

Capítulo 2. ANEXO B. REQUERIMIENTOS DE MODELOS PRELIMINARES Y VALIDADOS DE LOS SAEB

A continuación, se presentan los requerimientos de los modelos preliminares y validados de los SAEB definidos en el Numeral 6 del presente Acuerdo.

AB.1 REQUERIMIENTOS PARA LOS MODELOS PRELIMINARES DE LOS SAEB

Los agentes representantes deben reportar los modelos preliminares de los SAEB en la herramienta de simulación que utiliza el CND, los cuales deben permitir simular correctamente con un paso de integración de 10 ms y no presentar problemas de estabilidad al integrarse a la Base de Datos -BD del sistema completo. Estos modelos deben reportarse con una anticipación mínima de 6 meses antes de la entrada en operación comercial de los SAEB.

Los modelos preliminares deben representar las características estáticas y dinámicas de los SAEB en el punto de conexión incluyendo: aporte de corriente de corto circuito para fallas desbalanceadas en el sistema y energía máxima que soporta ante huecos sucesivos de tensión.

Para lograr el cumplimiento de lo anterior la representación reportada por parte de los agentes, en la herramienta de simulación del CND, debe incluir como mínimo la información que se detalla a continuación y que se representa en la Figura B1:

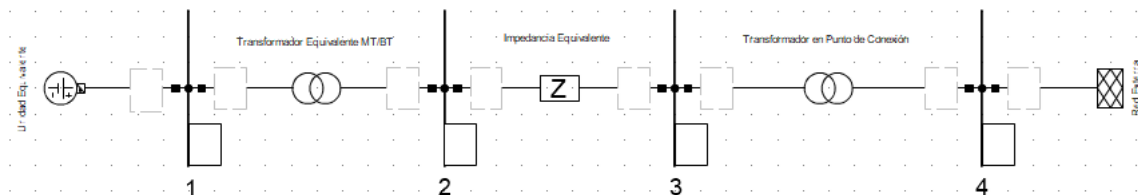


Figura B1. Representación de mínima información requerida para el modelo preliminar de los SAEB

- El transformador en punto de conexión AT/MT (3-4).
- Sistemas auxiliares.
- El transformador equivalente MT/BT (1-2). Se debe reportar los parámetros característicos del transformador, el fabricante y el número de transformadores en paralelo.
- Impedancia equivalente de línea entre el lado de media tensión de los transformadores de los inversores y el lado de media tensión del transformador de conexión. (Nodo 2- Nodo 3).
- Transformador zigzag de conexión a tierra, según su ubicación

La representación del SAEB debe realizarse a través de modelos agregados que cumplan con las siguientes características:

- **Unidad Equivalente:** Se define como unidad que agrega inversores. Las unidades equivalentes comparten todas las características indicadas a continuación:
 - Tipo de inversor utilizado por los SAEB (fabricante, modelo, capacidad).
 - Impedancia equivalente vista por cada inversor desde terminales hasta el punto de conexión. Para determinar la impedancia se debe realizar un agrupado de cada uno de los colectores de todo el SAEB y realizar escalones de 10% en el punto de conexión para la frecuencia y la tensión. Se considera que un par de impedancias se pueden unificar (calcular el paralelo) si la potencia activa, reactiva y tensión medidas en el punto de conexión de las unidades equivalentes de cada colectora presenta una desviación máxima del 1% para estas variables.
 - Configuraciones de los relés de protección de los inversores.
 - 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.
 - Control de planta.
- **Diagramas de bloques en dominio de Laplace** del controlador de planta, controles eléctricos donde se identifiquen claramente las siguientes funciones y el valor de los parámetros correspondientes.
 - Control de tensión (estatismo, respuesta rápida de corriente reactiva, curva de carga, modos de control: factor de potencia, potencia reactiva, tensión). 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 el SAEB.
 - *Voltage Ride Through*: Soportabilidad para eventos de tensión.
 - Velocidad de toma de carga o velocidad de descarga.
 - *Frequency Ride Through*: Soportabilidad para eventos de frecuencia.
 - Rampa de entrada y salida.
 - Modo de control ante fallas simétricas y asimétricas (Corriente balanceada, P constante, Q constante).
 - 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.

El modelo debe operar adecuadamente en todo el rango declarado del SAEB incluyendo condiciones derrateadas por mantenimiento de inversores.

