

## **ANEXO 1**

### Objetivo

Este anexo define el formato para el reporte de los modelos validados del generador y de los controles asociados.

### Información requerida

Los informes de resultados de validación deberán presentarse en los medios definidos por el CND en formato digital Adobe Portable Document Format (PDF). Cada informe debe incluir:

- Tabla de contenido
- Generalidades de las pruebas
- Descripción del generador y los parámetros asociados
- Descripción de los sistemas de control del generador: regulador de velocidad/potencia, turbina, sistema de excitación y estabilizador de sistema de potencia (PSS) y cualquier otro sistema de control asociado al generador, como por ejemplo los limitadores del sistema de excitación, limitadores de temperatura, lógicas de conexión/desconexión.
- Descripción de los detalles de las pruebas de validación realizadas
- Diagrama de bloques de los modelos validados de cada sistema de control con sus parámetros.
- Curvas comparativas del sistema real vs las obtenidas a través de simulación de los modelos validados.
- Anexos que contengan los modelos validados implementados en la herramienta de simulación seleccionada y que permitan simular todas las condiciones definidas en el Acuerdo. Se recomienda que esta implementación sea realizada en la herramienta utilizada por el CND, sin embargo pueden entregarse en otras herramientas de simulación dinámica.
- 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)

Los detalles de estos requerimientos se presentan a continuación:

Tabla de contenido

El informe debe contener una tabla de contenidos similar a la que se muestra en la figura siguiente:

| <b>Tabla de contenido</b>  |   |
|--|---|
| <b>1. GENERALIDADES</b>  |   |
| <b>2. GENERADOR</b> .....  | x |
| 2.1 Descripción .....  | x |
| 2.2 Pruebas de validación .....  | x |
| 2.3 Verificación de la validez de los parámetros del generador .....                     | x |
| 2.4 Parámetros .....   | x |
| <b>3. SISTEMA DE EXCITACIÓN</b> .....  | x |
| 3.1 Descripción .....  | x |
| 3.2 Pruebas de validación.....   | x |
| 3.3 Verificación de la validez del modelo del sistema de excitación .....                | x |
| 3.4 Diagrama de bloques.....   | x |
| 3.5 Parámetros .....   | x |
| <b>4. ESTABILIZADOR DEL SISTEMA DE POTENCIA</b> .....                                    | x |
| 3.1 Descripción .....  | x |
| 3.2 Pruebas de validación.....   | x |
| 3.3 Verificación de la validez del modelo del estabilizador del sistema de potencia..... | x |
| 3.4 Diagrama de bloques.....   | x |
| 3.5 Parámetros .....   | x |
| <b>5. REGULADOR DE VELOCIDAD/POTENCIA</b> .....  | x |
| 3.1 Descripción .....  | x |
| 3.2 Detalles de las pruebas de validación de los parámetros.....                         | x |
| 3.3 Verificación de la validez del modelo del Regulador de velocidad/Potencia            |   |
| 3.4 Diagrama de bloques.....   | x |
| 3.5 Parámetros .....   | x |
| 3.6 Verificación de estabilidad en red aislada .....                                     | x |
| <b>6. ANEXOS</b> .....   | x |

## Generalidades

En este ítem se debe incluir los siguientes detalles:

- Nombre de la planta bajo pruebas de validación
- Agente representante
- Nombre de la persona responsable de las pruebas de validación
- Fecha y hora en la que se realizaron las pruebas

## GENERADOR

### **Descripción**

En este campo se debe incluir:

- Nombre de la unidad
- Tipo de generador (polos salientes, rotor liso)
- Fabricante
- Valores nominales (Potencia aparente nominal  $S$  (MVA), Voltaje en terminales  $V_t$  (kV), Factor de potencia nominal  $f_p$ , Tensión de campo nominal  $V_f$  (V), Corriente de campo nominal  $I_f$  (A)).

### **Pruebas de validación**

Se debe realizar una descripción de las pruebas, definiendo:

- Fecha y hora de las pruebas.
- Tipo de prueba: con unidad sincronizada a la red o en vacío.
- Datos de la perturbación: tipo (escalón, rechazo de carga, etc.), magnitud, punto de inyección.
- Condiciones iniciales del generador en la prueba:  $P$ ,  $Q$ ,  $V_t$ ,  $V_f$ .
- Estado de controles auxiliares (Con o sin: PSS).
- Bases utilizadas en los modelos para llevar las variables a p.u.

### **Verificación de la validez de los parámetros del generador**

Debe describirse la metodología utilizada para determinar los parámetros del generador.

### **Parámetros del generador**

Se deben reportar al menos los parámetros del generador definidos en el Artículo Décimo del presente Acuerdo, resaltando cuáles parámetros difieren con lo reportado por el fabricante o son modificados respecto a lo que se encuentra reportado al CND.

