), potencia activa en el punto de conexión (P_{poc}), potencia reactiva en el punto de conexión (Q_{poc}), voltaje en terminales de las unidades equivalentes en servicio (V_t), potencia activa de las unidades equivalentes en servicio (P), potencia reactiva de las unidades equivalentes en servicio (Q), número de unidades generadoras en paralelo en las unidades equivalentes en servicio e impedancia equivalente de la red.

Así mismo se debe entregar, en medio digital definido por el CND, el sistema de prueba utilizado para realizar la verificación de las funcionalidades mencionadas en la herramienta utilizada por el CND.

Para la ejecución de la prueba se deben realizar dos deslastres de carga: uno que cause la excursión de la frecuencia por fuera de los umbrales definidos en la función de FRT y otro que perturbe la frecuencia dentro de los límites de la funcionalidad. Para cada caso, se debe reportar una gráfica por cada una de las siguientes variables: Potencia activa en el punto de conexión, potencia reactiva en el punto de conexión y frecuencia vista por el lazo de la función FRT.

ANEXO 3.

Índices de evaluación para verificar la validez de los modelos de las plantas de generación eólicas y solares fotovoltaicas conectadas al SDL con capacidad Efectiva Neta o Potencia Maxima Declarada igual o mayor a 5 MW

El principio esencial de la validación de la respuesta dinámica de un modelo es que éste, al ser integrado en el programa de simulación utilizado por el CND para el planeamiento del SIN, permita reproducir dentro de niveles aceptables de precisión la respuesta real de los elementos modelados ante pruebas o perturbaciones en diferentes condiciones operativas.

Con el fin de contar con modelos útiles para el análisis y planeamiento del SIN, los Agentes generadores deben garantizar que la respuesta real y la simulada, utilizando los modelos validados, sean coherentes en los siguientes aspectos:

- Forma general de las curvas para las distintas pruebas de validación que se desarrollen, incluyendo la magnitud y velocidad de la respuesta
- Tiempo de establecimiento, tiempo de respuesta inicial, Tiempo de retardo, sobreimpulso
- Bandas muertas
- Valores iniciales y finales

Con el fin de verificar que las curvas sean coherentes de acuerdo con los parámetros y características señaladas, se determinarán los índices de evaluación que se presentan a continuación:

ERROR ABSOLUTO DEL SOBREIMPULSO (ES)

Es la diferencia absoluta entre los sobreimpulsos en porcentaje.

$$ES = |SI_R - SI_S|$$

Con:

$$SI = \frac{v_{\max} - v_f}{v_f - v_i} \times 100$$

Donde:

SI_R : Sobreimpulso de la señal real tomada durante la prueba

SI_S : Sobreimpulso de la señal simulada tomada del modelo

$v_{\max}$: Valor máximo de la curva

v_f : Valor final de la curva

v_i : Valor inicial de la curva

ERROR RELATIVO EN EL TIEMPO DE RETARDO (ETR)

Este error está basado en el tiempo de retardo, el cual se define como el tiempo necesario para que la señal alcance un 50% del valor final. El error relativo en el tiempo de retardo, será la diferencia absoluta relativa entre los tiempos de retardo real y simulado.

$$ETR = \left| \frac{TR_R - TR_S}{TR_R} \right| \times 100$$

Donde:

TR_R : Tiempo de retardo de la señal real tomado durante la prueba

TR_S : Tiempo de retardo de la señal simulada tomado con base en el modelo

ERROR RELATIVO EN EL TIEMPO DE ESTABLECIMIENTO (ETE)

Este error está basado en el tiempo de establecimiento, el cual se define como el tiempo necesario para que la señal ingrese en una banda de $\pm 3\%$ del tamaño del escalón alrededor del valor final. El error relativo en el tiempo de establecimiento, será la diferencia absoluta relativa entre los tiempos de establecimiento real y simulado.

$$ETE = \left| \frac{TE_R - TE_S}{TE_R} \right| \times 100$$

Donde:

TE_R : Tiempo de establecimiento de la señal real tomado durante la prueba

TE_S : Tiempo de establecimiento de la señal simulada tomado con base en el modelo

ERROR RELATIVO EN EL TIEMPO DE RESPUESTA INICIAL (ETRI)

Este error está basado en el tiempo de respuesta inicial, el cual se define como el tiempo necesario para que la señal salga de la banda de $\pm 3\%$ del tamaño del escalón alrededor del valor inicial. El error relativo en el tiempo de respuesta inicial, será la diferencia absoluta relativa entre los tiempos de respuesta inicial real y simulado.