Reporte de la información

El representante del SAEB deberá enviar al CND la Base de Datos (BD) con el modelo RMS de este en la herramienta de simulación del CND y el modelo EMT en la herramienta definida por el CND y un informe con el detalle del SAEB considerando como mínimo la siguiente información:

- Nombre del SAEB
- Ubicación geográfica del SAEB
- Capacidad nominal
- Número de inversores con su respectivo nombre de modelo y de fabricante.
- Tiempos de carga y descarga definidos desde carga mínima a carga máxima y viceversa.
- Unifilar con las características de conexión del SAEB,
- El transformador MT/BT. Se debe reportar los parámetros característicos del transformador, el fabricante y el número de transformadores en paralelo.
- Transformador de conexión AT/MT: Información de placa.
- 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 modelo de los servicios auxiliares con su respectivo consumo.
- Descripción de los agregados considerados, indicando claramente la justificación para definirlos, el número de inversores que se incluyen en cada uno.
- Número de controladores de planta y diagrama de bloques correspondiente. Descripción de las funciones que se encuentran representadas en el citado diagrama de bloques, con su respectiva parametrización y justificación para el ajuste considerado. La justificación debe

incluir pruebas de simulación reproducibles en la base de datos que se entrega para lo que se deben incluir en la misma los casos de estudio considerados. En estas pruebas se debe identificar el cumplimiento de los tiempos y características de respuesta definidos en el presente Acuerdo.

- Modelo en diagrama de bloques del control eléctrico de cada uno de los agregados incluyendo descripción de las funciones que se encuentran representadas en el citado diagrama de bloques, con su respectiva parametrización y justificación para el ajuste considerado. La justificación debe incluir pruebas de simulación reproducibles en la base de datos que se entrega para lo que se deben incluir en la misma los casos de estudio considerados. En estas pruebas se debe identificar el cumplimiento de los tiempos y características de respuesta definidas en el presente Acuerdo. Asimismo, se deben realizar pruebas para evaluar el desempeño de los SAEB ante fallas trifásicas, bifásicas y monofásicas desbalanceadas en el punto de conexión. Se debe indicar claramente cómo debe realizarse el ajuste de los parámetros para habilitar las funciones definidas, que se encuentran implementadas en el control eléctrico de las unidades equivalentes.
- Modelo EMT del SAEB en la herramienta utilizada por el CND
- Parametrización del SAEB
- Velocidad de toma de carga: Puede ser un único valor en MW/minuto para el rango entre la Pmin y la capacidad nominal del SAEB. El reporte se realizará mediante la herramienta que el CND disponga y deberá considerar los valores definidos en la Tabla B1.

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

Tabla B1. Formato de reporte de información de la velocidad de toma de carga

- Velocidad de descarga: Puede ser un único valor en MW/minuto para el rango entre la capacidad nominal del SAEB y la Pmin. El reporte se realizará mediante la herramienta que el CND disponga y deberá considerar los valores definidos en la Tabla B2.

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

Tabla B2. Formato de reporte de información de la velocidad de descarga

AB.2 REQUERIMIENTOS DE LOS MODELOS VALIDADOS RMS PARA LOS SAEB

A continuación, se presenta el procedimiento que debe llevarse a cabo para validar los modelos de los SAEB.

AB.2.1 ESTABILIDAD DE LOS CONTROLES DE GENERACIÓN Y LOS MODELOS VALIDADOS CORRESPONDIENTES. Los Agentes representantes de los SAEB deberán verificar las condiciones de estabilidad de los controles de los SAEB y los modelos validados correspondientes en operación sincronizada a la red, evaluando la estabilidad de los controles y los modelos correspondientes en condiciones de P_{min} , un valor intermedio y a la capacidad nominal del SAEB.

AB.2.2 PARÁMETROS REQUERIDOS DEL SAEB. Los Agentes representantes de los SAEB deben determinar los parámetros del modelo que mejor representen la dinámica de este, considerando elementos como líneas de transmisión, compensadores, transformadores, inversores, o cualquier otro parámetro físico o eléctrico que afecte el comportamiento estático o dinámico del SAEB. Se debe proporcionar mínimo la siguiente información:

- Tipo de conexión (Por ejemplo: 3PH, 3PH-E)
- Número de inversores en el SAEB.
- Corriente directa máxima que soporta cada inversor.
- Capacidad nominal del SAEB.
- Características de los sistemas de compensación de reactivos (capacidad, tensión nominal, reactancia), si aplica.
- Datos de placa de los transformadores de conexión AT/MT y el de cada unidad equivalente (MT/BT).
- Parámetros de las líneas que conectan el SAEB al punto de conexión (Reactancia, longitud, capacidad nominal, entre otros.). Estas líneas incluyen las asociadas a cada unidad equivalente y a todo el SAEB.
- Sistemas auxiliares.
- Impedancias equivalentes de línea entre el lado de media tensión de los transformadores de los inversores y el lado de media tensión del transformador de conexión.
- Transformador zigzag de conexión a tierra, según su ubicación.
- Número de unidades equivalentes.