En los anexos se debe incluir los datos utilizados para construir las curvas reales y las simuladas utilizadas para obtener los parámetros del generador. Los datos asociados deben enviarse en formato de texto (.txt), considerando la misma estampa de tiempo para ambas curvas y reportando el nombre de la variable y las unidades correspondientes.

## SISTEMA DE EXCITACIÓN

### **Descripción**

En este campo se debe incluir:

- Fabricante.
- Modelo del equipo.
- Modos de operación disponibles (automático (tensión), manual (corriente de campo), control de potencia reactiva, factor de potencia, control conjunto, Otro: especificar).
- Modo de operación normal (automático (tensión), manual (corriente de campo), control de potencia reactiva, factor de potencia, control conjunto, Otro: especificar).

### **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.
- Datos de la perturbación: tipo (escalón, inyección de registros), magnitud, punto de inyección, tiempo en el que se realiza la perturbación.
- Condiciones iniciales del generador en la prueba: P, Q, Vt, Vf.
- Condiciones iniciales de la barra infinita.
- Estado de controles auxiliares (Con o sin: PSS).
- Reactancia equivalente de red.
- Modo de control del sistema de excitación (manual, automático, factor de potencia, control conjunto, etc.).
- 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 sistema de excitación**

Se deben presentar la comparación de las curvas reales y simuladas que demuestren la validez del modelo del sistema de excitación. Las curvas deben corresponder al menos a las siguientes variables:

Voltaje en terminales del generador, voltaje de campo del generador (voltaje de campo de la excitatriz y la corriente de campo para las unidades sin escobillas) y potencia reactiva (para pruebas bajo carga).

Asimismo, en caso de ser posible, se deben presentar las señales a la salida física de los limitadores (OEL, UEL, V/Hz, MEL, LPQ, SCL y otros que estén disponibles) y la salida física de las funciones de compensación (RCC, CCC).

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 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, incluyendo los limitadores asociados, 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 en el voltaje de referencia el impacto de este reajuste.

## **Diagrama de bloques**

Se debe incluir el diagrama de bloques en el dominio de Laplace ( $s$ ) del sistema de excitación incluyendo el regulador de tensión, limitadores del sistema de excitación (UEL, OEL, MEL, LPQ y otros), limitador V/Hz, limitador de corriente estatórica y funciones de compensación (RCC, CCC y otros). Adicionalmente se debe entregar el modelo de control conjunto de tensión de la planta en caso de que la misma opere en esta modalidad en condiciones normales. 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. Se recomienda que el modelo correspondiente sea implementado en la herramienta utilizada por el CND, sin embargo este puede entregarse en otra herramienta de simulación dinámica. El modelo correspondiente al sistema de excitación debe estar definido con base en la capacidad declarada del generador.

## **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.

## ESTABILIZADOR DEL SISTEMA DE POTENCIA

### Descripción

En este campo se debe incluir:

- Fabricante.
- Modelo del equipo.
- Tipo (Dual, Potencia, Frecuencia, Velocidad, Multibanda, otro).
- Señales de entrada.
- Umbrales de activación/desactivación.

### 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.
- Datos de la perturbación: tipo (escalón, inyección de registros), magnitud, punto de inyección, tiempo en el que se realiza la perturbación.
- Condiciones iniciales del generador en la prueba (P, Q, Vt, Vf)
- Condiciones iniciales de los otros generadores que se encuentren acoplados hidráulicamente a la unidad bajo prueba: P, Q, Vt (aplica a generadores hidráulicos).
- Reporte de cualquier modificación sobre los parámetros del control que haya sido necesaria para la realización de cada prueba.
- Reactancia equivalente de red.
- Bases utilizadas en el modelo para llevar las variables a p.u.
- Informar si la lógica de activación/desactivación estaba operativa.

### Verificación de la validez del modelo del estabilizador del sistema de potencia

Se debe presentar la comparación entre las curvas reales y simuladas que demuestren la validez del modelo del estabilizador del sistema de potencia. Las variables a ser comparadas deben ser al menos: potencia activa del generador, potencia reactiva del generador, voltaje en terminales del generador, y en caso de ser posible la señal de salida física del estabilizador del sistema de potencia.

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 para ambas señales 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 una inestabilidad de este control cuando la unidad está interconectada en las pruebas realizadas, se debe indicar en el informe para coordinar con el CND el reajuste del control correspondiente.

### **Diagrama de bloques**

Se debe incluir el diagrama de bloques en el dominio de Laplace ( $s$ ) del estabilizador del sistema. Si aplica, se deben incluir las lógicas de conexión/desconexión del PSS. Se debe adjuntar en formato digital el modelo validado correspondiente. Se recomienda que este sea implementado en la herramienta utilizada por el CND, sin embargo puede entregarse en otras herramientas de simulación dinámica. El modelo correspondiente debe estar definido con base en la capacidad declarada del generador.