$$ETRI = \left| \frac{TRI_R - TRI_S}{TRI_R} \right| \times 100$$

Donde:

TRI_R : Tiempo de respuesta inicial de la señal real tomado durante la prueba

TRI_S : Tiempo de respuesta inicial de la señal simulada tomado con base en el modelo

ERROR RELATIVO DEL VALOR FINAL (EVF)

Este error se define como la diferencia entre los valores finales alcanzados por las señales real y simulada, con base en la señal real.

$$EF = \left| \frac{vf_R - vf_S}{vf_R - vi_R} \right| \times 100$$

Donde:

vf_R : Valor final real de la señal obtenida con base en la prueba.

vf_S : Valor final de la señal simulada obtenida con base en el modelo.

vi_R : Valor inicial real de la señal obtenida con base en la prueba.

COEFICIENTE DE CORRELACIÓN LINEAL (CCL):

Este error es una medida de la relación lineal entre la señal real con la simulada.

$$CCL = \frac{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2 \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}}$$

Donde:

R_i : Es el i-ésimo valor de la señal real proveniente de la prueba.

S_i : Es el i-ésimo valor de la señal simulada proveniente del modelo.

$\bar{R}$: Es el valor promedio de la señal real proveniente de la prueba.

$\bar{S}$: Es el valor promedio de la señal simulada proveniente del modelo.

ERROR ABSOLUTO MEDIO NORMALIZADO (EAMN):

Este error es el promedio del valor absoluto de las diferencias punto a punto entre la señal real y la señal simulada. Cada punto de las señales debe estar normalizado por el mínimo valor entre el aporte de la señal real y la señal simulada. Se define aporte de la señal real como la máxima diferencia entre la señal real y el valor inicial y aporte de la señal simulada como la máxima diferencia entre la señal simulada y el valor inicial. El error se reporta en porcentaje.

$$EAMN = 100 * \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |(\bar{R}_i - \bar{S}_i)|$$

Donde,

$\bar{R}_i$: Es el i-ésimo valor de la señal real proveniente de la prueba, el cual es enormalizado por el mínimo valor entre el aporte de la señal real y la simulada.

$\bar{S}_i$: Es el i-ésimo valor de la señal simulada proveniente del modelo, el cual es normalizado por el mínimo valor entre el aporte de la señal real y la simulada.

n : Es el número de muestras de las señales.

ERROR COMBINADO (EC):

Es el error que considera simultáneamente el $EAMN$ y el CCL tal como se presenta en la siguiente ecuación:

$$EC = \frac{EAMN + 100(1 - CCL)}{2}$$

El Error combinado se reporta en porcentaje.

Los valores de referencia para los índices de coherencia, las pruebas y las señales sobre las que estos se aplican, son definidos en las Tablas A3.1 a A3.3, para el control de tensión/potencia reactiva, control de frecuencia/potencia activa:

Prueba	Señal	Índice	Valor de referencia
Escalón en la tensión de referencia.	Vpoc	ES	$\leq 10\%$
		EVF	$\leq 5\%$
		ETR	$\leq 5\%$
		ETE	$\leq 5\%$
		ETRI	$\leq 5\%$
		CCL	≥ 0.75
		EAMN	$\leq 12\%$
	Q	ES	$\leq 15\%$
		EVF	$\leq 10\%$
		ETR	$\leq 10\%$
		ETE	$\leq 5\%$

		ETRI	$\leq 5\%$
		CCL	≥ 0.75
		EAMN	$\leq 12\%$
1. Registros durante eventos del sistema	$V_{poc}, Q,$	EC	$\leq 30\%$

Tabla A3.1 Índices de coherencia para validación del modelo del control de tensión/potencia reactiva.

Prueba	Señal	Índice	Valor de referencia
1. Escalón en la frecuencia..	P	CCL	≥ 0.75
		EAMN	$\leq 12\%$
		EVF	$\leq 10\%$
		ES	$\leq 15\%$
		ETR	$\leq 10\%$
		ETRI	$\leq 5\%$
		ETE	$\leq 5\%$
2. Registros durante eventos de frecuencia del sistema y RRF.	P	EC	$\leq 30\%$

Tabla A3.2 Índices de coherencia para la validación del modelo del control de potencia activa/frecuencia.

