

CONSEJO NACIONAL DE OPERACIÓN CNO

ACUERDO No. 189
Noviembre 23 de 2001

Por el cual se aprueban los protocolos para pruebas de estatismo de las plantas San Francisco, Termoflores, Termodorada, Termocandelaria, y Termocentro.

El Consejo Nacional de Operación en uso de sus facultades legales, en especial las conferidas en el Artículo 36 de la Ley 143 de 1994, la Resolución 8-0103 del 2 de febrero de 1995 del Ministerio de Minas y Energía, el Anexo general de la Resolución CREG 025 de 1995 y según lo aprobado en la Reunión No 164 del 22 de noviembre de 2001.

ACUERDA:

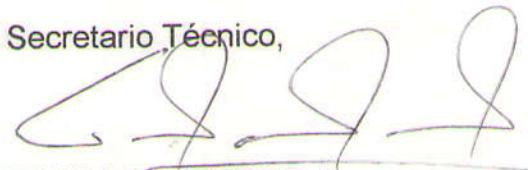
PRIMERO: Aprobar los protocolos para pruebas de estatismo de las plantas San Francisco, Termoflores, Termodorada, Termocandelaria, y Termocentro, incluidos en los Anexos 1 a 5 del presente Acuerdo.

SEGUNDO: El presente Acuerdo rige a partir de la fecha de su expedición.

El Presidente,


ALBERTO OLARTE AGUIRRE

El Secretario Técnico,


GERMAN CORREDOR A.

Consejo Nacional de Operación CNO

ANEXO 1

CENTRAL HIDROELÉCTRICA DE CALDAS S.A E.S.P.

PROTOCOLOS PRUEBA DE ESTATISMO Y BANDA MUERTA

Los protocolos que se presentan son para dar cumplimiento a la resolución 023/2001.

CENTRAL SAN FRANCISCO

Prueba de estatismo.

En esta central se tienen reguladores electromecánicos por lo tanto se aplicará la prueba de estatismo tal como la define la resolución 025 de 1995. En su realización se tomará la medida de frecuencia de la unidad en la señal de PT's con un relé de frecuencia SPAF 340 de ABB el cual posee resolución de 10mhz y la potencia será leída en un SPAC 535 de ABB con módulo de medida con precisión de 1%; estos elementos estarán conectados al sistema SCADA.

La potencia P_o a la cual se cargará la unidad será mayor de 10 MW (30 MW).

Las características de la central se presentan en el formato definido como protocolo para la prueba de estatismo.

Prueba de Banda Muerta

Para esta prueba se monitoreará por un lapso de mínimo dos horas la frecuencia y la potencia de cada unidad, esto con ayuda del sistema SCADA y los elementos descritos anteriormente para monitorear la potencia y la frecuencia.

Los histogramas logrados con el sistema SCADA, serán analizados para determinar si la unidad realizó ajustes de potencia cuando la frecuencia presentó una variación mayor a 30 mhz por encima o por debajo de los 60 hz que tenemos como referencia.

Se debe tener en cuenta que en esta central la banda muerta que fue posible ajustar fue de 1% (600mhz)

Para estos reguladores no se dispone de los diagramas de Laplace

Consejo Nacional de Operación CNO

CENTRAL HIDROELECTRICA DE CALDAS S.A E.S.P.
CHEC

DEPARTAMENTO DE PRODUCCION

PRUEBA DE ESTATISMO PERMANENTE

PLANTA : San Francisco

UNIDAD No. _____

CARACTERISTICAS TECNICAS

Regulador de Velocidad : CHARMILLES

Parámetros de la Turbina

Tipo	Francis
Caudal	29.9m3/s
Cabeza Neta	180 Mts
Potencia	64650 HP
R.P.M.	400

Parámetros del Generador

Potencia	53 MVA
Cos ϕ	0.85
Tensión	13.8 KV
R.P.M.	400

PARAMETROS DECLARADOS AL CND:

Capacidad Neta	45 MW
Minimo técnico	10 MW
Estatismo	4%
Banda Muerta	600 MHZ

Consejo Nacional de Operación CNO

CENTRAL HIDROELECTRICA DE CALDAS S.A E.S.P.
CHEC

DEPARTAMENTO DE PRODUCCION

PRUEBA DE ESTATISMO PERMANENTE

PLANTA : San Francisco

UNIDAD No. _____

OBJETIVO :

Documentar el procedimiento de la prueba de estatismo permanente de las unidades de generación de la Central Hidroeléctrica de San Francisco.

Equipos a utilizar : Tester Fluke 87 para la medición de frecuencia.
La potencia se lee en el Scada.

Procedimiento:

- 1 Llevar la unidad a velocidad nominal
- 2 Conectar la unidad al SIN.
- 3 Abrir el limitador de apertura al 100%.
- 4 Cargar la unidad a un valor P_o .
- 5 Tomar las lecturas de Potencia Activa y frecuencia simultáneamente
- 6 Con el limitador de apertura bajar la carga de la unidad a cero.
- 7 Desconectar la unidad del SIN.
- 8 Abrir el limitador al 100%.
- 9 Tomar la lectura de velocidad referenciada a su equivalente en Hz

Consejo Nacional de Operación CNO

CENTRAL HIDROELECTRICA DE CALDAS S.A E.S.P.
CHEC

DEPARTAMENTO DE PRODUCCION

PRUEBA DE ESTATISMO PERMANENTE

PLANTA : San Francisco

UNIDAD No. _____

10 El valor del estatismo (R), es dado por:

$$R = \frac{\Delta f / f_o}{P_o / P_n} * 100\%$$

Donde: Df = fref - fo

fo = Lectura de frecuencia del sistema tomada a la carga Po.

fref = Valor de frecuencia obtenida en 9 .

Pn = Capacidad neta de la unidad declarada al CND.

El generador pasa la prueba si la respuesta de regulación primaria de la unidad generadora a cambios de frecuencia en el SIN medida en MW/Hz, está dentro de un $\pm 1\%$ de tolerancia del valor declarado.

FECHA : _____

INGENIERO : _____

Consejo Nacional de Operación CNO

ANEXO 2

PROCEDIMIENTO PARA PRUEBA DE ESTATISMO UNIDAD FLORES 1- TURBINA W501D5

METODO DE PRUEBA: REGISTROS DURANTE UN EVENTO REAL

Introducción

Se presenta de manera detallada el procedimiento para realizar la prueba de Estatismo de la Unidad Flores 1 con una Turbina de Combustión W501D5

Se presentará una metodología basada en la medición de velocidad y potencia activa de la máquina durante un evento real de variación de frecuencia.

Definiciones

Se presentan algunas definiciones básicas para ilustrar claramente el procedimiento de las pruebas. Estas definiciones están basadas en la resolución CREG 023-2001.

Variaciones de frecuencia en la red

La frecuencia de la red en Colombia es de 60 ciclos. En condiciones normales de operación esta frecuencia es estable y no presenta variaciones importantes, aproximadamente de 0.1-0.2 Hz durante variaciones normales de carga.

Para que la frecuencia de la red permanezca estable, se requiere un equilibrio entre la potencia eléctrica generada y la consumida. Cuando se presenta un desequilibrio, se presenta una variación en la frecuencia. Entre mayor sea el desequilibrio, mayor será la variación de frecuencia.

Consejo Nacional de Operación

CNO

Durante variaciones normales de la carga, el despacho del CND garantiza el equilibrio entre la demanda y la generación. Los generadores reguladores se encargan de asumir las diferencias entre la demanda estimada y la real. En estas condiciones de operación las variaciones de frecuencia son mínimas y las unidades de generación operan con la carga despachada.

Cuando se producen grandes desconexiones de cargas o generadores, las variaciones en la frecuencia son mayores, por ejemplo 1.0 – 2.0 Hz o más, dependiendo de la gravedad del evento.

Regulación primaria

Bajo estas condiciones “anormales” de operación, el generador o los generadores reguladores no están en capacidad de restituir el desequilibrio inmediatamente y es necesario que todos los generadores del sistema interconectado modifiquen en un porcentaje la generación de potencia para garantizar la estabilidad del sistema.

Esta modificación de la generación de potencia para restituir la frecuencia del sistema al valor nominal, se denomina regulación primaria de frecuencia. En la regulación primaria no hay de por medio participación humana para regular el sistema.

Al mismo tiempo, los nodos reguladores modificarán, hasta donde puedan, la potencia generada para restituir el equilibrio de generación – consumo y garantizar el despacho. Si ese equilibrio no es posible, se realiza un redespacho de generación.

A continuación se transcribe la definición de regulación primaria presentada en la resolución CREG 023 2001, la cual modifica la resolución CREG 025-95:

Regulación Primaria: Servicio en línea que corresponde a la variación automática, mediante el gobernador de velocidad, de la potencia entregada por la unidad de generación como respuesta a cambios de frecuencia en el sistema. Los tiempos característicos de respuesta están entre 0 y 10 segundos. La variación de carga del generador debe ser sostenible al menos durante los siguientes 30 segundos.