### **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.

REGULADOR DE VELOCIDAD/POTENCIA

### **Descripción**

En este campo se debe incluir:

- Fabricante del equipo.
- Modelo del equipo.
- Tipo de regulador (Hidráulico, Electrohidráulico, Electrónico, Digital).
- Tipo de Turbina (Pelton, Francis, Kaplan, turbovapor, turbogas, otra).
- Modos de control disponibles (temperatura, nivel, presión, etc., Otro: especificar).
- Tipo de ciclo (Rankine, Brayton, otro) – Aplica para unidades térmicas indicar.
- Frecuencia de los modos torsionales (para las plantas térmicas).
- Fecha de la(s) prueba(s).

### **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
- Datos de la perturbación: tipo (escalón, inyección de registros), magnitud, punto de inyección, tiempo en el que se realiza la perturbación.
- Estado de controles auxiliares (Con o sin: PSS).
- Reactancia equivalente de red.
- Condiciones iniciales del generador en la prueba y de los otros generadores que se encuentren acoplados hidráulicamente a la unidad bajo prueba: P, Q, Vt, Vf.
- Modo de operación del regulador de Velocidad (Potencia, Velocidad, Caudal, Posición, Presión, Temperatura, Carga Base, otro)
- 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 regulador de velocidad/potencia**

Se deben presentar las curvas comparativas que demuestren la validez de los transductores, controlador (modo de operación con unidad sincronizada), actuadores, turbina, conducciones e interacción entre unidades (para plantas hidráulicas). Las variables a ser comparadas deben ser al menos:

La potencia activa del generador, apertura de agujas o de distribuidor y en caso de ser posible, presión en la tubería (unidades hidráulicas) y apertura de válvulas (unidades térmicas).

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 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.

### **Diagrama de bloques**

Se debe incluir el diagrama de bloques en el dominio de Laplace ( $s$ ), con el modelo validado del regulador de velocidad/potencia incluyendo transductores, controlador (ajuste modo de operación con unidad sincronizada), actuadores, turbina, para unidades hidráulicas conducciones e interacción entre unidades y para unidades térmicas el limitador de temperatura (TCL).

El modelo correspondiente al conjunto regulador de velocidad/actuador/turbina debe incluir un parámetro que permita variar el máximo aporte de potencia activa de los generadores teniendo en cuenta la influencia de variables externas tales como la temperatura en unidades térmicas o el nivel de embalse en las unidades hidráulicas en dicho aporte.

En el caso de las unidades que compartan conducciones se deben entregar los modelos del regulador de velocidad de cada unidad sin incluir las conducciones y cuando se tenga modelado el regulador de la última unidad del grupo se debe enviar el modelo de las conducciones considerando la interacción de todas las unidades asociadas.

Cuando se presente modernización de un regulador de velocidad asociado a un grupo de unidades que comparte conducciones, el modelo correspondiente debe ajustarse al modelo de conducciones declarado o si se prefiere se debe actualizar los modelos de los reguladores de velocidad correspondientes al grupo que comparte conducciones.

El modelo del control de velocidad / potencia para el modo de operación en red aislada también debe ser entregado tanto para unidades hidráulicas como térmicas. Se debe adjuntar en formato digital el modelo validado correspondiente. Se recomienda que este modelo sea implementado en la herramienta utilizada por el CND, sin embargo puede entregarse en otras herramientas de simulación dinámica.

Los modelos del regulador de velocidad que se reporten deben estar contruidos con base en la capacidad de la turbina.

### **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 estabilidad en red aislada**

Para el caso de las unidades hidráulicas, se debe presentar el detalle y los resultados de las pruebas realizadas para verificar la estabilidad en red aislada de la unidad considerando los parámetros de operación sincronizada. En este campo se debe incluir como mínimo la siguiente información:

- Reportar si la prueba fue realizada a través de simulación o en campo. En caso de que se realice en campo, reportar la fecha y hora de la prueba.
- Describir condiciones de la prueba: Estado de PSSs (Activos o no), condiciones iniciales del generador bajo prueba ( $P$ ,  $Q$ ,  $V_t$ ,  $f$ ) y estado de las otras unidades de la planta en caso de que la prueba se realice en campo.
- Curvas de potencia y frecuencia del generador obtenidas para esta prueba.