Para definir la validez del modelo del SAEB y sus parámetros correspondientes, la reproducción de las diferentes pruebas realizadas por el Agente se hará en la herramienta de simulación dinámica del CND. Los resultados de las simulaciones serán comparados con los resultados de las pruebas en campo y se aplicarán los índices de evaluación indicados en el presente documento con el fin de verificar la validez de los modelos.

AB.2.3 ENTREGA DE RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE VALIDACIÓN DE LOS MODELOS DE LOS CONTROLES Y PARÁMETROS DE LOS SAEB. Los Agentes representantes de los SAEB mediante comunicación oficial deben enviar al CND en los medios que este defina para este fin la siguiente información:

- Informe de resultados donde se describan: la metodología utilizada, las pruebas realizadas y los resultados obtenidos en el proceso de validación de los modelos de control y los parámetros del SAEB.
- Modelos del SAEB y sus controles asociados en la herramienta de simulación utilizada por el CND.
- Datos necesarios para reproducir los registros de pruebas y las simulaciones en formato de texto (.txt).

AB.2.4 REVISIÓN DEL INFORME DE RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE VALIDACIÓN DE LOS MODELOS DE LOS CONTROLES Y PARÁMETROS DE LOS SAEB. El informe entregado por el Agente debe contener como mínimo la información solicitada en el presente Acuerdo. En caso de que el Agente no presente la información requerida, el CND le informará al Agente en un plazo máximo de 15 días calendario dicha situación para que este, en un plazo de 15 días calendario contados a partir de recibida la comunicación, envíe al CND el informe incluyendo los datos faltantes. A partir de la primera entrega, se seguirán aplicando plazos de 15 días calendario para revisión y reporte de información faltante tanto para el Agente como para el CND y el incumplimiento de estos plazos será reportado al CNO. Cuando se superen 3 entregas del informe en donde se evidencie la falta de la misma información solicitada, la situación deberá ser justificada en el CNO a través de correo electrónico y socializada en la reunión posterior de este para definir el compromiso de entrega definitiva. En todo caso, los tiempos que se incluyen en esta revisión deberán ser tales que la actualización de los modelos no supere 6 meses tras la primera comunicación del CND.

Para cumplir con los requerimientos de los modelos validados, el Agente representante del SAEB debe realizar pruebas de validación en las que se pueda contrastar la respuesta del sistema real con la simulada con el modelo obtenido. En el presente Acuerdo, se presenta una guía de pruebas mínimas que deben ser realizadas para verificar la validez de los modelos de los controles de generación. Lo anterior sin perjuicio de que puedan incluirse pruebas adicionales a las presentadas.

Independientemente de las pruebas que se realicen sobre el SAEB, las mismas deben desarrollarse a potencias correspondientes a P_{min} , un valor intermedio y a la capacidad nominal declarada, y deben considerarse perturbaciones en las que se exciten las dinámicas lineales y no lineales de los equipos modelados (Se deben considerar dinámicas no lineales tales como la limitación por curva de carga de entrega y absorción de reactivos, límites por temperatura, entre otros. Esto sin perjuicio de que se validen las otras funciones de limitación encontradas en el SAEB). Adicionalmente, el Agente representante del SAEB debe verificar que existe coherencia al comparar las curvas correspondientes del sistema real con las del sistema simulado, utilizando los modelos obtenidos. Una vez el CND reciba

oficialmente el informe de resultados por parte del Agente, el CND debe verificar dicha coherencia con base en los índices de comparación de curvas establecidos en el presente documento. Esta verificación debe hacerse sobre al menos las siguientes variables:

