

GUÍA TÉCNICA DE APLICACIÓN

Homologación de modelos dinámicos

Gerencia de Operación

Departamento de Estudios de Sistemas Eléctricos

Junio de 2019

Versión 2

CONTROL DEL DOCUMENTO

APROBADO POR

Versión	Aprobado por	Cargo
1	José Miguel Castellanos I.	Jefe Departamento de Estudios Sistemas Eléctricos
2	José Miguel Castellanos I.	Jefe Departamento de Estudios Sistemas Eléctricos

REVISADO POR

Versión	Revisado por	Cargo
1	José Miguel Castellanos I.	Jefe Departamento de Estudios Sistemas Eléctricos
2	José Miguel Castellanos I.	Jefe Departamento de Estudios Sistemas Eléctricos

REALIZADO POR

Versión	Realizado por	Cargo
1	Eugenio Quintana P.	Ingeniero Departamento de Estudios Sistemas Eléctricos.
2	Eugenio Quintana P.	Ingeniero Departamento de Estudios Sistemas Eléctricos.

1 CONTENIDO

1	CONTENIDO.....	3
2	Abreviaturas y Definiciones	5
2.1	Abreviaturas.....	5
2.2	Definiciones	6
3	Introducción.....	10
4	Aspectos Normativos	10
5	Guía de Ensayos.....	11
5.1	Unidades sincrónicas	12
5.1.1	Ensayos al generador	12
5.1.2	Ensayos al sistema de excitación.....	12
5.1.3	Ensayos al control de carga/velocidad	14
5.2	Plantas fotovoltaicas y parques eólicos.....	16
5.2.1	Verificación Diagrama PQ	16
5.2.2	Ensayos al control de potencia activa	16
5.2.3	Ensayos al control de potencia reactiva / tensión	17
5.2.4	Otros	17
5.3	Equipos de compensación de Energía Reactiva.....	19
5.3.1	Verificación de la curva V-Q	19
5.3.2	Ensayos al control de potencia reactiva / tensión	19
5.3.3	Transitorios ante perturbaciones en la red	19
5.4	Equipos de compensación de Energía Activa.....	20
5.4.1	Ensayos al control de potencia activa / frecuencia	20

6	Requisitos del proceso de Homologación de modelos Dinámicos	21
6.1	Ensayos	21
6.2	Implementación del Modelo Dinámico	22
6.2.1	Modelación.....	22
6.2.2	Implementación.....	23
6.2.3	Desempeño.....	24
7	Entregables del proceso de Homologación de modelos Dinámicos.....	26
7.1	Informe.....	26
7.1.1	Ejecución de ensayos	26
7.1.2	Desarrollo de modelos matemáticos	27
7.1.3	Homologación de los modelos dinámicos.....	28
7.1.4	Análisis de los modelos dinámicos	29
7.2	Bases de datos	30
7.2.1	Base de datos de prueba	30
7.2.2	Base de datos del SEN	31
7.3	Registros de Ensayos	31
8	Bibliografía	32

2 ABREVIATURAS Y DEFINICIONES

2.1 ABREVIATURAS

AVR:	Automatic Voltage Control (o RAT: Regulador automático de tensión)
BESS:	Battery Energy Storage System
HFRT:	High Frequency Ride Through
HVRT:	High Voltage Ride Through
HRSG:	Heat Recovery Steam Generator (Generador de vapor con recuperación de calor)
LVRT:	Low Voltage Ride Through
NTSyCS:	Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio
OEL:	Over Excitation Limiter (Limitador de sobre-excitación)
PSS:	Power System Stibilizer (Estabilizador de sistemas de potencia)
SCL:	Stator Current Limiter (Limitador de corriente de estator)
SEN:	Sistema Eléctrico Nacional
SI:	Sistema Interconectado
SoC:	State of Charge (Estado de carga)
SSCC:	Servicios Complementarios (de acuerdo con Res. Ext. CNE N°801 de 2018)
ST:	Sistema de Transmisión
STATCOM:	Static Synchronous Compensator
SVC:	Static Var Compensator (o CER: Compensador Estático de Reactivos)
UEL:	Under Excitation Limiter (Limitador de sub-excitación)
VHz:	Volts per Hertz Limiter (Limitador de sobreflujo magnético)

2.2 DEFINICIONES

Carga baja: Despacho de la unidad generadora a mínimo técnico, con dos excepciones:

- Para el ensayo al control de carga/velocidad o frecuencia/potencia se debe dejar un margen suficiente para que la respuesta del lazo no esté limitada por la mínima generación de la unidad.
- Para el caso de unidades de generación cuya fuente primaria de energía sea variable, y sus controles puedan funcionar sin la disponibilidad del recurso primario, se debe adicionar este estado de carga para la realización de los ensayos.

Carga media: Despacho de la unidad generadora en un valor intermedio entre el mínimo técnico y la potencia máxima.

Carga alta: Despacho de la unidad generadora entre un 90% y 100% de la potencia máxima, con dos excepciones:

- Para el ensayo al control de carga/velocidad o frecuencia/potencia se debe dejar un margen suficiente para que la respuesta del lazo no esté limitada por la máxima generación de la unidad.
- Para el caso de unidades de generación cuya fuente primaria de energía sea variable, se debe buscar en el pronóstico de la semana dentro del periodo de la puesta en servicio en la cual se harán los ensayos, el día y hora de mayor disponibilidad del recurso.

Controlador de Carga/Velocidad: En el caso de una unidad generadora sincrónica es el dispositivo que permite el control de la potencia mecánica y/o velocidad de la unidad detectando desviaciones de la frecuencia y potencia eléctricas con respecto a valores de referencia, actuando directamente sobre el sistema de mando de la máquina motriz. Para una repartición estable de la potencia de unidades que operan en sincronismo, los controladores de carga/velocidad tienen una característica tal que la potencia aumenta cuando disminuye la frecuencia.

Controlador de Frecuencia/Potencia: En el caso de un parque eólico, fotovoltaico, o Equipo de Compensación de Energía Activa, corresponde al dispositivo que permite variar la generación de la instalación en función de la frecuencia en su Punto de Conexión al ST, detectando las desviaciones de frecuencia con respecto a un valor de referencia y actuando sobre el sistema de control de la potencia generada.