Consejo Nacional de Operación

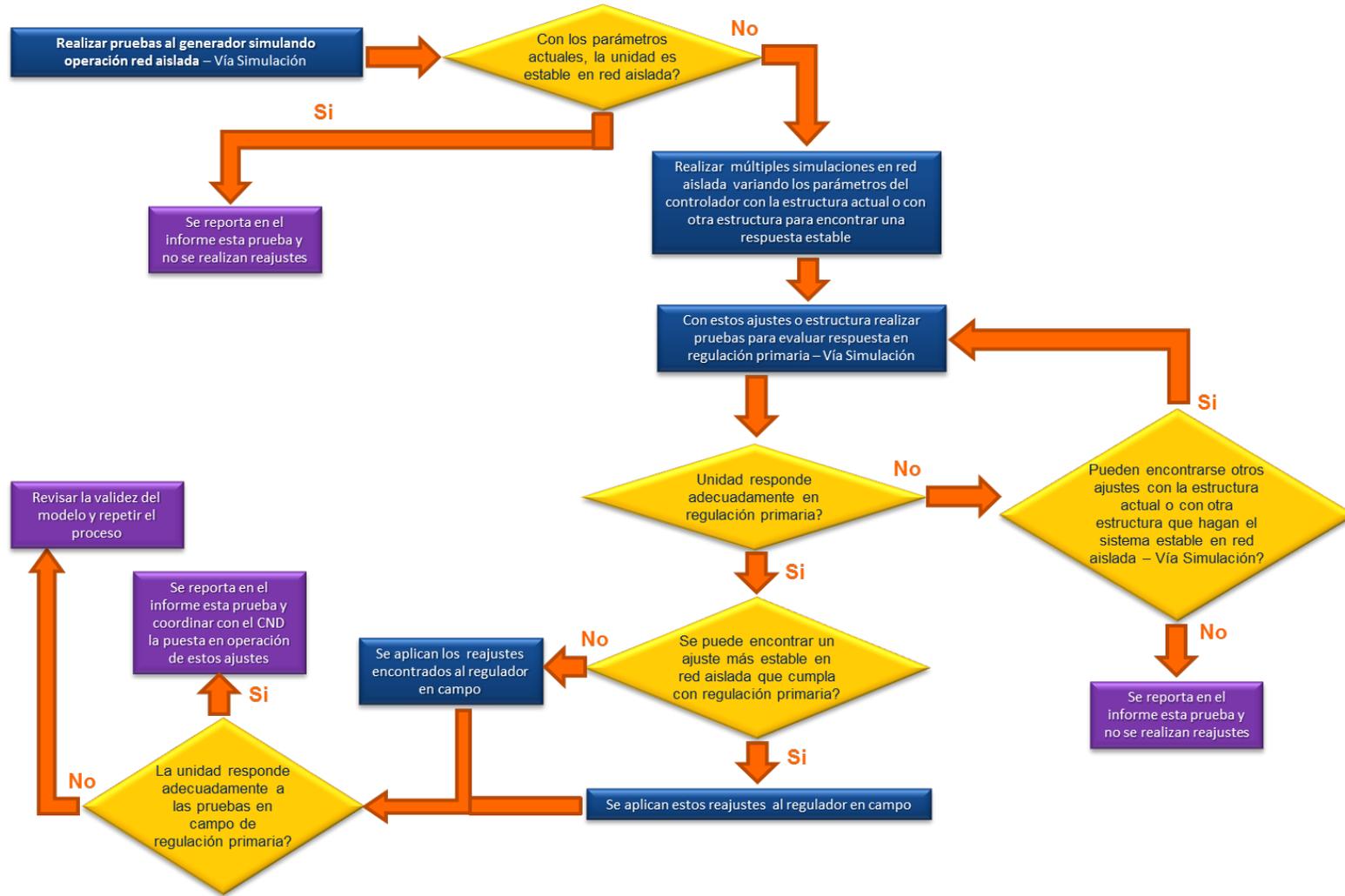
Asimismo se debe entregar en medio digital, el sistema de prueba utilizado para realizar la verificación de estabilidad en red aislada. Se recomienda que este sistema de prueba sea implementado en la herramienta utilizada por el CND, sin embargo, puede entregarse en otras herramientas de simulación dinámica.

En caso de identificarse una inestabilidad de este control con la unidad en simulación de red aislada, se debe proponer un reajuste para el control correspondiente, mostrando a través de simulación el impacto de este reajuste desde el punto de vista de estabilidad y de regulación primaria y la propuesta de trabajo para su implementación que incluya pruebas de regulación primaria siguiendo lo definido en el Artículo Noveno.