- **Control de Potencia Reactiva/Tensión:** voltaje en el punto de conexión del SAEB, potencia reactiva de cada unidad equivalente, potencia reactiva en el punto de conexión del SAEB.
- **Control para alivio de restricciones:** En este caso se analiza la operación del esquema de control para alivio de restricciones incluyendo el tiempo de operación del SAEB, la variable a analizar es la potencia de salida del SAEB en el punto de conexión
- **Perfil de carga:** Estado de carga del SAEB
- **Perfil de descarga:** Estado de carga del SAEB
- **Inyección rápida de reactivos y Voltage Ride Through:** Tensión en el punto de conexión, potencia activa en el punto de conexión y potencia reactiva en el punto de conexión.
- **Validación de la limitación de rampas operativas:** potencia activa en el punto de conexión

Para las pruebas realizadas sobre los controladores se deben tomar mínimo 100 muestras por segundo hasta que se logre la estabilización de la señal, lo cual se logra cuando se alcance un punto de operación que ingrese y permanezca dentro de la banda de $\pm 3\%$ del cambio esperado alrededor del valor final.

Durante la prueba de modelamiento de cada unidad equivalente se debe garantizar que estarán disponibles y en servicio, al menos, el 10% de los inversores que conforman dicha unidad equivalente, aproximando este valor al entero mayor más próximo.

AB.2.5 EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LOS MODELOS VALIDADOS. Una vez el CND reciba el informe completo, revisará los modelos validados de los controles del SAEB a los que hace referencia el presente Acuerdo en un plazo máximo de 15 días calendario contados a partir de la recepción de este. Esta revisión realizada en la herramienta de simulación dinámica utilizada por el CND incluirá la verificación de la estabilidad de los modelos. En caso de presentarse diferencias entre la respuesta del modelo suministrado y el comportamiento real, teniendo en cuenta los requerimientos considerados en el presente Acuerdo, el CND informará tal situación al Agente, para que se dé inicio a la revisión del modelo y si es necesario, realizar las respectivas correcciones.

En caso de que el Agente deba realizar correcciones al modelo, tendrá un plazo de 30 días calendario contados a partir de la comunicación del CND, para presentar nuevamente el

modelo validado y estable. A partir de la primera entrega, se seguirán aplicando plazos de 15 días calendario para revisión y entrega del modelo validado tanto para el Agente como para el CND y el incumplimiento de estos plazos será reportado al CNO cuando se superen 3 entregas del modelo validado sin cumplir con los requisitos establecidos. En este caso se podrán coordinar reuniones entre el agente y el CND para aclarar las diferencias encontradas y la situación deberá ser justificada al CNO. En todo caso, los tiempos que se incluyen en esta revisión deberán ser tales que la aprobación final del modelo por parte del CND se haga dentro de los 6 meses siguientes a la notificación inicial asociada al informe enviada al agente.

Adicionalmente a la información reportada por el agente, el CND podrá verificar la validez de los modelos del SAEB y sus controles utilizando registros diferentes a los utilizados en la etapa de levantamiento de modelos.

El CND podrá solicitar pruebas de reajuste a los controles y de requerirse la validación, cuando se presenten condiciones dinámicas del sistema que requieran reajuste de los parámetros de los controles del SAEB. Estos reajustes serán realizados en coordinación con el Agente de conformidad con lo establecido en el presente Acuerdo.

AB.2.6 DECLARACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL SAEB Y LOS MODELOS DE SUS CONTROLES ASOCIADOS. Una vez el CND de concepto favorable a la validez de los modelos, el Agente tendrá máximo 15 días calendario para enviar al CND la actualización de los parámetros correspondientes teniendo en cuenta la regulación vigente.

AB.2.7 ÍNDICES DE EVALUACIÓN PARA VERIFICAR LA VALIDEZ DE LOS MODELOS

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 representantes de los SAEB 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 normalizado 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 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 el EAMN y el CCL

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

Los valores de referencia para los índices de coherencia, las pruebas y las señales sobre las que estos se aplican, son definidos en la Tabla B3 para el control de tensión/potencia reactiva, en la Tabla B4 para los perfiles de carga y descarga y en las Tablas B5 y B6 para el control por alivio de restricciones:

Prueba	Señal	Índice	Valor de referencia
Escalón en la tensión de referencia.	Tensión en punto de conexión	ES	<=10%
		EVF	<=5%
		ETR	<=5%
		ETE	<=5%
		ETRI	<=5%
		CCL	>=0.75
		EAMN	<=12%
	Q	ES	<=15%
		EVF	<=10%
		ETR	<=5%
		ETE	<=5%

		ETRI	$\leq 5\%$
		CCL	≥ 0.75
		EAMN	$\leq 12\%$
1. Registros durante eventos del sistema	V_{poi}, Q	EC	$\leq 20\%$

Tabla B3. Índices de coherencia para el modelo del control de tensión/potencia reactiva.