Controlador de Tensión: En el caso de una unidad generadora sincrónica, es el dispositivo que permite el control de la tensión en los terminales de la unidad o en un nudo remoto, detectando las desviaciones de la tensión con respecto a un valor de referencia y actuando sobre el control de la excitatriz para modificar la corriente del campo rotatorio.

En el caso de un parque eólico o fotovoltaico, corresponde al dispositivo que permite el control de la tensión en el Punto de Conexión del parque al ST, detectando las desviaciones de la tensión con respecto a un valor de referencia y actuando sobre sus equipos de generación o sobre equipos de suministro de potencia reactiva dispuestos para esos fines.

Coordinador: Coordinador Independiente del Sistema Eléctrico Nacional al que se refiere el Título VI BIS de la Ley.

Diagrama PQ: En el caso de una unidad generadora sincrónica, es el diagrama en el que se representa en un plano P - Q la zona de operación admisible de la unidad para el rango permitido de tensiones en bornes, y considerando las restricciones de potencia motriz.

En el caso de parques eólicos o fotovoltaicos, es el diagrama en el que se representa en un plano P - Q la zona de operación admisible del parque en su conjunto, incluida la compensación reactiva disponible, medido en el Punto de Conexión al ST para tensión nominal y en condiciones permanentes.

Equipo de Compensación de Energía Activa: Equipo electrónico de potencia capaz de inyectar potencia activa a la red en forma rápida y sostenerla durante un tiempo prefijado, dentro de todos los rangos aceptables de frecuencia y tensión de un SI, ante variaciones de la frecuencia.

Equipo de Compensación de Energía Reactiva: Equipo electrónico de potencia capaz de inyectar o absorber potencia reactiva hacia o desde la red en forma rápida y sostenerla en forma permanente, dentro de todos los rangos aceptables de frecuencia y tensión de un SI, ante variaciones de la tensión.

Estatismo: es el cociente entre el cambio de frecuencia eléctrica en el sistema y el cambio de potencia activa relativo que este provoca en la central generadora. En el caso del control de tensión es el cociente entre el cambio de tensión en el punto de conexión y el cambio de potencia reactiva relativo que este provoca en la central generadora.

Factor de amortiguamiento: factor que mide el amortiguamiento de las oscilaciones de potencia activa, a través de los máximos correspondientes a dos semiciclos consecutivos de igual signo, ya sea positivo o negativo, designados como A1 y A2 respectivamente, mediante la siguiente fórmula:

$$\zeta = -\frac{\log R_A}{2\pi\sqrt{\left(1 + \frac{(\log R_A)^2}{4\pi^2}\right)}}$$

Donde $R_A = \frac{A_2}{A_1}$.

Mínimo Técnico: potencia activa bruta mínima con la cual una unidad puede operar en forma permanente, segura y estable inyectando energía al SI en forma continua.

Potencia Máxima: máximo valor de potencia activa bruta que puede sostener una unidad generadora, en un período mínimo de 5 horas continuas, en los bornes de salida del generador para cada una de las modalidades de operación.

Print out: copia digital o captura de pantalla obtenida directamente desde el dispositivo de control o protecciones con los ajustes y parametrización de este.

Punto de Conexión: barra, o punto de arranque en una línea de transmisión, en el cual se interconectan instalaciones. El Punto de Conexión de una central generadora al ST corresponde a la barra de alta tensión de sus transformadores de poder.

Sobreoscilación: diferencia del máximo valor de la respuesta al escalón y el valor de régimen estacionario relativa al valor del escalón aplicado (en %).

Tasa de toma y bajada de carga: cociente entre el cambio de potencia activa entre el 10 y el 90 % del escalón solicitado y el tiempo transcurrido entre esos eventos.

Tiempo de crecimiento: es el intervalo de tiempo que demora una variable para pasar del 10% al 90% de su valor final.

Tiempo de establecimiento: es aquel donde la variable se encuentra dentro de una banda de $\pm 5\%$ en torno a su valor final o de régimen en el caso de control de tensión y dentro de una banda de $\pm 10\%$ en torno a su valor final o de régimen en el caso de control de frecuencia.

Tiempo de retardo: tiempo que transcurre desde que se emite la señal de control hasta que la unidad generadora o equipo de compensación reacciona.

Unidad Generadora: equipo generador eléctrico que posee equipos de accionamiento propios, sin elementos en común con otros equipos generadores.

3 INTRODUCCIÓN

El objetivo de esta guía es especificar los requerimientos de completitud y calidad de los modelos dinámicos de las instalaciones que se interconecten al SEN, con el fin de que el Coordinador disponga de una base de datos con modelos dinámicos matemáticamente estables y representativos del comportamiento de las unidades generadoras y los equipos de compensación de energía activa y reactiva para los estudios de programación de la seguridad y la calidad del servicio.

Por lo anterior, estos modelos deberán ser aptos para realizar análisis de flujos de carga, transitorios electromecánicos de sistemas de potencia y análisis modales, en cualquier condición de operación factible de las instalaciones en estudio y del SEN. En caso de que el Coordinador, en el cumplimiento de sus funciones, requiera realizar análisis con mayor profundidad o de otro tipo de fenómenos, se solicitarán modelos cuyos requerimientos de información y modelación específicos serán los que permitan cumplir con los objetivos de tales análisis.

Los temas administrativos asociados al proceso de validación de modelos dinámicos y los requisitos mínimos de diseños para las instalaciones de generación se abordan en la NTSyCS y sus respectivos Anexos Técnicos.

4 ASPECTOS NORMATIVOS

Según lo dispuesto en el artículo 72-8 de la Ley General de Servicios Eléctricos, el Coordinador Eléctrico Nacional es el responsable de verificar la completitud, calidad, exactitud y oportunidad de la información publicada en los respectivos sistemas de información, entre ellos, la información técnica de las empresas Coordinadas.

Parte de esta información técnica son los modelos dinámicos de las instalaciones que se interconectan al SEN, cuyo alcance se encuentra definido en los Títulos 6-2 y 6-3 de la NTSyCS, en particular en el Artículo 6-22, y en los Anexos Técnicos de “Requisitos Técnicos Mínimos de Instalaciones que se Interconectan al SI” e “Información Técnica de Instalaciones y Equipamiento”.