Regulación secundaria

Ese redespacho puede ser automático o manual. Cuando es automático, de manera remota se interviene el regulador de velocidad para incrementar o reducir la potencia de los generadores. De manera manual, se envía un redespacho para modificar la potencia a generar. Estas acciones que no son inmediatas al evento transitorio y que cambian los ajustes de potencia generada se denomina Regulación Secundaria.

Consejo Nacional de Operación

CNO

Se puede concluir que la regulación primaria opera durante el evento transitorio y tiene como propósito garantizar la estabilidad del sistema interconectado. La regulación secundaria opera posteriormente y tiene como propósito equilibrar el despacho y dejar el sistema en condiciones más estables y seguras de operación.

Banda muerta de operación

Es un valor de frecuencia donde no se hace corrección de la potencia generada, es decir, las variaciones de potencia en ese rango no activan la regulación primaria de los generadores. Para Colombia esa banda muerta es de ± 0.03 Hz. Eso significa que entre 59.97 y 60.03 Hz no hay regulación primaria.

Definición presentada en la Resolución CREG 023-2001:

Banda Muerta de Operación: Rango de frecuencia, dentro del cual las unidades de generación no varían automáticamente su potencia.

En el segundo párrafo del Artículo Cuarto de la misma Resolución se indica que:

Para una adecuada calidad de la frecuencia, las unidades generadoras deberán tener una Banda Muerta de respuesta a los cambios de frecuencia menor o igual a 30 mHz. Este valor podrá ser revaluado por el CND cuando lo considere conveniente.

En la Unidad Flores 1 la banda muerta es cero mHz, por lo que la Unidad puede variar automáticamente su potencia dentro de cualquier rango de frecuencia.

Estatismo

El estatismo es la relación entre la variación de frecuencia y la potencia corregida en la unidad de generación. Entre mayor sea la desviación de frecuencia, mayor debe ser la potencia corregida en la unidad de generación. El valor de estatismo que deben tener las unidades de generación en Colombia debe estar entre el 4% y el 6%.

La fórmula del estatismo es la siguiente:

$$\text{Estatismo}[\%] = \frac{\frac{\Delta \text{Frecuencia}[\text{Hz}]}{\text{Frecuencia Nominal}[\text{Hz}]}}{\frac{\Delta \text{Potencia}[\text{MW}]}{\text{Potencia Nominal}[\text{MW}]}} [\%]$$

Consejo Nacional de Operación CNO

Definición presentada en la Resolución CREG 023-2001:

Estatismo: *Característica técnica de una planta y/o unidad de generación, que determina la variación porcentual de la frecuencia por cada unidad de variación porcentual de la carga.*

En el segundo párrafo del Artículo Cuarto de la misma Resolución se indica que:

El Estatismo de las unidades generadoras despachadas centralmente debe ser un valor entre el 4% y el 6%, el cual deberá ser declarado por el agente al CND.

Función de regulación primaria

En la Turbina de Combustión Unidad Flores 1 el estatismo se encuentra ajustado en 5.025%, esto significa que no habiendo sido cambiada la referencia de velocidad un cambio de frecuencia y por consiguiente de velocidad de 5.025% se traducirá en un cambio de su carga nominal ISO (104 MW) de 100%.

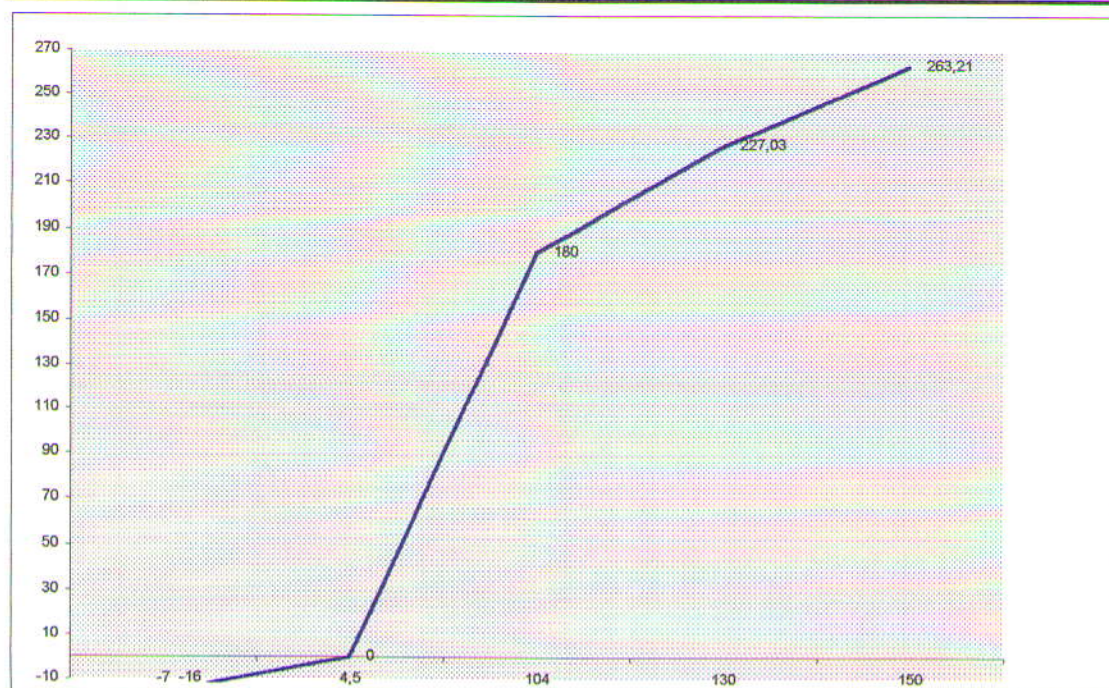
Los algoritmos de control contienen un circuito limitador de carga a fin de limitar la toma de carga a un 25% de la carga nominal (base ISO) durante un descenso instantáneo de frecuencia. No hay restricción en lo que a caída de carga se refiere.

El algoritmo que contiene la función (DROOP) a partir de la cual se ejecuta la corrección de carga ante variaciones instantáneas de velocidad (frecuencia de la red) es el A011Z902 así:

R1: -7	S1: -16
R2: 4.5	S2: 0
R3: 104.0	S3: 180.0
R4: 130.0	S4: 227.03
R5: 150.0	S5: 263.21
R6: 0	S6: 0

El valor del estatismo del 5.025 % correspondiente a la tabla anterior, determina la pendiente de la recta presentada a continuación::

Consejo Nacional de Operación CNO



Cabe anotar que el eje X no está escalizado. La curva en el cuadrante uno (I) es en realidad una sola recta con pendiente = 1.809

La pendiente de la recta en el cuadrante uno (carga de sincronización y desconexión 4.5 Mw) es 1.809 lo cual corresponde a un cambio de velocidad para máxima variación de carga (100% nominal ISO) de 180.9 RPM que a su vez es el 5.025% de la velocidad nominal (3600 RPM, 60.0Hz), de acuerdo a lo establecido en el primer párrafo. La ecuación de la recta (cuadrante uno (I)) será:

$$Y = 1.809 * X - 8.136$$

Donde,

R = Mw de la Unidad

S = Parámetro dependiente de la velocidad de la Turbina de Combustión dada por el fabricante de acuerdo con la lógica de control

Prueba de estatismo

Consejo Nacional de Operación

CNO

La prueba estatismo tiene como propósito verificar la corrección de potencia de la Turbina de Combustión ante las variaciones de frecuencia en la red.

El fabricante, Siemens-Westinghouse certifica el estatismo o DROOP de la unidad con base en los datos del algoritmo A011Z902 anteriormente descritos.

Procedimiento para la medición del estatismo

A continuación se presenta un procedimiento detallado de la prueba.

Parámetros a registrar

Se registrarán los siguientes parámetros:

1. Frecuencia de la red o velocidad de la máquina.
2. Potencia Activa a la Salida del Generador.

Periodo de pruebas

Se propone como período de pruebas un mes. Durante ese período se analizarán todos los eventos de frecuencia y para los eventos más importantes, se elaborará un protocolo de prueba.

Medición del estatismo

Definido el estatismo como se hizo anteriormente, se realizarán cálculos del estatismo con base en los registros obtenidos.

Registradores

Para realizar esta prueba se requiere de un registrador que esté en capacidad de almacenar información cuando la frecuencia varíe dentro de unos rangos predeterminados.

Consejo Nacional de Operación

CNO

En la Unidad Flores 1 se tomarán registros de los parámetros a verificar, f (Hz) y P (MW), con un tiempo de muestreo de un segundo y tendencias de 1 y 10 minutos.

Resultados

Los resultados se presentarán gráficamente.

Consejo Nacional de Operación CNO

PROCEDIMIENTO PARA PRUEBA DE ESTATISMO UNIDAD FLORES 2- TURBINA W501D5

METODO DE PRUEBA: REGISTROS DURANTE UN EVENTO REAL

Introducción

Se presenta de manera detallada el procedimiento para realizar la prueba de Estatismo de la Unidad Flores 2 con una Turbina de Combustión W501D5

Se presentará una metodología basada en la medición de velocidad y potencia activa de la máquina durante un evento real de variación de frecuencia.

Definiciones

Se presentan algunas definiciones básicas para ilustrar claramente el procedimiento de las pruebas. Estas definiciones están basadas en la resolución CREG 023-2001.