Prueba	Señal	Índice	Valor de referencia
Consigna de carga/descarga	Carga/descarga del SAEB y potencia activa medida en el punto de conexión	ES	$\leq 10\%$
		EVF	$\leq 5\%$
		ETR	$\leq 5\%$
		ETE	$\leq 5\%$
		ETRI	$\leq 5\%$
		CCL	≥ 0.75
		EAMN	$\leq 12\%$

Tabla B4. Índices de coherencia para el modelo del perfil de carga, perfil de descarga

Prueba	Señal	Índice	Valor de referencia
Validación de esquema de control para alivio de restricciones: tiempo de respuesta	Potencia activa medida en	ES	$\leq 10\%$
		EVF	$\leq 2\%$
		ETR	$\leq 2\%$

	el punto de conexión	ETE	$\leq 2\%$
		ETRI	$\leq 2\%$

Tabla B5. Índices de coherencia para el modelo del esquema de control para alivio de restricciones: tiempo de respuesta

Prueba	Señal	Índice	Valor de referencia
Validación de esquema de control para alivio de restricciones: operación del esquema	Potencia activa medida en el punto de conexión	ES	$\leq 10\%$
		EVF	$\leq 2\%$
		ETR	$\leq 2\%$
		ETE	$\leq 2\%$
		ETRI	$\leq 2\%$
		CCL	≥ 0.75
		EAMN	$\leq 12\%$

Tabla B6. Índices de coherencia para el modelo del esquema de control para alivio de restricciones: operación del esquema

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 Tabla B3 a B6. De lo contrario, el CND informará al Agente sobre los índices incumplidos para que este realice los ajustes necesarios en el modelo o en el sistema si no se cumple con los requisitos mínimos establecidos en el presente Acuerdo.

Los umbrales de tolerancia definidos en las Tablas B4 a B6 podrán ser revaluados a valores inferiores de acuerdo con las condiciones particulares de cada proyecto según los requerimientos definidos por la UPME.

AB.2.8 GUÍA DE PRUEBAS MÍNIMAS PARA REALIZAR LA VALIDACIÓN DE LOS MODELOS DE CONTROL DE LOS SAEB.

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 los SAEB. Tener en cuenta los siguientes aspectos generales:

- Todas las protecciones y los limitadores del sistema de control del SAEB 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 presente Acuerdo.
- **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 y para tres niveles de carga del conjunto de inversores que componen todas las unidades equivalentes (en P_{min} , en carga media -en estado de carga y descarga- y al 90 % de la capacidad nominal-en estado de carga y descarga), en modo control automático, y se deben realizar como mínimo las siguientes pruebas:

- Prueba en vacío. 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 uno de los inversores 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 del inversor debe ser al menos un 2% del voltaje nominal del inversor.
 - Se debe almacenar el registro de el voltaje en terminales del inversor 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 tiempo de retardo, el sobreimpulso, el tiempo de establecimiento, el tiempo de respuesta inicial, la magnitud y el valor final.
- Determinar la respuesta al escalón con los inversores que componen cada una de las unidades equivalentes del SAEB, sincronizados 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 los inversores que hacen parte de la unidad equivalente, uno ascendente y otro descendente, con una variación no inferior al 2% del voltaje nominal del punto.
- 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.
- **Validación del modelo del control de potencia reactiva/tensión para el control centralizado**

La validación del modelo del control de potencia reactiva/tensión debe hacerse para tres niveles de carga del SAEB (Pmin, en carga media -en estado de carga y descarga- y al 90 % de la capacidad nominal-en estado de carga y descarga), en modo control automático. Para los niveles de carga baja y media se deben probar al menos dos combinaciones diferentes de inversores 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 el SAEB sincronizado 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 en el punto de conexión, uno ascendente y otro descendente, con una variación no inferior al 2% del voltaje nominal del SAEB.
 - 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 almacenar la respuesta del SAEB 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 del SAEB 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 presente Acuerdo.

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.