Para las nuevas instalaciones, el Artículo 9-14 de la NTSyCS establece que la entrega de sus modelos dinámicos validados con ensayos son requisito para su entrada en operación.

5 GUÍA DE ENSAYOS

A continuación, se presenta una guía de ensayos genérica basada en el documento [1] para la realización de las pruebas necesarias para obtener los modelos dinámicos homologados de los siguientes tipos de instalaciones que se interconectan al SI:

1. Unidades generadoras sincrónicas (hidráulicas y térmicas)
2. Unidades generadoras asincrónicas (parques fotovoltaicos y eólicos)
3. Equipos de compensación de energía reactiva (SVC y STATCOM)
4. Equipos de compensación de energía activa (BESS).

El procedimiento concreto para realizar los ensayos en cada instalación dependerá de las características de esta y se detallará en los protocolos específicos que se presenten al Coordinador. Es conveniente indicar que los ensayos deberán realizarse cuando la instalación esté completamente en servicio y sus sistemas de control se encuentren con los ajustes definitivos.

La coordinación de los ensayos es a través de solicitudes de trabajo de curso normal, donde se especificarán que las pruebas se relacionan con los ensayos asociados al proceso de homologación de modelos dinámicos. Además, se indicará el perfil horario de potencia activa y reactiva y las condiciones de operación sistémicas o maniobras operativas en instalaciones aledañas que sean necesarias para su correcta ejecución.

Durante la ejecución de los ensayos es recomendable que se cuente con la participación del fabricante de los sistemas de control para apoyar al consultor y eventualmente, solucionar de forma inmediata cualquier problema que pueda surgir.

En el caso de ensayos que no se puedan realizar o no puedan hacerlo acorde con lo requerido en esta guía, se debe presentar la justificación correspondiente, junto con las medidas alternativas tomadas para poder cumplir con el objetivo de la prueba. En estas circunstancias, de ser conveniente, se pueden utilizar registros de la operación real, especialmente de perturbaciones que permitan validar el comportamiento de la planta, siempre y cuando los equipos registradores utilizados tengan la resolución suficiente de acuerdo con lo indicado en el numeral 6.1.

5.1 UNIDADES SINCRÓNICAS

Los ensayos que se detallan en esta sección tienen por finalidad calcular los parámetros del generador sincrónico y de los sistemas de control (sistema de excitación, estabilizador de sistema de potencia y control de carga/velocidad) para homologar un modelo matemático del que represente el comportamiento dinámico de la central generadora.

5.1.1 Ensayos al generador

5.1.1.1 Verificación de la curva de saturación

Con el generador operando en vacío a velocidad nominal, se registran la tensión en bornes del generador (U), tensión de excitación (EFD) y la corriente de excitación (IFD) a medida que se varía la consigna de esta última.

5.1.1.2 Verificación de los puntos de operación

Con el generador operando sincronizado a la red, se registran los valores de tensión en bornes del generador (U), potencia activa (P) y reactiva (Q), variándose la consigna de tensión (U) / potencia reactiva (Q).

5.1.1.3 Determinación de la constante de inercia del conjunto turbina-generador (H)

Se realiza mediante un rechazo de carga del 30% de la potencia nominal de la unidad. Se registra la tensión en bornes del generador (U), la potencia activa (P), la potencia reactiva (Q) y la frecuencia (f) o velocidad de giro (n).

5.1.2 Ensayos al sistema de excitación

Se registran los valores de la tensión en bornes del generador (U), la corriente de excitación (IFD) y la tensión de excitación (EFD).

5.1.2.1 Techos de excitación

Con el generador operando en vacío a velocidad nominal, se registran las variables medidas variando la consigna de la referencia de tensión (VREF).

5.1.2.2 Respuesta temporal del AVR

Con el generador operando en vacío a velocidad nominal, se verifican los parámetros de desempeño del AVR, registrando las variables medidas al aplicarle una variación tipo “escalón” a la consigna de la referencia de tensión (VREF). Se repite el mismo ensayo con el generador operando sincronizado a la red.

5.1.2.3 Limitadores

Para no llevar el funcionamiento del generador a condiciones extremas, se modifican momentáneamente los ajustes de los limitadores para corroborar el correcto desempeño de:

- **Limitador de flujo magnético (V/Hz):** ensayo con la unidad en vacío con la tensión y la velocidad en sus valores nominales tal que ante la aplicación de un escalón positivo en la referencia del regulador se excite el limitador.
- **Limitador de sobreexcitación (OEL):** ensayo con la unidad operando sincronizado a la red en condiciones de despacho de potencia activa y reactiva tal que ante la aplicación de un escalón positivo en la referencia del regulador se excite el limitador.
- **Limitador de subexcitación (UEL):** ensayo con la unidad operando sincronizado a la red en condiciones de despacho de potencia activa y reactiva tal que ante la aplicación de un escalón negativo en la referencia del regulador se excite el limitador.
- **Limitador de corriente de estator (IGLIM):** ensayo con la unidad operando sincronizado a la red en condiciones de despacho de potencia activa y reactiva tal que ante la aplicación de un escalón positivo/negativo en la referencia del regulador se excite el limitador.
- **Limitador de corriente de excitación (IFLIM):** ensayo con la unidad en vacío con la tensión y la velocidad en sus valores nominales tal que ante la aplicación de un escalón positivo en la referencia del regulador se excite el limitador.

5.1.2.4 PSS

- **Ensayo de Oscilación Modo local:** con la unidad despachada a carga alta y diferentes niveles de potencia reactiva, con y sin el PSS en servicio para verificar su contribución al amortiguamiento, se aplica un escalón entre el 2% y 5% a la consigna de la referencia de tensión (VREF) que permita excitar de modo apreciable el modo local de oscilación. Se

registra la tensión en bornes del generador (U), la potencia activa (P), la potencia reactiva (Q) y la frecuencia (f).