Registros durante eventos de frecuencia del sistema y perturbaciones de tensión.	P, Q, V_{poc}	EC	$\leq 30 \%$
--	-----------------	----	--------------

Tabla A3.3 Índices de coherencia para el seguimiento a la calidad de los modelos

Se considera que un modelo pasa exitosamente la etapa de validación, si todos los índices de coherencia para cada nivel de carga, calculados para cada prueba, son menores o iguales a los valores de referencia indicados en las tablas A3.1 y A3.2. De lo contrario, el CND informará al Agente sobre los índices incumplidos para que este realice los ajustes necesarios en el modelo. Asimismo, se considerará que el seguimiento de los modelos es exitoso si se cumple con lo indicado en el numeral Decimocuarto del presente Acuerdo y la Tabla A3.3.

ANEXO 4.

Guía de pruebas mínimas para realizar la validación de los modelos de control para las plantas de generación eólicas y solares fotovoltaicas objeto de este Acuerdo

A continuación, se presenta una guía con pruebas que como mínimo deben ser realizadas para verificar la validez de los modelos de los controles de las plantas de generación eólicas y solares fotovoltaicas. Tener en cuenta los siguientes aspectos generales:

- Todas las protecciones y los limitadores del sistema de control de la planta de generación deben estar en servicio durante cualquier prueba en línea o fuera de línea.
- Para las pruebas relacionadas se deben tomar mínimo 100 muestras por segundo hasta que la señal se estabilice.
- Antes de comenzar las pruebas deben definirse los grupos bajo los cuales se va a realizar la definición de las unidades equivalentes, de acuerdo con los criterios de agrupación establecidos en el Anexo 1.

NOTA ACLARATORIA AUTOGENERACION: Las pruebas descritas en esta sección se plantean (a menos que se indique lo contrario) el punto de conexión de la planta al SDL. Para el caso de los proyectos de Autogeneración como punto de referencia puede utilizarse el punto de acople de la planta generadora. Esto con el objetivo de descontar el impacto de la carga asociada al autogenerador.

1. Validación del modelo del control de potencia reactiva/tensión por unidad equivalente

La validación del modelo del control de potencia reactiva/tensión debe hacerse en vacío (cuando aplique), y para tres niveles de carga del conjunto de generadores que componen todas las unidades equivalentes (en carga mínimo técnico, en carga media y al menos al 80% de la potencia activa nominal), en modo control automático, y se deben realizar como mínimo las siguientes pruebas:

- **Prueba en vacío (si aplica)** Esta prueba debe realizarse en los casos en los que se cuente con la tensión de referencia requerida para operación en vacío. En este caso se debe determinar la respuesta al escalón con una de las unidades generadoras que componen la unidad equivalente en vacío con el control de potencia reactiva/tensión en modo de control de tensión. La prueba debe realizarse tanto en condiciones en las que se exciten todas las dinámicas no lineales del modelo en operación en vacío (limitadores de corriente reactiva) como en condiciones en las que no se activen estas no linealidades. Se deben verificar los siguientes requerimientos:
 - El escalón en la referencia del voltaje en terminales de la unidad generadora debe ser al menos un 2% del voltaje nominal de la unidad generadora.
 - Se debe almacenar el registro de el voltaje en terminales de la unidad generadora el cual será utilizado como variable de comparación para realizar la validación del modelo.
 - Se deben comparar los registros almacenados del sistema real con la respuesta del modelo. Se debe verificar una coherencia entre la forma de la curva, el valor

inicial, el sobreimpulso, el tiempo de establecimiento, el tiempo de respuesta inicial, tiempo de retardo, la magnitud y el valor final.

- **Prueba con unidades equivalentes sincronizadas a la red.** Determinar la respuesta al escalón con las unidades generadoras que componen cada una de las unidades equivalentes de la planta de generación, sincronizadas a la red y con el control de potencia reactiva/tensión configurado en los 3 modos de control (tensión, potencia reactiva y factor de potencia) en las condiciones de carga definidas. Las pruebas deben realizarse tanto en condiciones en las que se exciten todas las dinámicas no lineales del modelo (Limitadores de potencia reactiva) como en condiciones en las que no se activen estas no linealidades. Se deben verificar los siguientes requerimientos:
 - Para cada caso se deben aplicar al menos dos escalones en la referencia del voltaje de las unidades generadoras que hacen parte de la unidad equivalente, uno ascendente y otro descendente, con una variación no inferior al 2% del voltaje nominal de terminales de la unidad generadora².
 - Se deben almacenar los registros de al menos la potencia reactiva de la unidad equivalente y el voltaje en el punto de conexión, los cuales serán utilizados como variables de comparación para realizar la validación del modelo.
 - Se deben comparar los registros almacenados del sistema real con la respuesta del modelo. Se debe verificar una coherencia entre la forma de la curva, el valor inicial, el tiempo de retardo, el sobreimpulso, el tiempo de establecimiento, el tiempo de respuesta inicial, la magnitud y el valor final.