Variaciones de frecuencia en la red

La frecuencia de la red en Colombia es de 60 ciclos. En condiciones normales de operación esta frecuencia es estable y no presenta variaciones importantes, aproximadamente de 0.1-0.2 Hz durante variaciones normales de carga.

Para que la frecuencia de la red permanezca estable, se requiere un equilibrio entre la potencia eléctrica generada y la consumida. Cuando se presenta un desequilibrio, se presenta una variación en la frecuencia. Entre mayor sea el desequilibrio, mayor será la variación de frecuencia.

Durante variaciones normales de la carga, el despacho del CND garantiza el equilibrio entre la demanda y la generación. Los generadores reguladores se encargan de asumir las diferencias entre la demanda estimada y la real. En estas condiciones de operación las variaciones de frecuencia son mínimas y las unidades de generación operan con la carga despachada.

Consejo Nacional de Operación

CNO

Cuando se producen grandes desconexiones de cargas o generadores, las variaciones en la frecuencia son mayores, por ejemplo 1.0 – 2.0 Hz o más, dependiendo de la gravedad del evento.

Regulación primaria

Bajo estas condiciones “anormales” de operación, el generador o los generadores reguladores no están en capacidad de restituir el desequilibrio inmediatamente y es necesario que todos los generadores del sistema interconectado modifiquen en un porcentaje la generación de potencia para garantizar la estabilidad del sistema.

Esta modificación de la generación de potencia para restituir la frecuencia del sistema al valor nominal, se denomina regulación primaria de frecuencia. En la regulación primaria no hay de por medio participación humana para regular el sistema.

Al mismo tiempo, los nodos reguladores modificarán, hasta donde puedan, la potencia generada para restituir el equilibrio de generación – consumo y garantizar el despacho. Si ese equilibrio no es posible, se realiza un redespacho de generación.

A continuación se transcribe la definición de regulación primaria presentada en la resolución CREG 023 2001, la cual modifica la resolución CREG 025-95:

Regulación Primaria: Servicio en línea que corresponde a la variación automática, mediante el gobernador de velocidad, de la potencia entregada por la unidad de generación como respuesta a cambios de frecuencia en el sistema. Los tiempos característicos de respuesta están entre 0 y 10 segundos. La variación de carga del generador debe ser sostenible al menos durante los siguientes 30 segundos.

Regulación secundaria

Ese redespacho puede ser automático o manual. Cuando es automático, de manera remota se interviene el regulador de velocidad para incrementar o reducir la potencia de los generadores. De manera manual, se envía un redespacho para modificar la potencia a generar. Estas acciones que no son inmediatas al evento transitorio y que cambian los ajustes de potencia generada se denomina Regulación Secundaria.

Se puede concluir que la regulación primaria opera durante el evento transitorio y tiene como propósito garantizar la estabilidad del sistema interconectado. La regulación secundaria opera posteriormente y tiene como propósito equilibrar el despacho y dejar el sistema en condiciones más estables y seguras de operación.

Consejo Nacional de Operación CNO

Banda muerta de operación

Es un valor de frecuencia donde no se hace corrección de la potencia generada, es decir, las variaciones de potencia en ese rango no activan la regulación primaria de los generadores. Para Colombia esa banda muerta es de ± 0.03 Hz. Eso significa que entre 59.97 y 60.03 Hz no hay regulación primaria.

Definición presentada en la Resolución CREG 023-2001:

Banda Muerta de Operación: Rango de frecuencia, dentro del cual las unidades de generación no varían automáticamente su potencia.

En el segundo párrafo del Artículo Cuarto de la misma Resolución se indica que:

Para una adecuada calidad de la frecuencia, las unidades generadoras deberán tener una Banda Muerta de respuesta a los cambios de frecuencia menor o igual a 30 mHz. Este valor podrá ser revaluado por el CND cuando lo considere conveniente.

En la Unidad Flores 2 la banda muerta es cero mHz, por lo que la Unidad puede variar automáticamente su potencia dentro de cualquier rango de frecuencia.

Estatismo

El estatismo es la relación entre la variación de frecuencia y la potencia corregida en la unidad de generación. Entre mayor sea la desviación de frecuencia, mayor debe ser la potencia corregida en la unidad de generación. El valor de estatismo que deben tener las unidades de generación en Colombia debe estar entre el 4% y el 6%.

La fórmula del estatismo es la siguiente:

Consejo Nacional de Operación

CNO

$$\text{Estatismo}[\%] = \frac{\frac{\Delta \text{Frecuencia}[\text{Hz}]}{\text{Frecuencia Nominal}[\text{Hz}]}}{\frac{\Delta \text{Potencia}[\text{MW}]}{\text{Potencia Nominal}[\text{MW}]}} [\%]$$

Definición presentada en la Resolución CREG 023-2001:

Estatismo: Característica técnica de una planta y/o unidad de generación, que determina la variación porcentual de la frecuencia por cada unidad de variación porcentual de la carga.

En el segundo párrafo del Artículo Cuarto de la misma Resolución se indica que:

El Estatismo de las unidades generadoras despachadas centralmente debe ser un valor entre el 4% y el 6%, el cual deberá ser declarado por el agente al CND.

Función de regulación primaria

En la Turbina de Combustión Unidad Flores 2 el estatismo se encuentra ajustado en 4.00 %, esto significa que no habiendo sido cambiada la referencia de velocidad un cambio de frecuencia y por consiguiente de velocidad de 4.00 % se traducirá en un cambio de su carga nominal ISO (104 MW) de 100%.

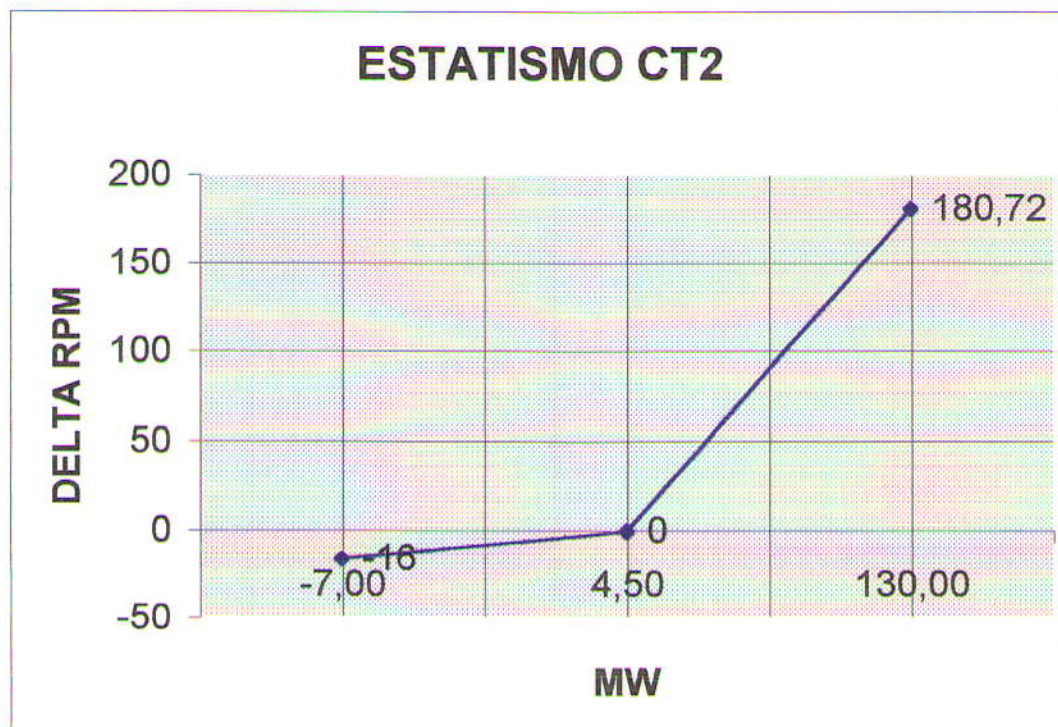
Los algoritmos de control contienen un circuito limitador de carga a fin de limitar la toma de carga a un 25% de la carga nominal (base ISO) durante un descenso instantáneo de frecuencia. No hay restricción en lo que a caída de carga se refiere.

El algoritmo que contiene la función (DROOP) a partir de la cual se ejecuta la corrección de carga ante variaciones instantáneas de velocidad (frecuencia de la red) es el A011Z909 así:

R1: -7	S1: -16
R2: 4.5	S2: 0
R3: 130	S3: 180.72
R4: 150	S4: 209.52
R5: 0	S5: 0
R6: 0	S6: 0

Consejo Nacional de Operación CNO

El valor del estadismo del 4.00 % correspondiente a la tabla anterior, determina la pendiente de la recta presentada a continuación::



Esta tabla grafica el DROOP (A011Z909) para potencia entre -7 y 130 MW, correspondientes a las ecuaciones (1) y (2).