**ANEXO 2.**

**Procedimiento propuesto para la realización de las pruebas en simulación de red aislada para unidades hidráulicas**

En la Figura A2.1 se presenta el diagrama de flujo con el procedimiento propuesto para la realización de las simulaciones en red aislada de las unidades hidráulicas:



**Figura A2.1 Procedimiento propuesto para la realización de las pruebas en simulación de red aislada para unidades hidráulicas**

Con base en el diagrama de flujo presentado en la Figura A2.1, a continuación se detallan las condiciones de las simulaciones requeridas para determinar la estabilidad de una unidad en simulación de red aislada:

1. Obtener el modelo validado del regulador de velocidad, considerando las conducciones hidráulicas.
2. Obtener los parámetros validados del modelo del generador.
3. Con estos modelos, se simula el generador bajo prueba alimentando una carga de potencia constante y una sola unidad de la planta en servicio, lo cual corresponde a la condición más exigente desde el punto de vista de estabilidad. (Ver figura A2.2).
4. Se debe tener en operación el modelo del regulador de velocidad y conducciones hidráulicas previamente validado.
5. No se debe tener en cuenta el PSS, y se recomienda deshabilitar el AVR.
6. Las condiciones iniciales de la prueba son las siguientes (Ver figura A2.2):
  - Potencia de la carga: 75% de la potencia nominal de la unidad (Pnom.).
  - Tensión en bornes: 1 p.u.
7. Perturbación (Ver figura A2.2):
  - Escalón del -5% de la potencia nominal de la unidad, en la carga
8. Realizar la simulación considerando la perturbación descrita, durante al menos 300 segundos, registrando el comportamiento de la frecuencia del sistema generador - carga.

En la siguiente figura se presenta un ejemplo del sistema de prueba equivalente para una máquina de potencia nominal  $P_{nom.} = 240\text{MW}$ , alimentando una carga de potencia constante. Se describe el evento a simular y se presentan los resultados obtenidos en la frecuencia del sistema, evidenciándose la inestabilidad de la unidad con los ajustes actuales.

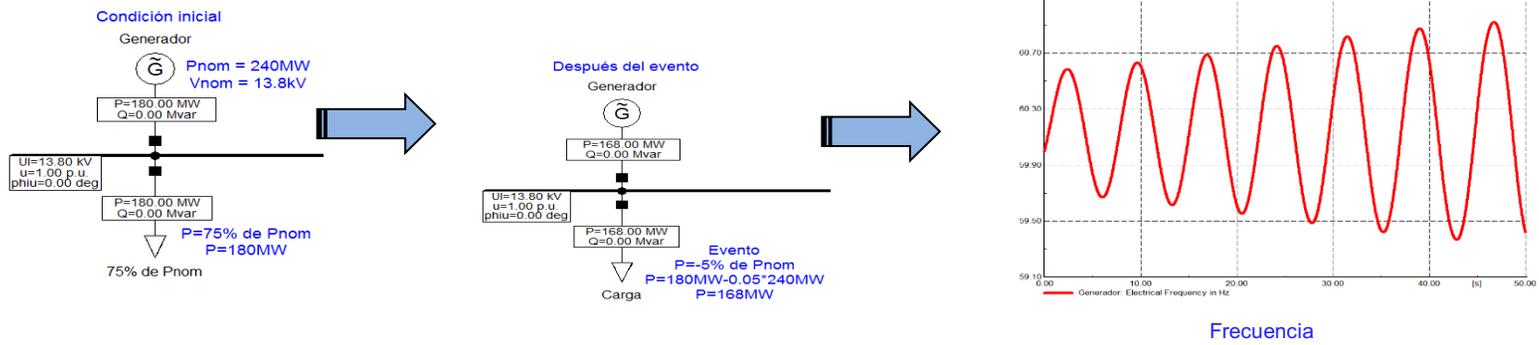


Figura A2.2 Ejemplo de sistema de prueba y definición del evento para simulación de respuesta en red aislada

### **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 generadores deben garantizar que la respuesta real y la simulada, utilizando los modelos validados, sea coherente 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 SOBREPULSO (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

$TRIS$ : 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 diferencia entre el valor final e inicial de 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 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, 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 siguientes tablas, para el sistema de excitación, el PSS y el regulador de velocidad / potencia:

**Tabla A3. 1 Índices de coherencia para el modelo del AVR o esquema de control conjunto**

| Prueba  | Señal             | Índice | Valor de referencia |
|---|-------------------|--------|---------------------|
| 1. Escalón en la tensión de referencia en vacío.<br>2. Escalón en la tensión de referencia en carga sin PSS.<br>3. Evaluación del control conjunto. | $V_T$ o $V_{PCC}$ | ES     | 10%                 |
|   |                   | EVF    | 5%                  |
|   |                   | ETR    | 5%                  |
|   |                   | ETE    | 5%                  |
|   |                   | CCL    | $\geq 0.93$         |
|   |                   | EAMN   | $\leq 10\%$         |
|   | $V_F$ o $I_F$     | CCL    | $\geq 0.93$         |
|   |                   | EAMN   | $\leq 10\%$         |

|   |                              |      |             |
|---|------------------------------|------|-------------|
|   | $Q$                          | ES   | 15%         |
|   |                              | EVF  | 10%         |
|   |                              | ETR  | 5%          |
|   |                              | ETE  | 5%          |
|   |                              | CCL  | $\geq 0.93$ |
|   |                              | EAMN | $\leq 10\%$ |
| <b>4.</b> Registros durante eventos del sistema | $V_T, Q, V_F \text{ o } I_F$ | EC   | $\leq 30\%$ |