- **Ganancia Máxima del PSS:** con la unidad despachada a carga alta se aumenta progresivamente la ganancia hasta observar inestabilidad en las variables eléctricas de la unidad generadora. Luego se restablece el valor original.
- **Reducción rápida de la potencia mecánica:** con la unidad despachada a carga alta, se reduce la consigna de potencia activa, con el estabilizador conectado y desconectado respectivamente, para verificar el filtro rastreador de rampa.

5.1.3 Ensayos al control de carga/velocidad

- **Ensayos de respuesta temporal:** Se determina el tiempo de establecimiento con la unidad en vacío con la tensión y la velocidad en sus valores nominales. Se registra la velocidad de giro (n). Se repite el ensayo con la unidad operando sincronizada a la red y niveles de carga bajo, medio y alto, inyectando un escalón en la referencia de frecuencia de al menos ± 200 mHz. Se registra la tensión en bornes del generador (U), la potencia activa (P), la potencia reactiva (Q) y la frecuencia (F). En el caso de las unidades con turbina a vapor o gas, se debe registrar la potencia durante el tiempo máximo en el que se puede sostener el aporte de potencia activa. No obstante, para la homologación del modelo serán suficientes los registros de potencia para un minuto.
- **Operación de la unidad en control de frecuencia:** con la unidad operando sincronizada a la red en modo control de frecuencia y para niveles de carga baja, media y alta, se obtienen los registros para la medición de la banda muerta y el estatismo del control de carga/velocidad. Se registra la tensión en bornes del generador (U), la potencia activa (P), la potencia reactiva (Q) y la frecuencia (f).
- **Determinación la tasa de toma y bajada de carga:** Con la unidad operando sincronizada a la red se aumenta/reduce la potencia generada del grupo a la máxima velocidad permitida por sus controles. Se registra la posición de válvulas y potencia generada por la unidad para determinar el gradiente MW/minutos de toma de carga de la unidad.

5.1.3.1 Centrales hidroeléctricas

- **Determinación de la constante de tiempo del agua o de la tubería (T_w):** El parámetro puede estimarse mediante su cálculo directo en función de la geometría de la presa/tuberías. Para su determinación experimental, se produce un escalón en la referencia de la apertura del distribuidor y se registra la potencia suministrada por las unidades, evidenciándose el efecto de respuesta transitoria inversa.

5.1.3.2 Centrales térmicas

- **Verificación de la operación de los limitadores de potencia:** Estando la unidad operando sincronizada a la red se aumenta/reduce la potencia generada del grupo a la máxima velocidad permitida por sus controles. De esta manera se busca activar la operación de los limitadores de potencia por control de presión de vapor vivo (en el caso de turbinas a vapor) o por control de temperatura, admisión de aire (IGV) (en el caso de turbinas a gas).

5.2 PLANTAS FOTOVOLTAICAS Y PARQUES EÓLICOS

Los ensayos que se detallan en esta sección tienen por finalidad homologar la respuesta de los sistemas de control implementados en las centrales generadoras eólicas y fotovoltaicas en un modelo matemático equivalente que represente el comportamiento dinámico de estas.

5.2.1 Verificación Diagrama PQ

Se varía el punto de operación del parque fotovoltaico o eólico para la verificación del cumplimiento de la capacidad de absorción e inyección de potencia activa/reactiva en régimen permanente en el Punto de Conexión al ST en todo el rango exigido por la NT. Se registra la tensión (U), la potencia activa (P), la potencia reactiva (Q) y la frecuencia (F).

5.2.2 Ensayos al control de potencia activa

Estos ensayos permiten verificar la capacidad de la central fotovoltaica o eólica para aumentar o reducir la potencia activa en forma controlada. Estos son los siguientes:

- **Medición de tasa de toma y bajada de carga:** operando la central con carga reducida, se cambia la consigna de potencia activa en el sistema de control para evaluar su tasa en [MW/min]. Se registra la tensión (U), la potencia activa (P), la potencia reactiva (Q) y la frecuencia (F) en el Punto de Conexión al ST.
- **Reducción controlada de potencia (o evaluación del HFRT):** operando la central con carga normal se debe inyectar una señal de escalón de frecuencia que permita verificar las frecuencias de activación y desactivación del control, las limitaciones de rampa y los tiempos de retardo, crecimientos y establecimientos correspondientes. Se registra la tensión (U), la potencia activa (P), la potencia reactiva (Q) y la frecuencia (F) en el Punto de Conexión al ST o en bornes de los inversores/aerogeneradores en el caso de que este control esté implementado a nivel local de estos equipos.
- **Ensayos de respuesta temporal de la planta operando en control de frecuencia (con estatismo):** En caso de que la planta disponga de control de frecuencia/potencia con estatismo, se realiza este ensayo mediante la inyección de una señal de escalón de frecuencia para la medición del tiempo de retardo, crecimiento y establecimiento. Se registra

la tensión (U), la potencia activa (P), la potencia reactiva (Q) y la frecuencia (f) en el Punto de Conexión al ST.

- **Operación de la unidad en control de frecuencia (con estatismo):** En caso de que la planta disponga de control de frecuencia/potencia con estatismo, con la planta operando en modo control de frecuencia y para niveles de carga baja, media y alta, se obtienen los registros para la medición de la banda muerta y el estatismo del control de frecuencia/potencia. Se registra la tensión (U), la potencia activa (P), la potencia reactiva (Q) y la frecuencia (f) en el Punto de Conexión al ST.

5.2.3 Ensayos al control de potencia reactiva / tensión

Estos ensayos permiten verificar el desempeño del control de reactivos de la central generadora para distintas condiciones de disponibilidad del recurso primario, considerando al menos, condiciones de carga baja, media y alta. Estos consisten en lo siguiente:

- Aplicar en el control central de la planta un escalón del $\pm 3\%$ en la consigna de tensión, un escalón de $\pm 10\%$ Pn en la consigna de potencia reactiva y un escalón en la consigna de factor de potencia que produzca una variación del $\pm 10\%$ Pn en la potencia reactiva, con la central generadora operando con suficiente margen de potencia reactiva. Se registra la tensión (U), la potencia activa (P) y la potencia reactiva (Q) en el Punto de Conexión al ST.
- Aplicar en al menos uno de los inversores o aerogeneradores más cercanos y en uno de los más lejanos a la subestación elevadora un escalón del $\pm 3\%$ en la consigna de tensión, un escalón de $\pm 10\%$ Pn en la consigna de potencia reactiva y un escalón en la consigna de factor de potencia que produzca una variación del $\pm 10\%$ Pn en la potencia reactiva. Se registra la tensión (U), la potencia activa (P) y la potencia reactiva (Q), tanto en bornes del inversor o aerogenerador como en el Punto de Conexión al ST.