La pendiente de la recta en el cuadrante uno (carga de sincronización y desconexión 4.5 Mw) es 1.44 lo cual corresponde a un cambio de velocidad para máxima variación de carga (100% nominal ISO) de 144 RPM que a su vez es el 4.00 % de la velocidad nominal (3600 RPM, 60.0Hz), de acuerdo a lo establecido en el primer párrafo. Las ecuaciones de la recta serán:

$$(S = 1.44 * R - 6.48), \quad \text{para valores } 4.5 \leq Mw \leq 130 \quad (1)$$

$$(S = 1.3913 * R - 6.255), \quad \text{para valores } -7 \leq Mw \leq 4.5 \quad (2)$$

Consejo Nacional de Operación

CNO

Donde,

R = Variable independiente (Mw de la Unidad)

S = Variable dependiente de la velocidad de la Turbina de Combustión dada por el fabricante de acuerdo con la lógica de control (Delta RPM)

No se consideran valores por encima de 130 Mw (R3) por exceder la capacidad de la Unidad. Dado que la carga mínima de la Unidad es de 4.5 Mw, solo se considera la ecuación (2) para el cálculo del estatismo

Prueba de estatismo

La prueba estatismo tiene como propósito verificar la corrección de potencia de la Turbina de Combustión ante las variaciones de frecuencia en la red.

El fabricante, Siemens-Westinghouse certifica el estatismo o DROOP de la unidad con base en los datos del algoritmo A011Z909 anteriormente descritos.

Procedimiento para la medición del estatismo

A continuación se presenta un procedimiento detallado de la prueba.

Parámetros a registrar

Se registrarán los siguientes parámetros:

3. Frecuencia de la red o velocidad de la máquina.
4. Potencia Activa a la Salida del Generador.

Periodo de pruebas

Se propone como período de pruebas un mes. Durante ese período se analizarán todos los eventos de frecuencia y para los eventos más importantes, se elaborará un protocolo de prueba.

Consejo Nacional de Operación CNO

Medición del estatismo

Definido el estatismo como se hizo anteriormente, se realizarán cálculos del estatismo con base en los registros obtenidos.

Registradores

Para realizar esta prueba se requiere de un registrador que esté en capacidad de almacenar información cuando la frecuencia varíe dentro de unos rangos predeterminados.

En la Unidad Flores 2 se tomarán registros de los parámetros a verificar, f (Hz) y P (MW), con un tiempo de muestreo de un segundo y tendencias de 1 y 10 minutos.

Resultados

Los resultados se presentarán gráficamente.

Consejo Nacional de Operación CNO

PROCEDIMIENTO PARA PRUEBA DE ESTATISMO UNIDAD FLORES 3- TURBINA W501F

METODO DE PRUEBA: REGISTROS DURANTE UN EVENTO REAL

Introducción

Se presenta de manera detallada el procedimiento para realizar la prueba de Estatismo de la Unidad Flores 3 con una Turbina de Combustión W501F

Se presentará una metodología basada en la medición de velocidad y potencia activa de la máquina durante un evento real de variación de frecuencia.

Definiciones

Se presentan algunas definiciones básicas para ilustrar claramente el procedimiento de las pruebas. Estas definiciones están basadas en la resolución CREG 023-2001.

Variaciones de frecuencia en la red

La frecuencia de la red en Colombia es de 60 ciclos. En condiciones normales de operación esta frecuencia es estable y no presenta variaciones importantes, aproximadamente de 0.1-0.2 Hz durante variaciones normales de carga.

Para que la frecuencia de la red permanezca estable, se requiere un equilibrio entre la potencia eléctrica generada y la consumida. Cuando se presenta un desequilibrio, se presenta una variación en la frecuencia. Entre mayor sea el desequilibrio, mayor será la variación de frecuencia.

Durante variaciones normales de la carga, el despacho del CND garantiza el equilibrio entre la demanda y la generación. Los generadores reguladores se encargan de asumir

Consejo Nacional de Operación

CNO

las diferencias entre la demanda estimada y la real. En estas condiciones de operación las variaciones de frecuencia son mínimas y las unidades de generación operan con la carga despachada.

Cuando se producen grandes desconexiones de cargas o generadores, las variaciones en la frecuencia son mayores, por ejemplo 1.0 – 2.0 Hz o más, dependiendo de la gravedad del evento.

Regulación primaria

Bajo estas condiciones “anormales” de operación, el generador o los generadores reguladores no están en capacidad de restituir el desequilibrio inmediatamente y es necesario que todos los generadores del sistema interconectado modifiquen en un porcentaje la generación de potencia para garantizar la estabilidad del sistema.

Esta modificación de la generación de potencia para restituir la frecuencia del sistema al valor nominal, se denomina regulación primaria de frecuencia. En la regulación primaria no hay de por medio participación humana para regular el sistema.

Al mismo tiempo, los nodos reguladores modificarán, hasta donde puedan, la potencia generada para restituir el equilibrio de generación – consumo y garantizar el despacho. Si ese equilibrio no es posible, se realiza un redespacho de generación.

A continuación se transcribe la definición de regulación primaria presentada en la resolución CREG 023 2001, la cual modifica la resolución CREG 025-95:

Regulación Primaria: Servicio en línea que corresponde a la variación automática, mediante el gobernador de velocidad, de la potencia entregada por la unidad de generación como respuesta a cambios de frecuencia en el sistema. Los tiempos característicos de respuesta están entre 0 y 10 segundos. La variación de carga del generador debe ser sostenible al menos durante los siguientes 30 segundos.

Regulación secundaria

Ese redespacho puede ser automático o manual. Cuando es automático, de manera remota se interviene el regulador de velocidad para incrementar o reducir la potencia de los generadores. De manera manual, se envía un redespacho para modificar la potencia a generar. Estas acciones que no son inmediatas al evento transitorio y que cambian los ajustes de potencia generada se denomina Regulación Secundaria. Se puede concluir que la regulación primaria opera durante el evento transitorio y tiene como propósito garantizar la estabilidad del sistema interconectado. La regulación

Consejo Nacional de Operación

CNO

secundaria opera posteriormente y tiene como propósito equilibrar el despacho y dejar el sistema en condiciones más estables y seguras de operación.

Banda muerta de operación

Es un valor de frecuencia donde no se hace corrección de la potencia generada, es decir, las variaciones de potencia en ese rango no activan la regulación primaria de los generadores. Para Colombia esa banda muerta es de ± 0.03 Hz. Eso significa que entre 59.97 y 60.03 Hz no hay regulación primaria.

Definición presentada en la Resolución CREG 023-2001:

Banda Muerta de Operación: Rango de frecuencia, dentro del cual las unidades de generación no varían automáticamente su potencia.

En el segundo párrafo del Artículo Cuarto de la misma Resolución se indica que:

Para una adecuada calidad de la frecuencia, las unidades generadoras deberán tener una Banda Muerta de respuesta a los cambios de frecuencia menor o igual a 30 mHz. Este valor podrá ser revaluado por el CND cuando lo considere conveniente.

En la Unidad Flores 3 la banda muerta es de ± 20 mHz, por lo que la Unidad no puede variar automáticamente su potencia dentro de este rango de frecuencia.

Estatismo

El estatismo es la relación entre la variación de frecuencia y la potencia corregida en la unidad de generación. Entre mayor sea la desviación de frecuencia, mayor debe ser la potencia corregida en la unidad de generación. El valor de estatismo que deben tener las unidades de generación en Colombia debe estar entre el 4% y el 6%.

La fórmula del estatismo es la siguiente:

$$\text{Estatismo}[\%] = \frac{\frac{\Delta \text{Frecuencia}[\text{Hz}]}{\text{Frecuencia Nominal}[\text{Hz}]}}{\frac{\Delta \text{Potencia}[\text{MW}]}{\text{Potencia Nominal}[\text{MW}]}} [\%]$$

Definición presentada en la Resolución CREG 023-2001:

Consejo Nacional de Operación

CNO

Estatismo: Característica técnica de una planta y/o unidad de generación, que determina la variación porcentual de la frecuencia por cada unidad de variación porcentual de la carga.