**Tabla A3. 2 Índices de coherencia para el modelo del PSS**

| Prueba   | Señal                                    | Índice      | Valor de referencia |
|--|--|-------------|---------------------|
| 1. Escalón en la tensión de referencia en carga con PSS o escalón en la(s) entrada(s) al PSS | $V_T$                                    | ES          | 10%                 |
|  |  | EVF         | 5%                  |
|  |  | ETR         | 5%                  |
|  |  | ETE         | 5%                  |
|  |  | CCL         | $\geq 0.93$         |
|  |  | EAMN        | $\leq 10\%$         |
|  | $Q$                                      | ES          | 15%                 |
|  |  | EVF         | 10%                 |
|  |  | CCL         | $\geq 0.93$         |
|  |  | EAMN        | $\leq 10\%$         |
|  | $P$                                      | CCL         | $\geq 0.93$         |
|  |  | EAMN        | $\leq 10\%$         |
|  | $U_{PSS}^1$                              | CCL         | $\geq 0.93$         |
|  | 2. Registros durante eventos del sistema | $P, V_T, Q$ | EC                  |

**Tabla A3. 3 Índices de coherencia para los modelos de los limitadores del sistema de excitación (CV, OEL, UEL, V/Hz, LPQ, MEL, SCL, RCC, CCC)**

| Prueba | Señal | Índice | Valor de referencia |
|--------|-------|--------|---------------------|
|--------|-------|--------|---------------------|

1

Solo se calcularía este índice para la señal de salida del PSS ( $U_{pss}$ ), en caso de que esta pueda ser medida en campo.

|  |             |      |             |
|--|-------------|------|-------------|
| 3. Escalón de gran señal en la tensión de referencia del AVR para provocar la actuación del limitador. | $V_T$       | EVF  | 5%          |
|  |             | CCL  | $\geq 0.93$ |
|  |             | EAMN | $\leq 10\%$ |
|  | $Q$         | EVF  | 10%         |
|  |             | CCL  | $\geq 0.93$ |
|  |             | EAMN | $\leq 10\%$ |
|  | $U_{LIM}^2$ | CCL  | $\geq 0.93$ |

**Tabla A3. 4 Índices de coherencia para el modelo del regulador de velocidad / potencia**

| Prueba   | Señal | Índice | Valor de referencia |
|--|-------|--------|---------------------|
| 1. Escalón en la potencia o la velocidad de referencia en carga. | $P$   | CCL    | $\geq 0.93$         |
|  |       | EAMN   | $\leq 10\%$         |
|  |       | EVF    | 10%                 |
|  |       | ES     | 15%                 |
|  |       | ETR    | 5%                  |
|  |       | ETE    | 5%                  |
|  | $Y_A$ | CCL    | $\geq 0.93$         |
| 2. Registros durante eventos de frecuencia del sistema           | $P$   | EC     | $\leq 30\%$         |
|  | $Y_A$ |        |                     |

<sup>2</sup> Solo se calcularía este índice para la señal de salida del limitador correspondiente ( $U_{LIM}$ ), en caso de que esta pueda ser medida en campo.

**Tabla A3.5 Índices de coherencia para el seguimiento a la calidad de los modelos**

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

Se considera que un modelo pasa exitosamente la etapa de validación, si todos los índices de coherencia promedio para cada nivel de carga (cuando se haga más de una prueba por nivel de carga), calculados para cada prueba son menores o iguales a los valores de referencia indicados en las tablas A3.1 a A3.4. De lo contrario, el CND informará al Agente sobre los índices incumplidos para que este realice los ajustes necesarios en el modelo. Se permite como tolerancia máxima el error de medición.

Asimismo se considerará que el seguimiento de los modelos es exitoso si se cumple con lo indicado en el numeral Decimosexto del presente Acuerdo y la Tabla A3.5.

## ANEXO 4.

### **Guía de pruebas mínimas para realizar la validación de los modelos de control para los generadores.**

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 generación. Tener en cuenta los siguientes aspectos generales:

- Todas las protecciones y los limitadores del sistema de excitación del generador deben estar en servicio durante cualquier prueba en línea o fuera de línea.
- Para las pruebas relacionadas con el sistema de excitación (AVR, PSSs y limitadores) se deben tomar mínimo 100 muestras por segundo durante al menos 10 segundos después de estabilizadas las señales registradas en la prueba.
- Para las pruebas relacionadas con el regulador de velocidad se deben tomar mínimo 1 muestra por segundo durante al menos 10 segundos después de estabilizadas las señales registradas en la prueba.