5.2.4 Otros

En el caso de que no se pudiera efectuar algún ensayo al control de reactivos, se podrá medir el desempeño de la central ante eventos de maniobra o perturbaciones en la red eléctrica, como los siguientes:

- Maniobras de conexión/desconexión de convertidores o ramas colectoras.
- Desconexión de un banco de capacitores shunt instalados en la red o de propiedad del Generador (cuando aplique).
- Respuesta frente a variaciones de la tensión de red ante maniobras operativas.

5.3 EQUIPOS DE COMPENSACIÓN DE ENERGÍA REACTIVA

Los ensayos que se detallan en esta sección tienen por finalidad obtener un modelo homologado del sistema de control de los equipos de compensación reactiva como los CER, SVC, STATCOM, etc. que represente el comportamiento dinámico de estos.

5.3.1 Verificación de la curva V-Q

Se varía el punto de operación del compensador estático para la verificación del cumplimiento de la capacidad de absorción e inyección de potencia reactiva en régimen permanente en función de la tensión en el punto de conexión del compensador con la red de transmisión. Se registra la potencia reactiva (Q) y la tensión (U) en el punto de interconexión al ST.

5.3.2 Ensayos al control de potencia reactiva / tensión

Se verifican los parámetros de desempeño del control de tensión mediante un ensayo en el que se aplica un cambio en la consigna de tensión y/o potencia reactiva con la unidad operando con suficiente margen de potencia reactiva. Se registra la potencia reactiva (Q) y la tensión (U) en el punto de interconexión al ST.

5.3.3 Transitorios ante perturbaciones en la red

Se registrará el desempeño de la unidad ante eventos de maniobra o perturbaciones en la red eléctrica, como ser:

- Escalones de tensión en la referencia del control de tensión de instalaciones aledañas.
- Desconexión de un banco de capacitores shunt instalados en la red.
- Respuesta frente a variaciones de la tensión de red ante maniobras operativas.

5.4 EQUIPOS DE COMPENSACIÓN DE ENERGÍA ACTIVA

Los ensayos que se detallan en esta sección tienen por finalidad obtener un modelo homologado del sistema de control de los equipos de compensación de energía activa, como los BESS, que represente el comportamiento dinámico de estos.

5.4.1 Ensayos al control de potencia activa / frecuencia

Los ensayos para la verificación del desempeño y validación del modelo del control de frecuencia/potencia presentan los siguientes requerimientos:

- **Ensayos al control de frecuencia:** operando el BESS con carga nula se inyecta una señal de escalón de frecuencia, tanto positiva como negativa, para la medición de la frecuencia de activación y desactivación y el estatismo permanente. Se registra la potencia activa (P), la potencia reactiva (Q) y la frecuencia (f) en el punto de interconexión al ST.
- **Ensayos al control de potencia:** operando el BESS con carga nula, se cambia la consigna de potencia activa en el sistema de control para evaluar su tasa en [MW/min]. Se registra la potencia activa (P), la potencia reactiva (Q) y la frecuencia (f) en el Punto de Conexión al ST.
- **Ensayo de carga y descarga:** operando el BESS con un nivel de carga máxima y con un SoC cercano al 100% se deja conectado a la red hasta que se comienza a descargar y llega a un SoC de 0%. Una vez descargado, se carga el BESS hasta que llega a un SoC del 100%. Se registra la potencia activa (P), la potencia reactiva (Q) y la frecuencia (f) en el punto de interconexión al ST.

6 REQUISITOS DEL PROCESO DE HOMOLOGACIÓN DE MODELOS DINÁMICOS

El proceso de homologación de modelos dinámicos considera las siguientes tres etapas:

- Ejecución de los ensayos propuestos en el protocolo específico.
- Desarrollo de modelos matemáticos basados en la documentación de respaldo o en supuestos debidamente justificados.
- Implementación de estos modelos en el software DIgSILENT PowerFactory.

A continuación, se detallan los requisitos de cada uno de los aspectos indicados.

6.1 ENSAYOS

Con respecto a la ejecución de los ensayos, se requiere lo siguiente:

- Los ensayos deben considerar al menos los descritos en la Guía de Ensayos especificada en el capítulo 5 y cualquier otro ensayo necesario para validar la representatividad de los modelos dinámicos.
- Equipamiento utilizado para el registro de los ensayos. Este debe ser capaz de lo siguiente:
 - Registrar las variables eléctricas y señales de control asociadas a la tensión (U), la potencia activa (P), la potencia reactiva (Q) y frecuencia eléctrica (f). Para los ensayos al sistema de excitación de las unidades sincrónicas se deben agregar la tensión de excitación (EFD), corriente de excitación (IFD) y señal de control del PSS y los limitadores. Para los ensayos al control de carga/velocidad de las unidades sincrónicas se debe agregar la velocidad de la turbina (n), y dependiendo de la tecnología se recomienda agregar caudal, posición del distribuidor, presión de la tubería, apertura o posición de válvulas, temperatura y presión ambiente o temperatura y presión del vapor, otros.
 - Para el registro de la respuesta dinámica de los inversores o aerogeneradores o del sistema de excitación del generador sincrónico se requiere de una frecuencia de muestro de al menos 100 muestras por segundo, mientras que el registro de la respuesta dinámica del control centralizado de una planta o del control de frecuencia /potencia o carga/velocidad de una unidad generadora sincrónica requiere de una frecuencia de muestro acorde con las constantes de tiempos asociadas a sus controladores.