2. Validación del modelo del control de potencia reactiva/tensión por planta³

La validación del modelo del control de potencia reactiva/tensión debe hacerse para tres niveles de carga de la planta de generación (mínimo técnico, en carga media y al menos al 80% de la potencia activa nominal) en modo control automático. Para los niveles de carga baja y media se deben probar al menos dos combinaciones diferentes de unidades generadoras de tal forma que se logre la misma potencia activa y se deben realizar como mínimo las siguientes pruebas:

- Determinar la respuesta al escalón con la planta de generación sincronizada con el control de potencia reactiva/tensión configurado en los 3 modos de control (tensión, potencia reactiva y factor de potencia) en las condiciones de carga definidas. Las pruebas deben realizarse tanto en condiciones en las que se exciten todas las dinámicas no lineales del modelo (Limitadores de potencia reactiva sin perjuicio de otras no linealidades que afecten el control de potencia reactiva/tensión como en condiciones en las que no se activen estas no linealidades. Se deben verificar los siguientes requerimientos:

² La magnitud del escalón debe ser verificada con el OR correspondiente y en ningún momento debe comprometerse la calidad y seguridad en la prestación del servicio de los usuarios finales conectados al (los) mismo(s) circuito de la planta. En caso de que el OR encuentre que la magnitud del escalón del 2% o mayor no es viable, se aceptan escalones de menor magnitud

³ Si la planta cuenta con solo una unidad equivalente las pruebas del numeral 1 son equivalentes a las pruebas de planta (no es necesario repetirlas)

- Para cada caso se deben aplicar al menos dos escalones en la referencia del voltaje en el punto de conexión, uno ascendente y otro descendente, con una variación no inferior al 2% del voltaje nominal de la planta de generación⁴.
 - Se deben almacenar los registros de al menos el voltaje en el punto de conexión, y potencia reactiva en este punto, los cuales serán utilizados como variables de comparación para realizar la validación del modelo.
 - Se deben comparar los registros almacenados del sistema real con la respuesta del modelo. Se debe verificar una coherencia entre la forma de la curva, el valor inicial, el tiempo de retardo, el sobreimpulso, el tiempo de establecimiento, el tiempo de respuesta inicial, la magnitud y el valor final.
- Se debe validar el modelo del control de potencia reactiva/tensión teniendo en cuenta la respuesta de la planta a una perturbación del sistema que verifique los siguientes criterios:
- La perturbación debe originar un cambio repentino en el voltaje del sistema de al menos el 2% del voltaje nominal en el punto de conexión o un cambio de al menos el 10% de la potencia reactiva respecto a los MVA nominales.
 - Las variables almacenadas incluyen potencia activa y reactiva en el punto de conexión de la planta de generación y voltaje en el punto de conexión.
 - El control de potencia reactiva / tensión debe estar en su modo normal de operación.
 - Los datos almacenados se comparan con los del modelo considerando una perturbación modelada del voltaje del sistema. Debe haber coherencia entre la potencia activa y reactiva generada y el voltaje en el punto de conexión en términos de: forma y magnitud de las curvas de acuerdo con los índices de coherencia definidos en el Anexo 3.
 - Estos registros deben ser diferentes a los usados para el levantamiento del modelo. Adicionalmente el CND seleccionará como mínimo un registro adicional asociado a un evento diferente a los enviados por el Agente.

Adicional a estas pruebas, se realizará la validación en el modelo de los valores de curva de carga obtenidos en las pruebas a esta característica considerando su función en el dominio de la tensión.