En el segundo párrafo del Artículo Cuarto de la misma Resolución se indica que:

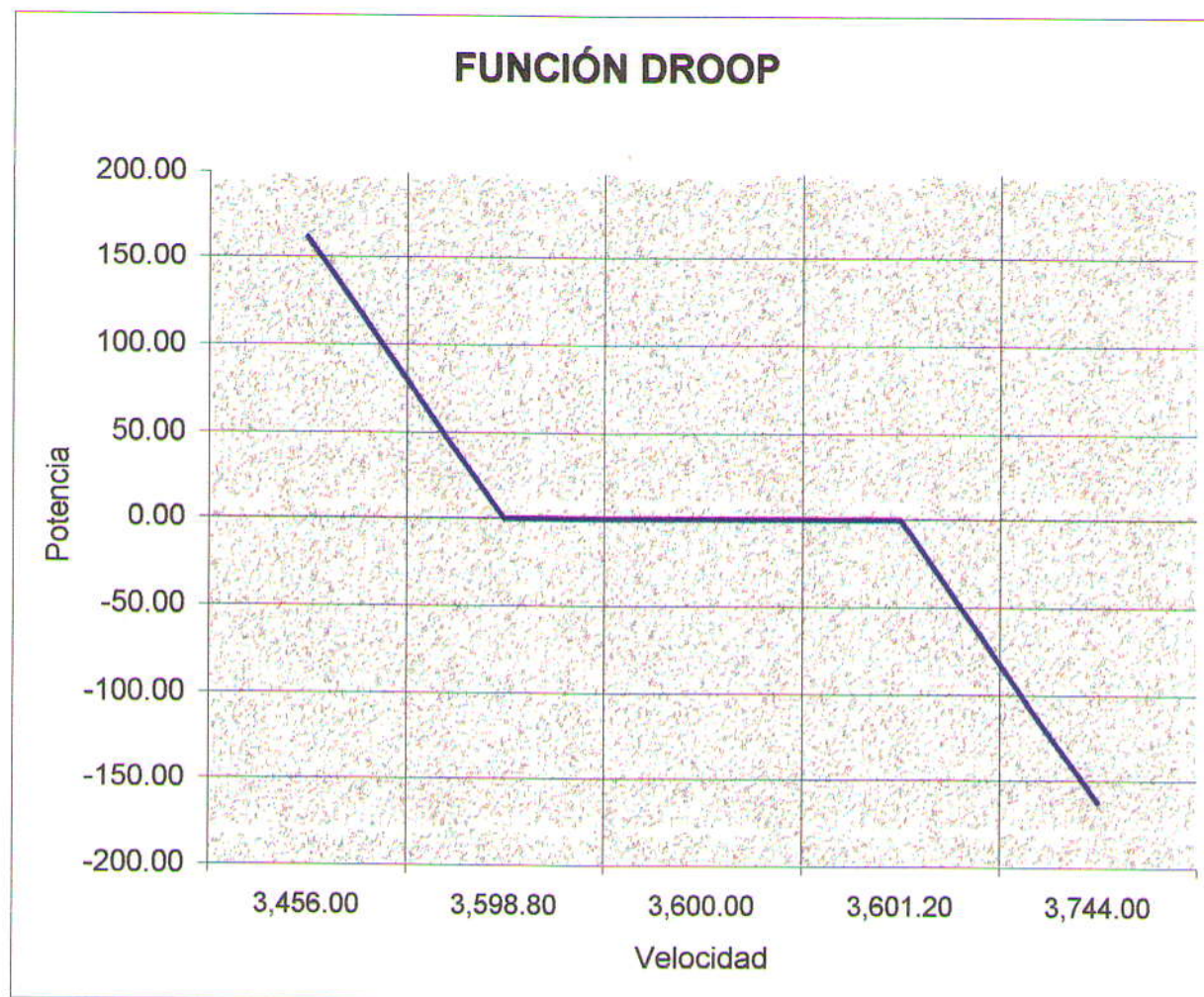
El Estatismo de las unidades generadoras despachadas centralmente debe ser un valor entre el 4% y el 6%, el cual deberá ser declarado por el agente al CND.

Función de regulación primaria

En la Turbina de Combustión Unidad Flores 3 el estatismo se encuentra ajustado en 4.00 %, esto significa que no habiendo sido cambiada la referencia de velocidad un cambio de frecuencia y por consiguiente de velocidad de 4.00 % se traducirá en un cambio de su carga nominal ISO (162 MW) de 100%.

La función de regulación primaria de la Unidad Flores 3 se presenta en la siguiente grafica que está compuesta por una Banda Muerta y dos pendientes asociadas al Estatismo.

Consejo Nacional de Operación CNO



SPEED	POTENCIA
3,456.00	162.00
3,598.80	0.00
3,600.00	0.00
3,601.20	0.0
3,744.00	-162.00

La Unidad Flores 3 tiene un Estatismo de 4%. Este valor determina las pendientes de las rectas de la gráfica presentada.

Consejo Nacional de Operación CNO

Las Ecuaciones de Regulación primaria para la Unidad Flores 3 fueron calculadas analíticamente de acuerdo a los datos suministrados en la lógica del WESTATION por el fabricante. Las ecuaciones son las siguientes:

$$P(\text{MW}) = -68.07 * f + 4085.57$$

Para $f > 60.02 \text{ Hz}$.

$$P(\text{MW}) = 0$$

Para $59.98 \text{ Hz} < f < 60.02 \text{ Hz}$.

$$P(\text{MW}) = -68.07 * f + 4082.83$$

Para $f < 59.98 \text{ Hz}$.

Las Ecuaciones fueron calculadas con base a los siguientes datos :

XCOORD	YCOORD
3456.0	162.0
3598.8	0.0
3600.0	0.0
3601.2	0.0
3744.0	-162.0
0.0	0.0
0.0	0.0
0.0	0.0

#BRKPT	3
GAIN	1.000
BIAS	0.00
HILIM	162.0
LOLIM	-162.0
TRKRAT	2.50

Permanentemente se registra la velocidad de la máquina, la cual es proporcional a la frecuencia de la red (3600 R.P.M equivalen a 60 Hz). Cuando la frecuencia sale del rango de la banda muerta, el Algoritmo calcula la potencia que debe corregir.

En la siguiente tabla se presenta un ejemplo teórico de variación de frecuencia usando las ecuaciones arriba mencionadas. Se supone una generación inicial de 110 MW. La $P_+(MW)$ es la potencia activa a corregir. La $P_{total}(MW)$ es la potencia activa que debe entregar la máquina durante las variaciones de frecuencia.

Consejo Nacional de Operación CNO

CALCULOS DE LOS VALORES TEORICOS DE POTENCIA

FRECUENCIA	P+ (MW)	Po (MW)	Ptotal (MW)
57.50	171.55	110	281.55
58.00	137.51	110	247.51
58.50	103.48	110	213.48
59.00	69.44	110	179.44
59.50	35.41	110	145.41
59.55	32.00	110	142.00
59.60	28.60	110	138.60
59.65	25.19	110	135.19
59.70	21.79	110	131.79
59.75	18.39	110	128.39
59.80	14.98	110	124.98
59.85	11.58	110	121.58
59.90	8.18	110	118.18
59.95	4.77	110	114.77
59.98	2.73	110	112.73
60.00	0.00	110	110.00

FRECUENCIA	P+ (MW)	Po (MW)	Ptotal (MW)
60.00	0.00	110	110.00
60.02	0.00	110	110.00
60.05	-2.03	110	107.97
60.10	-5.44	110	104.56
60.15	-8.84	110	101.16
60.20	-12.24	110	97.76
60.25	-15.65	110	94.35
60.30	-19.05	110	90.95
60.35	-22.45	110	87.55
60.40	-25.86	110	84.14
60.45	-29.26	110	80.74
60.50	-32.66	110	77.34
61.00	-66.70	110	43.30
61.50	-100.73	110	9.27
62.00	-134.77	110	-24.77
62.50	-168.81	110	-58.80

En el WESTATION se registran la potencia y la velocidad con una frecuencia de 0.1seg.

En el HSR se pueden obtener datos cada segundo con lo cual se pueden tomar muestras de estos valores y hacer los cálculos para obtener el estatismo de la Unidad a través de una hoja de cálculo como la mostrada:

Potencia nominal(MW) = 162
 Velocidad Nominal(R.P.M)= 3600
 Estatismo(%) = 5%
 Banda Muerto(R.P.M) = 20
 Combustible = GAS NATURAL

REGISTROS			CALCULOS				
Hora	VELOCIDAD (R.P.M)	POTENCIA (MW)	VELOCI- DAD (P.U)	POTEN- CIA (P.U)	ΔVELOCIDAD (P.U.)	ΔPOTENCIA (P.U.)	ESTATISMO (%)
10:30:10	3,600.00	100.00	1.00000	0.61728	0.00000	0.00000	-
10:30:12	3,588.00	108.86	0.99667	0.67198	-0.00333	0.05469	-6.09%

Consejo Nacional de Operación

CNO

Prueba de estatismo

La prueba estatismo tiene como propósito verificar la corrección de potencia de la Turbina de Combustión ante las variaciones de frecuencia en la red.

El fabricante, Siemens-Westinghouse certifica el estatismo o DROOP de la unidad con base en la información anterior.

Procedimiento para la medición del estatismo

A continuación se presenta un procedimiento detallado de la prueba.

Parámetros a registrar

Se registrarán los siguientes parámetros:

5. Frecuencia de la red o velocidad de la máquina.
6. Potencia Activa a la Salida del Generador.

Periodo de pruebas

Se propone como período de pruebas un mes. Durante ese período se analizarán todos los eventos de frecuencia y para los eventos más importantes, se elaborará un protocolo de prueba.

Medición del estatismo

Definido el estatismo como se hizo anteriormente, se realizarán cálculos del estatismo con base en los registros obtenidos.

Registradores

Para realizar esta prueba se requiere de un registrador que esté en capacidad de almacenar información cuando la frecuencia varíe dentro de unos rangos predeterminados.

Consejo Nacional de Operación

CNO

En la Unidad Flores 3 se tomarán registros de los parámetros a verificar, f (Hz) y P (MW), con un tiempo de muestreo de un segundo y tendencias de 1 y 10 minutos.