- Para los ensayos cuyo fin es calcular parámetros o construir curvas de régimen permanente (diagrama P-Q, curva f-P, curva V-I, etc.), se puede usar una frecuencia de muestreo de una muestra por segundo.
- Poseer una resolución mayor a 12 bits.
- En los casos en los que los sistemas de control sean de tecnología digital, se podrán utilizar los registros tomados directamente desde este, siempre y cuando se verifique que la frecuencia de muestreo y la resolución con que se almacenan los valores estén de acuerdo con lo indicado en este ítem.
- Para el caso de las instalaciones basadas en tecnologías de inversores, la validación de las lógicas de LVRT y HVRT se podrá realizar adjuntando los ensayos de fábrica para huecos de tensión balanceados y desbalanceados, en donde se deben mostrar claramente los valores de tensión, potencia y corriente activa¹ y reactiva, y tiempos de desconexión de los inversores/aerogeneradores. Además, se solicita la entrega de los Print out con los ajustes de LVRT, HVRT, HFRT y protecciones de tensión y frecuencia de los inversores/aerogeneradores instalados.

6.2 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DINÁMICO

El modelo dinámico de la instalación en estudio tiene que ser acorde a las mejores prácticas y al estado del arte en la materia. A continuación, se presentan los requerimientos mínimos con respecto al alcance de la modelación, la implementación y el rendimiento de los modelos dinámicos entregados al Coordinador.

6.2.1 Modelación

La modelación deberá considerar al menos:

- Transformador elevador AT/MT, indicando el tipo de cambiador de posiciones, el rango de posiciones disponibles y la posición de operación vigente.
- Dependiendo de la tecnología: generador sincrónico, equipo de compensación, equivalente eléctrico del conjunto de inversores/aerogeneradores/motores y su red de MT interna.

¹ Es de particular interés conocer la recuperación de la potencia activa después de despejada una falla.

- Dependiendo de la tecnología: Control de tensión, potencia reactiva y/o factor de potencia en bornes del generador o en el Punto de Conexión.
- Dependiendo de la tecnología: Control de carga/velocidad o frecuencia/potencia.
- Protecciones eléctricas que puedan operar ante perturbaciones en el SI, como por ejemplo las de frecuencia, sobre velocidad, tensión, sistema de excitación, etc.

Para el caso de tecnologías basadas en inversores se debe considerar las lógicas de LVRT y HVRT. Para el caso de los aerogeneradores se debe considerar el modelo de la turbina, el control de torque, control de la resistencia del rotor, el control de pitch, y el control de inercia sintética, cuando aplique.

Para el caso de las unidades hidráulicas debe considerarse el efecto de acoplamiento hidráulico de unidades de una misma planta.

Para el caso de ciclos combinados se debe modelar y calcular los parámetros del HRSG.

Cabe destacar que de acuerdo con el Art. 6-24 de la NTSyCS, los modelos matemáticos deben ser publicados en un formato tal que cualquier usuario pueda modelarlo en una herramienta distinta a la empleada por el Coordinador, por lo que estos no deben estar encriptados. En caso de no contar con un modelo abierto provisto por el fabricante, se pueden utilizar modelos dinámicos genéricos (indicando claramente su procedencia), los que pueden ser adaptados en caso de ser necesario.

6.2.2 Implementación

La implementación del modelo dinámico debe realizarse en el software DlgSILENT PowerFactory en la misma versión en la que está publicada la base de datos del SEN en la web del Coordinador y deberá considerar al menos lo siguiente:

- El modelo dinámico debe ser autocontenido, por lo que no deben existir referencias a ni la necesidad de usar bases de datos o archivos externos.
- Cada controlador, limitador o componente es modelado en un slot independiente y se engloban en un marco (*frame*).
- En los slots se debe usar el filtro para los nombres de clase (“Filter for ->Class Name”).
- Las entradas y salidas de los slots deben estar en por unidad y se debe priorizar el uso de las señales provenientes desde el elemento principal, salvo que exista un control de subestación que utilice medidas desde otro punto.

- Las funciones matemáticas utilizadas en los bloques permiten evaluar las constantes de tiempo (u otras) solo en la condición inicial (*selfix*, *limfix*, etc.) y aseguran la convergencia numérica del modelo dinámico para distintas condiciones operativas y distintos eventos de simulación.
- La representación gráfica de los modelos debe ser prolija. Esto implica que, por ejemplo, los diagramas no deben contener puntos o líneas sueltas y slots no utilizados; la ubicación, orientación y conexión de los bloques sean adecuados, entre otros.
- La nomenclatura de parámetros en la información de fabricante y en los modelos implementados debe mantener en la medida de lo posible una correspondencia clara.
- La estructura de la base de datos es la sugerida por DigSILENT en su documentación y todos los bloques utilizados en la construcción del modelo se deben encontrar en una sola librería cuyo nombre sea el oficial la unidad, eliminando los que no son usados.
- Los nombres de los elementos de red y los modelos dinámicos deben ser consistentes con los informados en los formularios de información técnica presentados al Coordinador y con los nombres utilizados en la base de datos del SEN.
- El generador sincrónico (ElmSym) o estático (ElmGenstat) debe tener incorporados los límites de potencia activa y reactiva de régimen permanente de la instalación.
- En caso de existir un controlador de planta o subestación (ElmStactrl), este debe poseer los puntos de control, los valores de referencia y el estatismo (y la base con el que se calcula).
- Para el caso de parques que posean más de un transformador elevador y un control conjunto para toda la planta, el modelo debe funcionar adecuadamente considerando que uno de los bloques de transformación está fuera de servicio.

6.2.3 Desempeño

El desempeño del modelo dinámico debe ser tal que se cumpla lo siguiente:

- La inicialización del modelo para distintas condiciones operativas dentro de los límites establecidos en la modelación estática del elemento no arroja advertencias ni errores.