- **Validación del perfil de carga/descarga del SAEB**

- Para la prueba de carga se debe partir del estado de carga mínimo del SAEB y una potencia activa igual a P_{min} . En este estado, se debe enviar una consigna igual a la máxima potencia activa de absorción del SAEB, la cual se debe mantener hasta que el SAEB llegue a su máximo estado de carga teniendo en cuenta el perfil de carga del SAEB. Se deberá validar con el CND si es posible por restricciones del sistema llevar el SAEB a su máxima potencia en carga, en caso contrario el CND definirá el valor de consigna de la potencia activa.
- Para la prueba de descarga se debe partir del estado de carga máximo del SAEB y una potencia activa igual a P_{min} . En este estado, se debe enviar una consigna igual a la máxima potencia activa de entrega del SAEB, la cual se debe mantener hasta que el SAEB llegue a su mínimo estado de carga teniendo en cuenta el perfil de descarga del SAEB. Se deberá validar con el CND si es posible por restricciones del sistema llevar el SAEB a su máxima potencia de descarga, en caso contrario el CND definirá el valor de consigna de la potencia activa.

En cada caso se debe registrar y enviar el nivel de carga con una resolución no inferior a 1 muestra por segundo y la potencia activa en el punto de conexión con una resolución mínima de 100 muestras por segundo.

Se deberán comparar los registros almacenados de las señales de carga y descarga y de potencia activa del SAEB en el punto de conexión con las señales obtenidas con el modelo y calcular los índices definidos en la Tabla B4 teniendo como referencia la señal de consigna.

- **Validación del esquema de control para alivio de restricciones**

Esta validación se divide en dos pruebas, una requerida para validar el tiempo de respuesta del SAEB y la otra requerida para validar el esquema de control de operación del SAEB.

- Validación del tiempo de respuesta del SAEB para alivio de restricciones: Partiendo del estado de flotación del SAEB, se debe realizar a nivel local un escalón en la potencia de referencia del SAEB correspondiente al 20 % de su capacidad, otro al 50 % y otro correspondiente al 100 % de su capacidad (El valor del escalón deberá ser revisado con el CND en función de las condiciones de seguridad del sistema).

En cada caso se debe registrar y enviar el nivel de carga con una resolución no inferior a 1 muestra por segundo y la potencia activa en el punto de conexión con una resolución mínima de 100 muestras por segundo.

Se deberán comparar los registros almacenados de la potencia activa del SAEB en el punto de conexión con la señal obtenida con el modelo y calcular los índices definidos en la Tabla B5 teniendo como referencia la señal de consigna. Para los propósitos de la operación del SAEB, el tiempo para alcanzar la consigna se define como el tiempo de establecimiento de la señal de potencia activa ante el envío de la consigna. Este tiempo deberá ser inferior o igual a un segundo.

- Validación de operación del esquema de control de operación del SAEB para alivio de restricciones: Se deben inyectar señales en la(s) entrada(s) del control a través de la cuales se lleva a cabo la activación/desactivación del esquema de control, para verificar la correcta actuación de este: al menos una que no active el esquema de control y otra que lo active en el mínimo valor de funcionamiento de este. En todos los casos se debe registrar en una misma ventana de tiempo las señales que definen la actuación del esquema, el estado de carga del SAEB, la señal de salida del control al SAEB y la potencia de salida del SAEB. Los registros deben reportarse de forma que incluyan un segundo antes del cambio en la señal de entrada al control y cuando se alcance el tiempo de establecimiento de la potencia de salida del SAEB.
- En cada caso se debe registrar y enviar el nivel de carga con una resolución no inferior a 1 muestra por segundo, la potencia activa en el punto de conexión con una resolución mínima de 100 muestras por segundo y la señal de activación del esquema con la mejor resolución disponible.
- Se deberán comparar los registros almacenados de la potencia activa del SAEB en el punto de conexión con la señal obtenida con el modelo y calcular los índices definidos en la Tabla B6 teniendo como referencia la señal de consigna. Para los propósitos de la operación del SAEB, el tiempo para alcanzar la consigna se define como el tiempo de establecimiento de la señal de potencia activa considerando la actuación del esquema. Este tiempo deberá ser inferior a tres segundos.

El modelo correspondiente debe incluir todas las lógicas de operación del esquema de control en función de las señales de activación del mismo de manera que se relacionen los valores de la(s) señal(es) de activación con la potencia de consigna al SAEB.