3. Validación y modelamiento del control de potencia activa/frecuencia.

Esta validación debe realizarse a nivel de planta o a nivel de unidad equivalente, de acuerdo con las características del control de potencia activa de la planta de generación. Con la planta de generación en su mínimo técnico, un valor intermedio y al menos el 80% de su potencia nominal declarada. La validación debe realizarse considerando los siguientes métodos:

⁴ La magnitud del escalón debe ser verificada con el OR correspondiente y en ningún momento debe comprometerse la calidad y seguridad en la prestación del servicio de los usuarios finales conectados al (los) mismo(s) circuito de la planta. En caso de que el OR encuentre que la magnitud del escalón del 2% o mayor no es viable, se aceptan escalones de menor magnitud

- Desarrollar una prueba ante al menos dos escalones en la frecuencia de referencia (uno ascendente y otro descendente)⁵. Se debe:
- Realizar la prueba tanto en condiciones en las que se exciten todas las dinámicas no lineales del modelo (por ejemplo, a corriente activa máxima sin perjuicio de otras no linealidades que afecten el control de potencia activa/frecuencia) como en condiciones en las que no se activen estas no linealidades.
 - Almacenar los registros de la señal de referencia de frecuencia y potencia activa de la planta de generación en el punto de conexión.
 - Se deben comparar los registros almacenados del sistema real con la respuesta del modelo. Se debe verificar una coherencia entre la forma de la curva, el valor inicial, el tiempo de retardo, el sobreimpulso, el tiempo de establecimiento, el tiempo de respuesta inicial, la magnitud y el valor final.
- Se debe validar el modelo del control de potencia activa/frecuencia para lo cual se debe capturar al menos un registro de evento en frecuencia en el que la planta esté al menos al 80% de la potencia activa nominal declarada y al menos un registro con la planta operando en una condición con una potencia inferior al 80 % de la potencia activa nominal declarada. En este caso se debe cumplir con los siguientes requerimientos⁶:
 - Los registros deben cubrir al menos 10 minutos con el evento centrado en la ventana de tiempo correspondiente.
 - Se deben almacenar los registros de la señal de referencia de frecuencia y potencia activa de la planta de generación en el punto de conexión.
 - Comparar los registros almacenados con los obtenidos con el modelo del control de potencia activa/ frecuencia a través del cálculo de los índices definidos (Ver Anexo 3)

Estos registros deben ser diferentes a los usados para el levantamiento del modelo. Adicionalmente el CND seleccionará como mínimo un registro adicional asociado a un evento diferente a los enviados por el Agente.

4. Validación de la limitación de rampas operativas.

- Realizar al menos dos escalones en la consigna operativa de potencia activa (uno ascendente y otro descendente), considerando los tamaños de escalón⁷ definidos en la Tabla A4.1 teniendo en cuenta cada uno de los siguientes ajustes de rampa: Mínimo valor

⁵La magnitud del escalón debe ser verificada con el OR correspondiente y en ningún momento debe comprometerse la calidad y seguridad en la prestación del servicio de los usuarios finales conectados al (los) mismo(s) circuito de la planta.

⁶ Los registros de los eventos reales de frecuencia se pueden obtener del sistema SCADA y pueden corresponder a un evento anterior o posterior a las pruebas de identificación del modelo siempre y cuando los sistemas modelados no hayan sido modificados.

⁷ La magnitud del escalón debe ser verificada con el OR correspondiente y en ningún momento debe comprometerse la calidad y seguridad en la prestación del servicio de los usuarios finales conectados al (los) mismo(s) circuito de la planta.

de rampa, el 14 % P_n /min, y el máximo valor que alcance si este es superior al 14 % P_n /min. Esta prueba deberá ser realizada al mínimo técnico, a un valor intermedio entre el mínimo y la máxima potencia activa disponible y al máximo valor de potencia activa disponible durante la prueba.

Rango disponible de generación (Potencia máxima disponible – Mínimo técnico)	Tamaño del escalón
Hasta 20 MW	50 % del tamaño del rango
Mayor a 20 MW y hasta 50 MW	40 % del tamaño del rango
Mayor a 50 MW y hasta 100 MW	20 % del tamaño del rango
Mayor a 100 MW y hasta 200 MW	10 % del tamaño del rango
Mayor a 200 MW	5 % del tamaño del rango

Tabla A4.1 Guía de escalones de prueba para verificar el modelo de las rampas operativas para las fuentes de generación eólica y solar fotovoltaica objeto de este Acuerdo

- Registrar la potencia activa en cada caso con una resolución no inferior a 1 muestra por segundo.
- Para cada caso, comparar los registros almacenados con los obtenidos con el modelo. Se debe verificar la coherencia entre la forma de la curva (R) y la magnitud (EAMN) a través del índice *EC* con el umbral definido en la Tabla A3.2.

REFERENCIAS

- [1] Wu, Q. Modeling and Modern Control of Wind Power. Wiley, 2018.
- [2] Xiao, W. Photovoltaic Power System: Modeling, Design, and Control. Wiley, 2017.