- El modelo debe funcionar de manera óptima para pasos de integración de 2 ms. Se deberán justificar técnicamente los casos que requieran pasos de integración menores a este, pero en caso de que se pueda, se recomienda simplificar los procesos que requieran de constantes de tiempo menores a 2 ms.
- Una simulación de hasta 5 minutos y sin eventos no provoca movimientos de variables eléctricas más allá de la tolerancia propia del software.
- En régimen permanente, el error entre lo simulado y los registros de ensayos de la potencia activa y reactiva no puede ser más allá del 2% con respecto al valor de régimen permanente. Para el periodo entre el inicio del ensayo y el régimen permanente, se debe calcular la suma normalizada de los errores cuadráticos.
- Durante la simulación del periodo transitorio y la recuperación dinámica del sistema eléctrico ante una perturbación originada por una contingencia simple, el modelo no debe arrojar mensajes de advertencias ni de errores de convergencia, salvo en el caso de que se desconecte parte o la totalidad de la instalación principal, en donde se debe indicar mediante un mensaje la protección (frecuencia, voltaje, sobre velocidad, etc.) que provocó el desenganche.

7 ENTREGABLES DEL PROCESO DE HOMOLOGACIÓN DE MODELOS DINÁMICOS

Como resultado del proceso de homologación de modelos dinámicos, se debe entregar al Coordinador lo siguiente:

1. Un informe de homologación de modelos dinámicos.
2. Los registros de los ensayos realizados.
3. Una base de datos de prueba solo con el modelo dinámico de la instalación en estudio.
4. La base de datos del SEN con el modelo de la instalación en estudio incluido.

A continuación, se detalla el contenido de cada uno de los entregables indicados.

7.1 INFORME

El informe de homologación de modelos dinámicos se presenta en formato PDF y debe abordar al menos los tres aspectos principales de este proceso: ejecución de ensayos, desarrollo de modelos matemáticos y la homologación de estos modelos dinámicos.

El informe debe partir con una descripción general de la instalación y de su ubicación dentro del SEN. Además, se deben indicar el tipo de máquina² o equipo de compensación³ y las principales características técnicas (potencia nominal aparente, factor de potencia nominal, velocidad nominal en [rpm], potencia nominal, potencia máxima, mínimo técnico, tensión nominal, etc.).

Para el desarrollo se recomienda presentar los temas en el mismo orden en el que se presentan a continuación, aunque se puede utilizar otra estructura mientras este abarque con todo lo requerido.

Finalmente, se debe concluir al respecto del cumplimiento de los requerimientos de diseño que se encuentran en la NTSyCS y con los requerimientos para poder suministrar algún SSCC en caso de que la instalación haya sido instruida para aquello.

7.1.1 Ejecución de ensayos

En este capítulo se abordan los resultados de los ensayos y debe contener al menos los siguientes puntos:

² Turbina hidráulica, turbina de vapor, turbina de gas, motor de combustión interna, parque fotovoltaico, eólico (DFIG o Full Converter), etc. Si corresponde indicar el combustible primario utilizado.

³ Tanto de energía activa como reactiva. Por ej. BESS, SVC, STATCOM, etc.

- Día y hora en que fueron realizados los ensayos.
- Descripción del equipamiento utilizado para el registro de los ensayos.
- El detalle de cada una de las maniobras realizadas, indicando explícitamente los montos porcentuales o absolutos de los escalones aplicados, los cambios de consignas o valores de referencia, las modificaciones en los ajustes que se tuvieron que realizar, las conexiones/desconexiones de instalaciones, etc.
- El resultado de los ensayos, mostrando las variables eléctricas y señales de control e indicando los puntos representativos que permitan recalculer los indicadores de desempeño y contrastar los registros con las simulaciones al modelo dinámico homologado. Todas las gráficas deben tener un título claro, etiquetas en los ejes y unidades de medida y una escala apropiada en ambos ejes.
- Para los ensayos al control de potencia activa se deben calcular al menos los siguientes indicadores: tiempo de retardo, crecimiento y establecimiento, frecuencias de activación y desactivación, tasa de toma y bajada de carga y estatismo.
- Para los ensayos al control de potencia reactiva/tensión se deben calcular al menos los siguientes indicadores: tiempo de retardo, crecimiento y establecimiento, sobreoscilación, bandas muertas y estatismo de potencia reactiva.

7.1.2 Desarrollo de modelos matemáticos

En este capítulo se debe abordar el desarrollo de los modelos matemáticos que permiten tener una adecuada representación tanto estática como dinámica de la instalación y debe contener al menos los siguientes puntos:

- Aspectos generales de la instalación:
 - Modelo, marca y hoja de datos de los principales equipos.
 - Diagramas de bloques funcionales de los sistemas de control.
 - Ajustes de las protecciones que puedan operar ante perturbaciones en el SI, como lo son las de tensión y frecuencia, pérdida de sincronismo, etc.

- Planos de disposición de la planta.
- Documentación del fabricante utilizada para la modelación.
- Descripción de cada modo de control disponible, indicando las limitaciones operacionales⁴.
- Indicar los parámetros ajustables por el operador, especificando los rangos de ajuste.
- Incorporación de información suficiente que permita validar el modelo implementado. En el caso de utilizar supuestos estos deben estar justificados.

7.1.3 Homologación de los modelos dinámicos

En este capítulo se abordan la implementación del modelo dinámico en DigSILENT PF y debe contener al menos los siguientes puntos:

- El marco (o *frame*) que conecta los diagramas de bloques, medidores y elementos de red de la instalación.
- Los diagramas de bloques (BlkDef) de cada controlador con una tabla que contenga los parámetros del modelo dinámico junto con una descripción, el valor final y las unidades de medida de cada uno de estos. Con respecto al valor final, se debe indicar si fue homologado, estimado en base a la experiencia, calculado teóricamente, provisto por el fabricante o es ajustable por el operador.
- En el caso de que un sistema de control disponga más de un modo de operación, indicar los parámetros del modelo dinámico, y sus posibles valores, que deben modificarse para activar, desactivar y/o cambiar cada modo.
- Comparación de los registros de los ensayos con la respuesta del modelo para cada una de las pruebas realizadas.
- Valores de normalización de las unidades físicas a por unidad, tanto de las señales de entrada como las de salida de los diagramas de bloques. Los valores indicados tanto en la

⁴ Es de particular interés indicar si existen limitaciones en el aporte de potencia activa que realiza el control de carga/velocidad o frecuencia/potencia.

modelación estática, como en los modelos dinámicos y medidores deben ser concordantes entre sí.

- Rango de validez del modelo y sus límites. En caso de existir rutinas de cálculo (por ej. DPL) para ajustar parámetros del modelo, se debe explicar su funcionamiento.