○ **Validación de la limitación de rampas operativas.**

- Realizar dos escalones en la consigna operativa de potencia activa, uno ascendente y otro descendente considerando los tamaños de escalón definidos en la Tabla A1, de la capacidad nominal (C_n) del SAEB tanto para subir como para bajar teniendo en cuenta cada uno de los siguientes ajustes de rampa en una condición de flotación: Mínimo valor de rampa, un valor intermedio entre el mínimo valor de rampa y el 14% C_n/min considerando la granularidad del ajuste, el 14 % C_n/min , y el máximo valor que alcance si este es superior al 14 % C_n/min .
- Registrar la potencia activa en cada caso con una resolución no inferior a 100 muestras 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 y la magnitud a través del índice *EC*.

○ **Verificación de inyección rápida de reactivos y Voltage Ride Through**

Las pruebas descritas a continuación son realizadas para verificar los modelos asociados al lazo de inyección rápida de reactivos 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 del SAEB considerando los parámetros de operación sincronizada. Esta validación se basa en simulaciones y no incluye pruebas en campo. En este campo se debe incluir como mínimo la siguiente información:

- Descripción de las condiciones iniciales del SAEB: 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 inversores 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 realizar 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 y que el aporte de corriente reactiva de secuencia negativa sea proporcional al cambio del voltaje de secuencia negativa. Estos valores deberán ser tabulados y evaluados en dos puntos: entre 2-3 ciclos y entre 5-6 ciclos de iniciada la falla o hueco de tensión tal como se muestra en las Tabla B7 y B8.

Tipo de falla:	Monofásica a tierra					
Tiempo	Voltaje de secuencia positiva (p.u.)	Corriente de secuencia positiva (p.u.)	Ángulo de corriente de secuencia positiva con respecto al voltaje de secuencia positiva (°)	Voltaje de secuencia negativa (p.u.)	Corriente de secuencia negativa (p.u.)	Ángulo de corriente de secuencia negativa con respecto al voltaje de secuencia negativa (°)
Transitoria						
Permanente						

Tabla B7. Información falla monofásica a tierra

Tipo de falla:	Bifásica a tierra					
Tiempo	Voltaje de secuencia positiva (p.u.)	Corriente de secuencia positiva (p.u.)	Ángulo de corriente de secuencia positiva con respecto al voltaje de secuencia positiva (°)	Voltaje de secuencia negativa (p.u.)	Corriente de secuencia negativa (p.u.)	Ángulo de corriente de secuencia negativa con respecto al voltaje de secuencia negativa (°)
Transitoria						
Permanente						

Tabla B8. Información falla monofásica a tierra

Para la simulación del desempeño de la función de inyección rápida de reactivos, se debe realizar 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.

AB.3 MODELOS VALIDADOS EMT DE LOS SAEB.

Los modelos EMT que se reporten deben ser representativos del comportamiento real de los SAEB para lo que deben cumplir con los siguientes requisitos:

- Contar con las funciones básicas asociadas al control de potencia reactiva – tensión (incluyendo los modos de control de potencia reactiva, factor de potencia y tensión), inyección rápida de corriente reactiva, modo de falla (VRT) y curva de carga.
- Ser parametrizables por el usuario para lo cual se debe indicar la función de cada una de las variables.
- La parametrización con que se reporta el modelo debe corresponder al ajuste del SAEB.
- Ser modelos de usuario.
- A través de pruebas Hardware In the Loop (HiL) se debe demostrar el modo falla (VRT) para fallas simétricas y asimétricas, el aporte de potencia reactiva ante huecos de tensión, el comportamiento ante variaciones de frecuencia, las modificaciones en los set-point de tensión, para todos los modos de control disponibles en el SAEB. El modelo debe operar adecuadamente considerando un paso mínimo entre 20 y 200 microsegundos.
- Se deben listar todas las funciones incluidas en el modelo.

AB.2.4 SEGUIMIENTO A LA CALIDAD DE LOS MODELOS.

El CND realizará seguimiento a la calidad de los modelos de los SAEB a través del procedimiento que se presenta a continuación:

- Se evaluará la calidad de los modelos del SAEB en las siguientes variables:
 - Control de potencia reactiva/tensión: Voltaje en punto de conexión, potencia reactiva en punto de conexión y potencia reactiva de las unidades equivalentes (siempre y cuando se cuente con la supervisión de estas en tiempo real).
 - Control para alivio de restricciones: variable(s) de activación vs. Potencia de salida del SAEB visto en el punto de conexión, perfiles de carga y descarga.