Resultados

Los resultados se presentarán gráficamente

Consejo Nacional de Operación CNO

ANEXO 3

CENTRAL ELECTRICA TERMODORADA. PROTOCOLO DE PRUEBA DE ESTATISMO

INTRODUCCIÓN.

El Twinpac de la Central Eléctrica TERMODORADA consta de dos turbinas de gas Pratt & Whitney modelo FT-8, las cuales se encuentran acopladas a un generador de C.A. Brush Electric Machines de dos polos, 3600-RPM, 69.3 MVA evaluado para operar a 60 HZ y 13.8 KV a un Factor de Potencia de 0.85. La turbina de gas FT-8 consiste de dos principales componentes: un generador de gas de dos ejes (GG8) y la turbina de potencia de eje único (PT8). El sistema de control utilizado es un Netcont 5000 Woodward.

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DE POTENCIA Y VELOCIDAD DEL TWINPAC.

El GFT8WD Gobernador Woodward Netcont 5000 para turbinas de gas FT-8 maneja el control de flujo de Gas combustible a través de la válvula Woodward FCV-110, que trabaja a partir de una posición mínima de apertura controlando el flujo de gas dependiendo de la Referencia de carga. El control de potencia recibe dos señales de entrada como feed back que son:

1. Potencia Eléctrica.
2. Velocidad.

El estatismo está dado por la diferencia porcentual entre la Velocidad de Referencia de la Turbina de Potencia (NP-REF) y la Velocidad de la Turbina de Potencia (NP) cuando el generador de gas llega a control por Temperatura "EGT". Ejemplo:

NP-REF = 3748 RPM. Correspondiente a la velocidad de referencia para Based Load 47.93 MW

NP = 3598 RPM. Correspondiente a la velocidad instantánea del Turbogruppo.

Consejo Nacional de Operación

CNO

Estatismo = $104.05\% - 100.03\%$

Estatismo = 4.02%

Previamente se envió la siguiente información:

La hoja de Datos Análogos generada durante alguna operación en control EGT o Base Load.

El Modelo del Gobernador de las Turbinas

El listado de constantes y variables usadas en el Modelo del Gobernador, incluido el Factor "Kdroop".

El Modelo de Excitación del generador Eléctrico

PROTOCOLO DE PRUEBA DE ESTATISMO

Dado que la válvula FCV1101 de control de flujo de gas es conducida hidráulicamente, monitoreada electrónicamente y controlada por el sistema de control Netcont 5000 y por tanto permite observar la referencia de velocidad de carga (NP-Ref) del turbogruppo y dado que la Unidad no aplica estrictamente el procedimiento de prueba establecido en el numeral 7.4.2 del Código de Operación para la medición de estatismo, se aplica el siguiente Protocolo de prueba con liberación de carga por Regulación de Velocidad:

1. Arranque normal del Turbogruppo
2. Abrir un Archivo de Grabación del Evento (por una hora mínimo)
3. Sincronizar con el BUS.
4. Programar la carga a 10 MW.
5. Estabilizar las condiciones del Turbogruppo y anotar el valor promedio de carga en bornes del generador que será "**Po**".
6. Tomar la Referencia de Velocidad "**NP-Ref o**" para la carga de prueba.
7. Chequear los valores de PT004 Thrust Balance y PT007 Presión de descarga del compresor en la pantalla del Optrend.
8. Programar el Turbogruppo a una carga de 2 MW con una velocidad de descarga de 2 MW/min.
9. Bajar la carga del Turbogruppo hasta el valor mínimo de enganche 1.6 MW por medio de la perilla "Speed/Load Control Switch 18-1".
10. Tomar la frecuencia del sistema "**Fo**", referida a la velocidad del Turbogruppo "**NP**" en la pantalla del Optrend.
11. Abrir el Breaker 52G y salir de sincronismo.
12. Incrementar lentamente la referencia de velocidad por medio de la perilla "Speed/Load Control Switch 18-1" hasta posicionarla en "**NP-Ref o**".
13. Tomar la lectura de sobrevelocidad de estado estacionario "**NP-Ref**" y referirla como variación de frecuencia "**Fref**".

Consejo Nacional de Operación CNO

14. Chequear los valores de PT004 Thrust Balance y PT007 Presión de descarga del compresor en la pantalla del Optrend.
15. Parar el Turbogruppo.
16. Calcular el valor del estatismo "R" de acuerdo con los valores de frecuencia del sistema "**Fo**", frecuencia de referencia correspondiente a la sobrevelocidad del Turbogruppo "**Fref**", capacidad nominal del Turbogruppo "**Pn**" y el valor de carga inicial de la prueba "**Po**", así:

$$\%R = ((\text{Delta F} / \text{Fo}) / (\text{Po} / \text{Pn})) \times 100$$

donde: $\text{Delta F} = \text{Fref} - \text{Fo}$

Las señales de velocidad del generador eléctrico, generador de gas, turbina de potencia, velocidad de referencia, MW, posición de la apertura de la válvula de gas, feedback de la posición de la válvula de gas, velocidad de toma de carga y demás variables de control quedarán registradas en un archivo abierto para tal fin. La prueba puede ser realizada con las dos turbinas o con una turbina y el resultado será igual ya que la velocidad de referencia es única.

Prueba de Estatismo

Esta prueba de estatismo con liberación de carga por Regulación de Velocidad se realizó el 05 de Octubre del 2001, sobre una generación de 10 MW con una turbina. El archivo de registro de todo el evento de la prueba se encuentra disponible para recrear cada una de los puntos de la prueba. El resultado final fue satisfactorio.

Banda Muerta.

Para la obtención de la Banda Muerta se desarrollo una metodología basada en la curva de Frecuencia medida en la Subestación Dorada vs la curva de Potencia Activa medida en Bornes del Generador. Para realizar la prueba es necesario conocer con anticipación la hora en que se ejecutará ya que es imprescindible grabar esa hora de generación en el sistema Optrend para poder recrear la Potencia Activa en Bornes del Generador en cualquier minuto o segundo de esa hora, donde haya ocurrido el evento de variación de Frecuencia.

Consejo Nacional de Operación

CNO

Además se implementó una gráfica en el Optrend (control del Twinpac) de Frecuencia referida a la velocidad del Generador, donde se puede apreciar la variación inmediata de generación frente a variaciones de frecuencia.

Consejo Nacional de Operación CNO

ANEXO 4

TERMOCANDELARIA

1. INTRODUCCIÓN

Se presenta de manera detallada el procedimiento para realizar la prueba de Regulación Primaria de Frecuencia de la Turbina de Combustión en la planta de TERMOCANDELARIA.

2. DEFINICIONES

Se presentan algunas definiciones básicas para ilustrar claramente el procedimiento de las pruebas.

2.1 VARIACIONES DE FRECUENCIA EN LA RED

La frecuencia de la red en Colombia es de 60 Hz. En condiciones normales de operación esta frecuencia es estable y no presenta variaciones importantes, aproximadamente de 0.1-0.2 Hz. Durante variaciones normales de carga.

Para que la frecuencia de la red permanezca estable, se requiere un equilibrio entre la potencia eléctrica generada y la consumida. Cuando se presenta un desequilibrio, se presenta una variación en la frecuencia. Entre mayor sea el desequilibrio, mayor será la variación de frecuencia.

Durante variaciones normales de la carga, el despacho del CND garantiza el equilibrio entre la demanda y la generación. Los generadores reguladores se encargan de asumir las diferencias entre la demanda estimada y la real. En estas condiciones de operación las variaciones de frecuencia son mínimas y las unidades de generación operan con la carga despachada.

Cuando se producen grandes desconexiones de cargas o generadores, las variaciones en la frecuencia son mayores, por ejemplo 1.0 – 2.0 Hz. O más, dependiendo de la gravedad del evento.

2.2 REGULACIÓN PRIMARIA

Bajo estas condiciones “anormales” de operación, el generador o los generadores reguladores no están en capacidad de restituir el desequilibrio inmediatamente y es necesario que todos los generadores del sistema interconectado modifiquen en un porcentaje la generación de potencia para garantizar la estabilidad del sistema.

Consejo Nacional de Operación

CNO

Esta modificación de la generación de potencia para restituir la frecuencia del sistema al valor nominal, se denomina regulación primaria de frecuencia. En la regulación primaria no hay de por medio participación humana para regular el sistema.

Al mismo tiempo, los nodos reguladores modificarán, hasta donde puedan, la potencia generada para restituir el equilibrio de generación – consumo y garantizar el despacho. Si ese equilibrio no es posible, se realiza un redespacho de generación.

2.3 REGULACIÓN SECUNDARIA

Ese redespacho puede ser automático o manual. Cuando es automático, de manera remota se interviene el regulador de velocidad para incrementar o reducir la potencia de los generadores. De manera manual, se envía un redespacho para modificar la potencia a generar. Estas acciones que no son inmediatas al evento transitorio y que cambian los ajustes de potencia generada se denominan Regulación Secundaria. Se puede concluir que la regulación primaria opera durante el evento transitorio y tiene como propósito garantizar la estabilidad del sistema interconectado. La regulación secundaria opera posteriormente y tiene como propósito equilibrar el despacho y dejar el sistema en condiciones más estables y seguras de operación.