7.1.4 Análisis de los modelos dinámicos

Una vez que se tiene el modelo dinámico homologado en base a los ensayos requeridos, se debe realizar los siguientes análisis al comportamiento del este.

7.1.4.1 Controlador de tensión y limitadores

- En la base de datos de pruebas con el modelo dinámico homologado y con la unidad operando a potencia máxima y factor de potencia nominal se calcula el valor de tensión de excitación nominal (EFDnom) y con el techo de excitación positivo obtenido de los ensayos, se calcula la relación EFDmax/EFDnom.
- En la base de datos de pruebas con el modelo dinámico homologado y con la unidad operando a potencia máxima y factor de potencia nominal, se realiza un cortocircuito que produzca una depresión de al menos un 50% del valor de la tensión nominal en bornes del generador y se calcula el tiempo que le toma a la tensión de excitación a llegar a su máximo.
- Con la curva de capacidad de la instalación provista por el fabricante, los modelos dinámicos homologados de los limitadores (UEL, OEL, SCL, etc.) y el reporte de ajuste de protecciones, se solicita construir el diagrama PQ sobre la curva de capacidad, en donde se aprecie claramente la curva límite de cada limitador y protección⁵ y que esta vaya desde mínimo técnico hasta la potencia máxima para una tensión en bornes de 1 pu.

7.1.4.2 Controlador de carga/velocidad o de frecuencia/potencia

En la base de datos de prueba solicitada en el punto 7.2.1 se solicita simular la inyección de señales de escalón de frecuencia de ± 200 mHz y ± 700 mHz al sistema de control de carga/velocidad para niveles de carga baja, media y alta por al menos 1 minuto o hasta 10 s después que la potencia

⁵ Se espera que las protecciones estén coordinadas con los limitadores y nunca operen antes, para lo cual se debe dejar un margen de seguridad razonable.

activa alcanza su valor de régimen permanente. Para cada una de las simulaciones se debe registrar el aporte a los 10 s, el tiempo de establecimiento y el aporte a 1 minuto⁶.

7.1.4.3 Respuesta del PSS ante modo interárea de oscilación

Para los casos en que se haya detectado que la instalación en estudio participa en los modos de oscilación inter-área, y debido a la dificultad práctica de excitar este tipo de modos, se solicita simular en la base de datos de prueba solicitada en el punto 7.2.1 un escalón de entre el 2% y 5% en la referencia de tensión, con la unidad generadora en potencia máxima y sub-excitada, considerando una reactancia equivalente del sistema que permita excitar un modo inter-área de 0,2 Hz, con y sin PSS. Con estos resultados, concluir con respecto a la estabilidad y amortiguamiento de la señal de potencia activa en ambos casos.

7.1.4.4 Perturbación en el SEN

Para cada uno de los casos de estudios solicitados en el punto 7.2.2 para la base de datos del SEN que incluye el modelo dinámico en estudio, se debe realizar un análisis de la respuesta en potencia activa y reactiva del modelo dinámico, en los modos de control en los que se espera que opere la instalación la mayor parte del tiempo. Además, se debe concluir sobre la estabilidad numérica del modelo dinámico, así como verificar que este actúa de acuerdo con lo esperado.

7.2 BASES DE DATOS

Se entregan dos bases de datos: una de pruebas con el modelo de la central generadora en estudio y otra con el modelo de la central incorporada a la base de datos del SEN. A continuación, se detalla lo que se requiere de cada una.

7.2.1 Base de datos de prueba

Esta base de datos contiene solo el modelo dinámico en estudio y un elemento equivalente para representar el resto del sistema. Esta debe contener los siguientes casos de estudios (“Study Case”):

- Cada ensayo realizado debe modelarse en un caso de estudio independiente, en los cuales se recreen, mediante eventos de simulación, las condiciones operacionales y las pruebas realizadas, en carga alta para el caso de las centrales generadoras. Para comparar la

⁶ Se considera 1 minuto debido a que este es el tiempo en que la frecuencia alcanza su valor de régimen permanente en las simulaciones de desconexión de grandes generadores.

respuesta del modelo dinámico con los registros de ensayos, se deberán usar los elementos de red ElmFile⁷.

- Corto circuitos en la barra de AT del transformador elevador para diferentes tensiones de operación (ej. 0.95 a 1.05pu), despejados en 200 ms.

7.2.2 Base de datos del SEN

Esta base de datos corresponde a la publicada por el Coordinador en su sitio WEB⁸ con el nuevo modelo dinámico incorporado. Esta debe considerar a la instalación en estudio en su nivel esperado o más exigente de operación (carga alta en caso de unidades generadoras) y contener los siguientes casos de estudios (“Study Case”):

- Cortocircuitos despejados en 200 ms en líneas y/o barras cercanas a la instalación.
- Desconexiones intempestivas de consumos, unidades generadoras o elementos de compensación reactiva cercanas a la central generadora, que permitan apreciar la respuesta dinámica de la instalación en estudio.
- La mayor desconexión intempestiva de consumo y/o generación que puede ocurrir en el SEN y que permitan apreciar la respuesta dinámica de la instalación en estudio.

7.3 REGISTROS DE ENSAYOS

Los archivos con los registros de ensayos utilizados para la homologación de los modelos dinámicos deben ser adaptados para que su estructura y formato sean aptos para ser leídos por el software DIgSILENT PF. Además, para poder comparar fácilmente los resultados de las simulaciones dinámicas con los registros de los ensayos, se solicita indicar las variables eléctricas o señales de control que representan cada una de las columnas de los archivos en los encabezados de estos o indicarlos en un archivo anexo.

Aunque los casos de estudio requeridos para la base de pruebas sean solo los relacionados con los ensayos en carga alta, se requiere que todos los registros de ensayos en todos los niveles de carga sean entregados en el mismo formato.

⁷ Para más detalles revisar la referencia técnica del software asociada al elemento ElmFile.

⁸ La más actualizada hasta hace un mes de la primera entrega del Informe

8 BIBLIOGRAFÍA

- [1] “R 1060-15 Informe Protocolo de Ensayos.pdf” Mercados Energéticos Consultores – Julio 2015.