Para la validación del control de potencia reactiva/tensión se realizará el siguiente procedimiento:

Se tomarán registros de perturbaciones de tensión del semestre anterior con la mejor resolución disponible con un ancho de ventana tal que se tenga 1 segundo antes de iniciada la perturbación y un minuto después. Se define perturbación de tensión aquella variación superior al 2 % de la tensión en el punto de conexión del SAEB.

En caso de que el CND requiera registros que el agente representante tenga disponibles, el Agente deberá enviárselos, a más tardar 8 días calendario después de la solicitud del CND considerando la mejor resolución disponible a través de los medios que el CND disponga para este intercambio de información. El CND tendrá 2 días después de pasado el evento para hacer la solicitud correspondiente. Para todos los registros se calcularán los índices de coherencia EAMN, CCL y EC definidos en el Numeral AB2.7 del presente Acuerdo. Se considerará que el seguimiento es exitoso si se cumple al menos con una de las siguientes condiciones:

- EC cumple $\leq 30\%$.
 - Error absoluto máximo obtenido al comparar las señales simulada y real en toda la ventana de tiempo de análisis, es menor o igual al error de medición siempre y cuando el índice CCL sea mayor a 0.45.
-
- En caso de que se tengan menos de 10 registros por control en el semestre de análisis, se acumularán los mismos con los periodos de análisis posteriores.
 - En caso de que se superen los umbrales definidos en al menos uno de los índices en 5 casos o más que tengan el mismo patrón (Ver Figura B.2), se enviará al agente un informe con el resultado del seguimiento para que este lo analice e informe al CND a más tardar 8 días calendario después si identifica alguna causa para esta condición. En caso de no encontrarse una justificación, el agente y el CND revisarán conjuntamente el tema en un plazo no superior a 5 días hábiles a partir de la respuesta del agente.

A continuación se presenta la definición de los patrones para el proceso de seguimiento a la calidad de los modelos:



Figura B.2. Patrones definidos para el seguimiento a modelos.

Los patrones indicados en la Figura 1 se detallan a continuación:

- **Desfase entre la señal medida y la simulada:** Patrón asociado a diferencias en los tiempos de actuación de la señal real en comparación a los obtenidos con el modelo.
- **Ruido en los registros:** Casos en los cuales el ruido de la señal real afecta el cálculo de los índices de coherencia establecidos.
- **Tiempo de muestreo de los registros:** Está asociado a registros con baja frecuencia de muestreo que no capturan las dinámicas del SAEB y por lo tanto no pueden ser comparadas adecuadamente con la señal simulada.
- **Tiempo de respuesta/velocidad de respuesta:** Patrón asociado a diferencias en los tiempos de respuesta de la señal real en comparación a los obtenidos con el modelo.
- **Banda muerta:** Casos donde se evidencia que una de las señales (simulada o real) tiene zonas muertas que difieren a las definidas en la otra señal.

•*Respuesta oscilatoria/Inestabilidad:* Casos donde se evidencia una respuesta oscilatoria y/o inestable en solo una de las dos respuestas.

- A partir de la reunión de revisión se definirá si la respuesta inadecuada del modelo puede ser resuelta a través de un reajuste de parámetros o si se requiere actualizar el modelo de control. Para el primer caso, el CND en conjunto con el agente realizarán un ajuste del modelo sin la obligatoriedad de realizar pruebas adicionales.
- En el segundo caso el agente deberá enviar al CND el modelo validado cumpliendo con las pruebas y requerimientos establecidos en el presente Acuerdo en un plazo de 6 meses luego de recibida la notificación del CND.

Para la validación del control por alivio de restricciones se realizará verificación del adecuado desempeño del esquema cuando este opere vs. el modelo correspondiente, en caso de que se identifique que el tiempo de operación del esquema no es acorde con lo definido o el aporte/absorción de potencia es diferente a lo esperado, el agente representante deberá realizar nuevamente las pruebas de verificación y realizar los ajustes correspondientes. Las pruebas correspondientes deberán realizarse en un plazo no superior a 30 días calendario luego de la notificación del CND y el modelo actualizado deberá enviarse en un plazo no superior a 90 días calendario luego de la notificación correspondiente. La tolerancia de la diferencia entre lo esperado y lo obtenido se definirá en cada caso particular teniendo en cuenta el impacto de las desviaciones según los análisis realizados por la UPME.