#### **1. Validación del modelo del sistema de excitación**

La validación del modelo del sistema de excitación debe hacerse en vacío con el PSS inactivo y para tres niveles de carga del generador (en carga mínima, en carga media y en su potencia activa máxima declarada), en modo control automático, y se deben realizar como mínimo las siguientes pruebas:

- Determinar la respuesta al escalón con la unidad en vacío con el regulador de voltaje en modo de control automático. La prueba debe realizarse tanto en condiciones en las que se exciten todas las dinámicas no lineales del modelo en operación en vacío (CV y V/Hz) como en condiciones en las que no se activen estas no linealidades. Se deben verificar los siguientes requerimientos:
  - 1 El escalón en la referencia del voltaje en terminales debe ser al menos un 2% del voltaje nominal del generador.
  - 2 Se deben almacenar los registros de las variables que de Acuerdo con el Anexo 3 serán utilizadas para la validación.
  - 3 Se deben comparar los registros almacenados del sistema real con la respuesta del modelo. Se debe verificar los índices de coherencia definidos en el Anexo 3 del presente Acuerdo.
  - 4 De acuerdo con las características de la unidad, su sistema de excitación y las restricciones que se tengan, los límites de voltaje de techo (CV) pueden ser alcanzados en campo o calculados mediante extrapolación.
- En caso de que las unidades de la planta operen en un modo de control conjunto, se debe determinar la respuesta al escalón con las unidades que hacen parte de este esquema de control. La prueba debe realizarse tanto en condiciones en las que se exciten todas las dinámicas no lineales del modelo como en condiciones en las que no se activen estas no linealidades. Se deben verificar los siguientes requerimientos:
  - 5 El escalón en la referencia del voltaje en el punto de control debe ser un 2% del voltaje nominal del punto de control.
  - 6 Se deben almacenar los registros de las variables que de Acuerdo con la Tabla A3.1 del Anexo 3 serán utilizadas para la validación.
  - 7 Se deben comparar los registros almacenados del sistema real con la respuesta del modelo. Se debe verificar los índices de coherencia definidos en el Anexo 3 del presente Acuerdo.
  - 8 De acuerdo con las características de la unidad, su sistema de excitación y las restricciones que se tengan, los límites de voltaje de techo (CV) pueden ser alcanzados en campo o calculados mediante extrapolación.
- Determinar la respuesta al escalón con la unidad sincronizada con el regulador de voltaje en modo de control automático 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 (OEL, UEL, RCC, CCC, SCL, LPQ, MEL) como en condiciones en las que no se activen estas no linealidades. Se deben verificar los siguientes requerimientos:
  - 9 Para cada caso se deben aplicar al menos dos escalones en la referencia del voltaje en terminales, uno en sentido positivo y otro en sentido negativo, con una variación no inferior al 2% del voltaje nominal del generador.
  - 10 Se deben almacenar los registros de las variables que de Acuerdo con el Anexo 3 serán utilizadas para la validación.

- 11 Se deben comparar los registros almacenados del sistema real con la respuesta del modelo. Se debe verificar los índices de coherencia definidos en el Anexo 3 del presente Acuerdo.
- Se debe almacenar la respuesta de la unidad a una perturbación del sistema que verifique los siguientes criterios:
  - 12 La perturbación debe originar un cambio repentino en el voltaje del sistema de al menos el 2% del voltaje nominal en barras o un cambio de al menos el 10% de la potencia reactiva respecto a los MVA nominales.
  - 13 Las variables almacenadas incluyen potencia activa y reactiva del generador, voltaje en terminales del generador y voltaje de campo, señal de salida y señal(es) de entrada al estabilizador del sistema de potencia.
  - 14 El regulador del voltaje debe estar en modo de control automático.
  - 15 Los datos almacenados se comparan con los del modelo considerando una perturbación modelada del voltaje del sistema. Se debe verificar los índices de coherencia definidos en el Anexo 3 del presente Acuerdo para la validación del modelo del sistema de excitación utilizando registros.