2.4 BANDA MUERTA DE REGULACIÓN PRIMARIA

Es un valor de frecuencia donde no se hace corrección de la potencia generada, es decir, las variaciones de potencia en ese rango no activan la regulación primaria de los generadores. Para TERMOCANDELARIA CT1 y CT2 esa banda muerta es de ± 0.04 Hz. Eso significa que entre 59.96 y 60.04 hz. no hay regulación primaria.

2.5 ESTATISMO

El estatismo es la relación entre la variación de frecuencia y la potencia corregida en la unidad de generación. Entre mayor sea la desviación de frecuencia, mayor debe ser la potencia corregida en la unidad de generación. El valor de estatismo que deben tener las unidades de generación en Colombia debe estar entre el 4% y el 6%.

El algoritmo para estatismo es el siguiente:

X	Y
3384 RPM	+162 Mw
3597.6 RPM	0 Mw
3602.4 RPM	0 Mw
3816 RPM	-162 Mw

X: Valor de revoluciones equivalentes al valor de frecuencia

Y: Valor de potencia a corregir de acuerdo a la variación de frecuencia presentada

Consejo Nacional de Operación

CNO

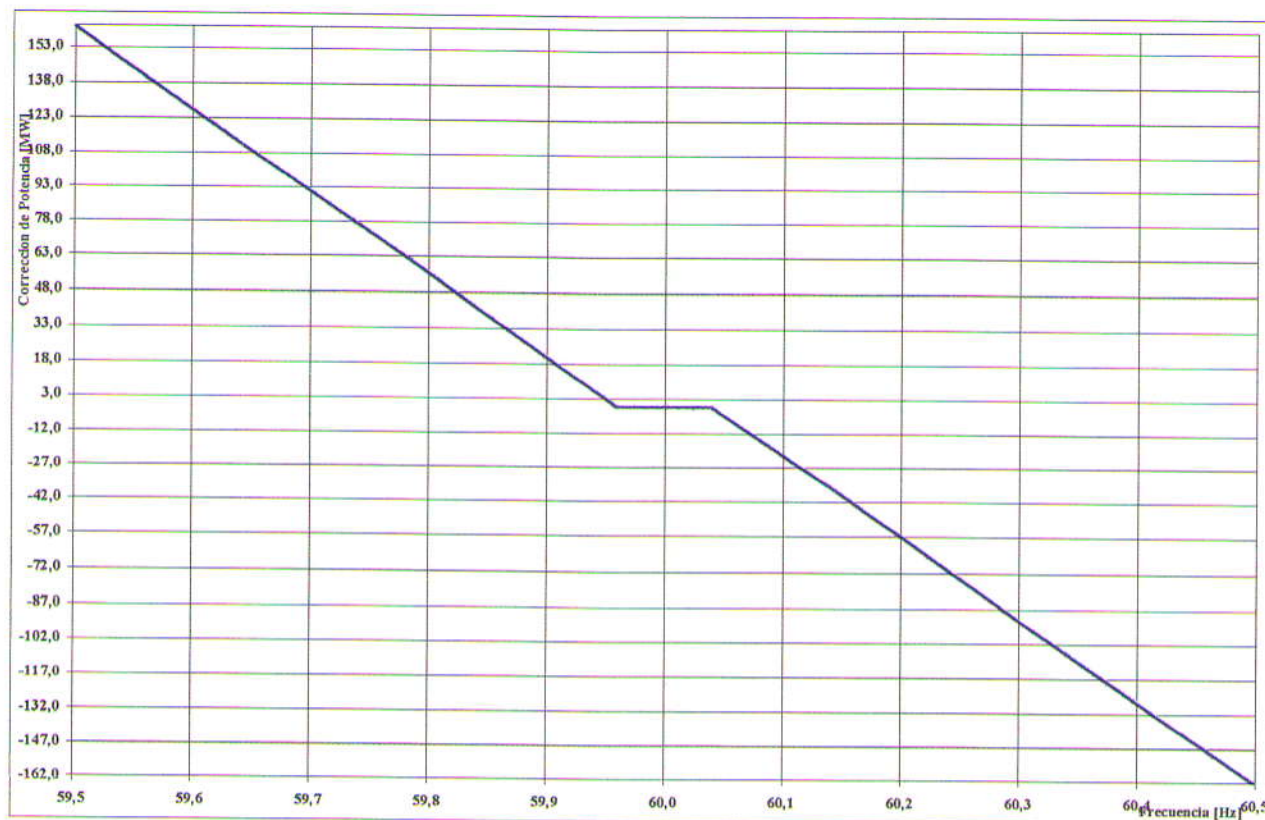
2.6 FUNCIÓN DE REGULACIÓN PRIMARIA

La función de regulación primaria para la planta de TERMOCANDELARIA se presenta gráficamente en la Figura No1.

En la planta TERMOCANDELARIA se ajustó un estatismo del 6%. De acuerdo a requerimientos del CND. Este valor determina las pendientes de las rectas de la gráfica presentada. Analíticamente se calcularon las pendientes y los cruces con los ejes.

Consejo Nacional de Operación CNO

Figura No. 1. FUNCIÓN DE REGULACIÓN PRIMARIA DE FRECUENCIA



3. PRUEBAS DE REGULACION PRIMARIA DE FRECUENCIA

Las pruebas de la función de Regulación Primaria de Frecuencia tiene como propósito verificar la corrección de potencia de la Turbina de Combustión ante las variaciones de frecuencia en la red.

La función de Regulación Primaria de Frecuencia en la Turbina de Combustión se realiza por medio de un algoritmo de control X092 de la DPU de control de la turbina DPU 11 para la CT1 Y DPU 13 para CT 2 programado en el WDPF. El algoritmo tiene programada la curva de regulación que se presentó anteriormente. Permanentemente se registra la velocidad de la máquina, la cual es proporcional a la frecuencia de la red. 3600 r p m equivalen a 60 Hz. Cuando la frecuencia sale del rango de banda muerta, es decir, entre 59.96 y 60.04 hz., el algoritmo calcula la potencia que debe corregir. Por ejemplo, si la máquina esta rodando a 100 MW y se presenta una caída de frecuencia hasta 59.5 hz., la corrección de potencia activa será:

$$F[Hz] = 59.96 - 59.5 = 0.46[Hz]$$

$$P[MW] = 0.46 * 0.91 * 60 = 25.11MW$$

0.46 Desviación de frecuencia ; 0.91 Mw potencia a corregir ; 60: No de ciclos.

Consejo Nacional de Operación CNO

Por lo tanto, la nueva potencia activa que generaría la máquina sería de 125.11 MW. Mientras la frecuencia del sistema permanezca en 59,5 hz. , la potencia será corregida en 0.91 Mw. por cada 0.02 hz.

Para verificar la operación del algoritmo de Regulación de Frecuencia, se simulará una variación en la velocidad de la turbina. Se realizará un registro histórico de la variación del ajuste de potencia y de la potencia de salida.

4. PROCEDIMIENTO DE LA PRUEBA DE REGULACIÓN PRIMARIA

A continuación se presenta un procedimiento detallado de la prueba.

4.1 RANGOS DE OPERACIÓN DURANTE LAS PRUEBAS

Las variaciones de frecuencia se simularán entre 59.5 hz. y 60.5 Hz. Este rango es lo suficientemente ilustrativo de la operación del algoritmo de regulación y no afecta la lógica de protección de la máquina.

La prueba se realizará con una carga estable de la turbina de combustión de 100 MW. Esto con el propósito de que se pueda operar con variaciones de potencia por encima y por debajo de la potencia despachada sin que otros algoritmos de control intervengan en el proceso de la prueba.

4.2 CÁLCULO DE LOS VALORES TEORICOS DE POTENCIA

En la siguiente Tabla se presentan los valores teóricos de potencia activa dependiendo de la variación de frecuencia simulada. Se ha estimado que para la prueba, la potencia generada en la turbina de combustión sea de 100 MW.

Regulación para Baja Frecuencia

Frecuencia [hz.]	P+ [MW]	Po [MW]	P Total [MW]
59,50	25.11	100,00	125.11
59,55	22.38	100,00	122.38
59,60	19.65	100,00	119.65
59,63	18.00	100,00	118.0
59,65	16.92	100,00	116.92
59,70	14.19	100,00	114.19
59,75	11.46	100,00	111.46
59,80	8.73	100,00	108.73
59,85	6.00	100,00	106.00
59,90	3.27	100,00	103.27
59,94	0.91	100,00	100.91
59,96	0,00	100,00	100.00
60,00	0,00	100,00	100.00

Regulación para Alta Frecuencia

Frecuencia [hz.]	P+ [MW]	Po [MW]	P Total [MW]
60,00	0,00	100,00	100.0
60,03	0,00	100,00	100.0
60,05	-0.91	100,00	89.09
60,10	-3.27	100,00	96.73
60,15	-6.00	100,00	94.00
60,20	-8.73	100,00	91.27
60,25	-11.46	100,00	88.54
60,30	-14.19	100,00	85.81
60,35	-16.92	100,00	83.08
60,36	-18.00	100,00	82.00
60,40	-19.65	100,00	80.35
60,45	-22.38	100,00	77.62
60,50	-25.11	100,00	74.89

P+ [MW] es la potencia Activa corregida.