## 2. Validación del modelo del estabilizador del sistema de potencia

Determinar la respuesta al escalón con la unidad sincronizada con el regulador de voltaje en modo de control automático con el PSS activo y para tres niveles de carga del generador (en carga mínima, en carga media y en su potencia activa máxima declarada). La prueba debe realizarse tanto en condiciones en las que se exciten todas las dinámicas no lineales del modelo (lógicas de actuación, límites de salida) como en condiciones en las que no se activen estas no linealidades. Se deben verificar los siguientes requerimientos:

- 16 Se deben aplicar al menos dos escalones en la referencia del voltaje en terminales en la(s) entrada(s) del PSS, uno en sentido positivo y otro en sentido negativo, con una variación no inferior al 2% del voltaje nominal del generador.
- 17 Se deben almacenar los registros de las variables que de Acuerdo con el Anexo 3 serán utilizadas para la validación. En caso de ser posible se deben enviar adicionalmente la(s) señal(es) de entrada y salida del estabilizador del sistema de potencia.
  - Se recomienda inyectar señales senoidales de frecuencias entre 0.02 Hz y 3 Hz en cada una de las entradas del PSS (para los PSSs tipo IEEE PSS 2A serían las entradas de Potencia y Frecuencia). La prueba debe verificar los siguientes requerimientos:
    - La amplitud y frecuencias máximas o mínimas de las señales a inyectar deben ser seleccionadas de tal forma que no se exciten las dinámicas no lineales del modelo (UPSSMAX, UPSSMIN, LPSS). Se debe almacenar al menos el voltaje en terminales del generador, la potencia activa y reactiva. En caso de ser posible se deben enviar adicionalmente la(s) señal(es) de entrada y salida del estabilizador del sistema de potencia.
    - Los datos almacenados serán comparados con los resultados de la respuesta al barrido de frecuencia simulado. Debe haber coherencia en términos de forma de las curvas, fase, frecuencia y amplitud.

### 3. Validación y modelamiento del regulador de velocidad/potencia, turbina, actuadores y conducciones hidráulicas<sup>3</sup>.

Esta validación debe realizarse con la unidad generando mínimo técnico, un valor intermedio y su valor de potencia nominal declarada. La validación debe realizarse considerando los siguientes métodos:

- Desarrollar una prueba ante al menos dos escalones en la velocidad de referencia (uno en sentido positivo y otro en sentido negativo). Se debe:
  - Realizar la prueba tanto en condiciones en las que se exciten todas las dinámicas no lineales del modelo (YMAX, YMIN, TCL, interacción hidráulica) como en condiciones en las que no se activen estas no linealidades.
  - Realizar pruebas que permitan validar la variación del aporte máximo al modificar el parámetro correspondiente.
- 18 Almacenar los registros de la señal de referencia de velocidad; frecuencia; potencia; apertura de agujas, distribuidor o válvulas y potencia activa del generador.
- 19 Comparar los registros almacenados con los obtenidos con el modelo del regulador de velocidad. Se debe verificar la coherencia entre la forma de la curva, el valor inicial, el tiempo de retardo, el sobreimpulso, el tiempo de establecimiento y el valor final.
- Desarrollar una prueba de rechazo de carga. La prueba debe verificar los siguientes requerimientos<sup>4</sup>:
  - 20 El rechazo de carga no debe superar el 20% de la potencia nominal de la unidad de generación.
  - 21 Almacenar al menos las variables que de Acuerdo con el Anexo 3 serán utilizadas para la validación.
  - 22 Comparar los registros almacenados con los obtenidos con el modelo del regulador de velocidad considerando los índices de coherencia definidos en el Anexo 3 del presente Acuerdo.
- Desarrollar pruebas para verificar los valores de estadismo y banda muerta. En el Acuerdo CNO 1285, o aquel que lo modifique o sustituya, se especifican las pruebas requeridas para esta validación.
- Capturar al menos un registro de eventos en frecuencia en el que la unidad esté en condiciones de potencia activa nominal declarada y al menos un registro con la unidad

---

<sup>3</sup>

La validación del modelo en el que se considere los actuadores hidráulicos y conducciones hidráulicas sólo aplica para los generadores hidráulicos

<sup>4</sup> En caso de no realizarse la prueba de rechazo de carga se pueden utilizar datos provenientes de un evento de rechazo de carga histórico.

operando en una condición asociada a su mínimo técnico o un valor intermedio. En este caso se debe cumplir con los siguientes requerimientos<sup>5</sup>:

23 Los registros deben cubrir al menos 10 minutos con el evento centrado en la ventana de tiempo correspondiente.

24 Se deben almacenar los registros de frecuencia y potencia activa del generador.

25 Comparar los registros almacenados con los obtenidos con el modelo del regulador de velocidad a través del cálculo del índice definido (Ver Anexo 3)

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

En caso de que las pruebas escalón establecidas en esta guía no puedan ser llevadas a cabo por restricciones técnicas de los controles asociados, se acordará entre los Agentes y XM las pruebas de validación necesarias. De ser requerido, el tema será revisado en el Subcomité de Controles.

---

<sup>5</sup> 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.

## BIBLIOGRAFÍA

[1] J. E. Gómez y I.C. Decker. A novel validation methodology using synchrophasor measurements. Elsevier. Electric Power Systems Research. 2014. P. 207 – 217.