Po [MW] es el ajuste original de Potencia Activa

P Total [MW] es la Potencia Activa que debe entregar la máquina durante las variaciones de frecuencia simuladas.

Consejo Nacional de Operación

CNO

Estos cálculos están basados en el algoritmo A011X092 y A013X092. El registro de este algoritmo se presenta a continuación.

```
XFCTGEN/ 2, NAME = \A011X092\, TUNABLE = YES,
      'GAIN:      ' = 1.00000,
      'BIAS:      ' = 0.00000,
      'SCALE TOP:' = 162.0,
      'SCALE BOT:' = -162.0,
      'TRK RATE: ' = 2.50000,
      'BREAKPTS: ' = 4,
      'X-COORD-1:' = 3384.00,
      'Y-COORD-1:' = 162.0,
      'X-COORD-2:' = 3597.60, 0
      'Y-COORD-2:' = 0,
      'X-COORD-3:' = 3602.4,
      'Y-COORD-3:' = 0.00000,
      'X-COORD-4:' = 3816.0,
      'Y-COORD-4:' = -162.0,
      'X-COORD-5:' = 0.00000,
      'Y-COORD-5:' = 0.00000,
      'X-COORD-6:' = 0.00000,
      'Y-COORD-6:' = 0.00000,
      'X-COORD-7:' = 0.00000,
      'Y-COORD-7:' = 0.00000,
      'X-COORD-8:' = 0.00000,
      'Y-COORD-8:' = 0.00000,
      'X-COORD-9:' = 0.00000,
      'Y-COORD-9:' = 0.00000,
      *'CAS:      ' = \1SE3925S\,
      *'TRACK IN: ' = \U011X094\,
      *'MODE IN:  ' = \N011X094\,
      *'OUTPUT:   ' = \O011X092\,
      *'CMODE OUT:' = \M011X092\,
      *'TRACK OUT:' = \T011X092\
```

4.3 SIMULACIÓN DE LA VARIACIÓN DE FRECUENCIA

Para simular la variación de frecuencia en el algoritmo de Regulación Primaria, se deben modificar las lecturas de velocidad de la máquina. Para lograr tal propósito, se deben forzar las siguientes variables:

```
1SE39250    TURBINE SPEED PICK UP # 1
1SE39251    TURBINE SPEED PICK UP # 2
```

Estas dos lecturas de velocidad entran a un algoritmo que selecciona la mayor de las dos, emite una alarma cuando la variación es mayor de 10 r.p.m.

Sé monitorear la calidad de la velocidad (1SE3925S)

Consejo Nacional de Operación

CNO

* TEXT ALGORITHM #692, QCHK1BAD
QCHK1BAD/692, IN1 = \1SE3925S\, OUT = \1SE3925HIQ\

AREA 1

4.4 MEDICION DE LA BANDA MUERTA

Se realizarán variaciones de frecuencia de 0.02 Hz desde los 60 Hz hacia arriba y hacia abajo. Estas variaciones de frecuencia equivalen a 1.2 r.p.m. Se incrementará la variación hasta llegar a 2.4 r.p.m. Superado ese punto, deben comenzarse a obtener variaciones en el ajuste de la potencia activa. Ese punto de partida de la operación del algoritmo de regulación es el límite de la banda muerta.

4.5 MEDICION DEL ESTATISMO

Definido el estatismo como se hizo anteriormente, se realizarán modificaciones en pasos de 0.05 Hz tanto por encima como por debajo de los 60.0 Hz. Se deben verificar los valores de potencia que se presentaron en el numeral 4.2.

Los cambios se realizarán gradualmente. Hasta que no se haya estabilizado la potencia activa de la máquina, no se realizará un nuevo cambio. Eso significa que la prueba es en régimen estacionario. No es objetivo de esta prueba hacer análisis transitorios de la turbina.

4.6 REGISTROS

A partir de los registros históricos del WDPF, se obtendrán los registros de las variaciones de frecuencia simulada y potencia activa corregida.

Las variables a registrar serán las siguientes:

1ES3925S	Velocidad de la Turbina (Simulada)
O011X092	Potencia Activa que se corrige. En la tabla de los cálculos se presentó como P+ [MW].
1LSMW	Potencia Activa Neta de Salida. En la tabla de los cálculos se presentó como P Total [MW].
O011X093	Ajuste Inicial de Potencia Activa. En la tabla de los cálculos se presentó como Po [MW].
1JT38601S	Potencia Activa Generada. Lectura proveniente de transductores de Potencia Activa.

4.7 RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Los resultados de las pruebas y los registros se tabularán y se graficarán. Se obtendrán porcentajes de error entre el ajuste de potencia teórico, el ajuste de potencia real y la potencia generada.

Finalmente se concluirá si la regulación primaria de frecuencia de la turbina de combustión es adecuada.

Consejo Nacional de Operación

CNO

ANEXO 5

CENTRAL TERMOCENTRO

PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR LA PRUEBA DE ESTATISMO EN LAS

UNIDADES DE COMBUSTION WESTINGHOUSE W501D5

1. INTRODUCCION

Según lo acordado en la reunión No. 069 del Subcomité de Estudios Eléctricos, se presenta el procedimiento para realizar la verificación del estatismo de las unidades de combustión 1 y 2 de Termocentro, basado en el procedimiento presentado por TermoEmcali.

El método se basa en el registro de las variables potencia de las unidades de generación y frecuencia del sistema durante la ocurrencia de eventos de frecuencia.

La central Termocentro cuenta con un sistema de control (WDPF) que maneja el mando sobre la demanda de combustible escogiendo la menor de cuatro señales que son:

1. Salida del controlador de los cambios de potencia de la unidad (rampa de carga)
2. Salida del controlador de temperatura de paso de alabes (control temperatura de alabes)
3. Valor del limitador de carga
4. Salida de control que puede ser:
 - Control de velocidad cuando el interruptor del generador está abierto
 - Control de potencia cuando el interruptor del generador está cerrado

El control de potencia recibe como realimentación de medida:

- La medida de potencia
- Una fracción de la medida de velocidad que obedece a la función de estatismo.

Del sistema de control distribuido DCS (WDPF) podemos obtener las tendencias o variaciones en el tiempo (con resoluciones de hasta 1 s) de las diferentes variables que intervienen en la regulación primaria. Los datos se pueden presentar en forma de tabla o gráfico, con todas las variables que se necesiten graficar.

2. DEFINICIONES

Consejo Nacional de Operación

CNO

Regulación Primaria

De acuerdo con la resolución CREG 023-2001, es el servicio en línea que corresponde a la variación automática, mediante el regulador de velocidad, de la potencia entregada por la unidad de generación como respuesta a cambios de frecuencia en el sistema.

Los tiempos característicos de respuesta están entre 0 y 10 segundos. La variación de carga del generador debe ser sostenible al menos durante los siguientes 30 segundos.

Estatismo

Característica técnica de una planta y/o unidad de generación, que determina la variación porcentual de la frecuencia por cada unidad de variación porcentual de la carga

$$\text{Estatismo}[\%] = \frac{\frac{\Delta \text{Frecuencia}[\text{Hz}]}{\text{Frecuencia Nominal}[\text{Hz}]} [\%]}{\frac{\Delta \text{Potencia}[\text{MW}]}{\text{Potencia Nominal}[\text{MW}]}}$$

3. CURVA DE ESTATISMO

La unidades de la planta tienen un ajuste de estatismo que obedece a una función con parámetros ajustados en el sistema de control en el Algoritmo A011X092. Lo anterior significa que la respuesta del control de potencia por efectos de los cambios de velocidad serán cero (0) siempre que estos cambios sean menores del valor de banda muerta. En caso de cambios mayores, la respuesta obedece al algoritmo mencionado.

4. PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICION DEL ESTATISMO

La verificación del estatismo de las unidades de combustión, se obtendrá de los registros almacenados en el sistema de supervisión y control WDPF con un tiempo de muestreo variable de acuerdo con la duración del evento, los cuales serán impresos para realizar el cálculo respectivo

Consejo Nacional de Operación

CNO

Se monitorearán permanentemente los siguientes puntos, los cuales siempre permanecerán en el computador de históricos de la planta.

- **JT12610** para la frecuencia del sistema en Hz (línea Termocentro - Primavera 1)
- **SE151HIS** para la velocidad de la unidad N°1 en r.p.m.
- **JT16001S** para la potencia de la unidad N°1 en MW
- **JT22610** para la frecuencia del sistema en Hz (línea Termocentro - Primavera 2)
- **SE251HIS** para la velocidad de la unidad N°2 en r.p.m.
- **JT26001S** para la potencia de la unidad N°2 en MW

5. DURACION DE LA PRUEBA:

La duración de la prueba debe corresponder al tiempo de duración del evento de frecuencia. Permanentemente se tienen monitoreadas las variables definidas anteriormente y se almacenan en el computador de registro cronológico e histórico de eventos de la planta.

6. REGISTRO DE LAS VARIABLES DURANTE LA PRUEBA

Consejo Nacional de Operación CNO

[illegible]