CONSEJO NACIONAL DE OPERACIÓN
CNO

ACUERDO No. 495
Junio 4 de 2010

Por el cual se aprueban los protocolos para la medición de estatismo y banda muerta de las unidades y plantas de generación

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, el Anexo general de la Resolución CREG 025 de 1995, su Reglamento Interno y según lo definido en la reunión 328 del 4 de junio de 2010.

CONSIDERANDO:

1. Que de acuerdo al artículo tercero de la Resolución CREG 023 de 2001: *"Las unidades y plantas del Sistema deben garantizar el valor de estatismo declarado al Centro Nacional de Despacho (CND). Se debe efectuar la prueba de estatismo especificada en el Numeral 7.5.2 Prueba de Estatismo con la periodicidad establecida y procedimientos establecidos por el CNO."*

2. Que de acuerdo al parágrafo del artículo tercero de la Resolución CREG 023 de 2001, dentro de los doce meses siguientes a la entrada en vigencia de la Resolución en mención, todas las plantas y unidades despachadas centralmente debieron efectuar una prueba de los parámetros relacionados con el servicio de regulación primaria de frecuencia.

3. Que mediante el Acuerdo 158 de 2001 se aprobaron los protocolos para la medición de estatismo de algunas unidades de generación (Guatapé, Guadalupe 3 y 4, Riogrande I, Troneras, La Tasajera, Porce, Playas, Termosierra, Barranca 1, 2, 4 y 5, Palenque 3, Paipa 1, 2 y 3, Guavio, Paraíso, Guaca y Betania y los protocolos para la medición de banda muerta de las unidades y/o plantas de generación de Barranca 1, 2, 3, 4 y 5, Palenque 3, Guavio, Paraíso, Guaca y Chivor.

4. Que mediante el Acuerdo 171 de 2001 se aprobaron los protocolos para la medición de estatismo de las plantas Calima, Salvajina, Bajo Anchicayá, Chivor, Alto Anchicayá y Urrá.

5. Que mediante el Acuerdo 178 de 2001 se aprobaron los protocolos para la medición de estatismo de las plantas Termoemcali, Termoguajira, Termotasajero, Termo Barranca 3, San Carlos y Colegio, Canoas- Salto- Laguneta.

6. Que mediante el Acuerdo 189 de 2001 se aprobaron los protocolos para la medición de estatismo de las plantas San Francisco, Termoflores, Termodorada, Termocandelaria, y Termocentro.

7. Que mediante el Acuerdo 190 de 2001 se aprobaron los protocolos de los reguladores de velocidad de las unidades y plantas de generación del SIN, el cual debe ser usado para la medición de la banda muerta de todas la unidades y plantas de generación del Sistema Interconectado Nacional.

8. Que mediante el Acuerdo 201 de 2001 se aprobaron los protocolos para la medición de estatismo de las plantas Termovalle, Esmeralda, Termozipa, Paipa 4 y Proeléctrica.

9. Que mediante el Acuerdo 217 de 2001 se aprobaron los protocolos para la medición de estatismo de la planta Tebsa, las unidades Barranquilla 3 y 4, la central hidroeléctrica Hidroprado y la planta de Termocartagena.

10. Que mediante el Acuerdo 354 de 2006 se aprobó un procedimiento alterno para realizar las pruebas de estatismo en las unidades y plantas del Sistema Interconectado Nacional.

11. Que mediante el Acuerdo 359 de 2006 se autorizó la utilización de los eventos de frecuencia ocurridos después del 1 de diciembre de 2005, para cumplir con las pruebas de estatismo y banda muerta.

12. Que el Subcomité de Estudios Eléctricos recomendó la adopción de protocolos generales para realizar las pruebas de estatismo y banda muerta de las unidades y/o plantas del Sistema Interconectado Nacional.

13. Que el Comité de Operación recomendó en su reunión 189 del 27 de agosto de 2009 la expedición del presente Acuerdo.

ACUERDA:

PRIMERO: Aprobar los protocolos para la medición de estatismo y banda muerta en las plantas y/o unidades de generación conectadas al SIN, que se adjuntan en el Anexo que hace parte integral del presente Acuerdo.

SEGUNDO: Las plantas y/o unidades de generación deberán acogerse a uno cualquiera de los protocolos aprobados mediante este Acuerdo.

En el caso de que una planta y/o unidad de generación no lo pueda hacer por restricciones técnicas, deberá presentar para concepto favorable del Subcomité de Estudios Eléctricos un nuevo protocolo de pruebas.

Previo análisis y recomendación del Comité de Operación, el Consejo Nacional de Operación expedirá un Acuerdo por el cual se apruebe el nuevo protocolo de medición de estatismo y banda muerta y se adicione al Anexo de protocolos del presente Acuerdo.

TERCERO: Para efectos de la realización de los cálculos para cumplir con las pruebas de estatismo y banda muerta se autoriza la utilización de los registros de eventos de frecuencia ocurridos durante la operación de las unidades y/o plantas en el año inmediatamente anterior a la fecha de realización de la prueba.

CUARTO: El presente Acuerdo rige a partir de la fecha de su expedición y sustituye los Acuerdos 158, 171, 178, 189, 190, 201 y 217 de 2001 y los Acuerdos 354 y 359 de 2006.

El Presidente Ad-hoc,

WILMAN GARZON RAMIREZ

El Secretario Técnico,

ALBERTO OLARTE AGUIRRE

INDICE ANEXO

- **Protocolo A**: Protocolo para prueba de estatismo permanente
- **Protocolo B**: Protocolo para prueba de estatismo y banda muerta mediante el registro de frecuencia-potencia durante eventos reales del sistema.
- **Protocolo C**: Protocolo para prueba de estatismo y banda muerta
- **Protocolo D**: Protocolo para prueba de estatismo y banda muerta

ANEXO

PROTOCOLO A

PRUEBA DE ESTATISMO PERMANENTE

1. OBJETO

Documentar el procedimiento general para la verificación del parámetro de estatismo permanente de las unidades de generación de energía.

2. ALCANCE

Este procedimiento se realizara en las unidades de generación del Sistema Interconectado Nacional que puedan medir la señal de velocidad por intermedio de los PT´s.

3. DEFINICIONES

Curva característica de regulación de velocidad: Curva que indica la relación entre el valor de frecuencia y el valor de potencia de salida del generador.

Estatismo permanente: Pendiente de la curva característica de regulación de velocidad en el punto considerado.

4. GENERALIDADES

4.1 Antecedentes

La realización de esta prueba en unidades de generación donde el aumento o disminución de potencia se realiza solo aumentando o disminuyendo el Setpoint de potencia requiere que se realicen modificaciones en el software o en el cableado de los reguladores de turbina lo que hace la prueba algo compleja.

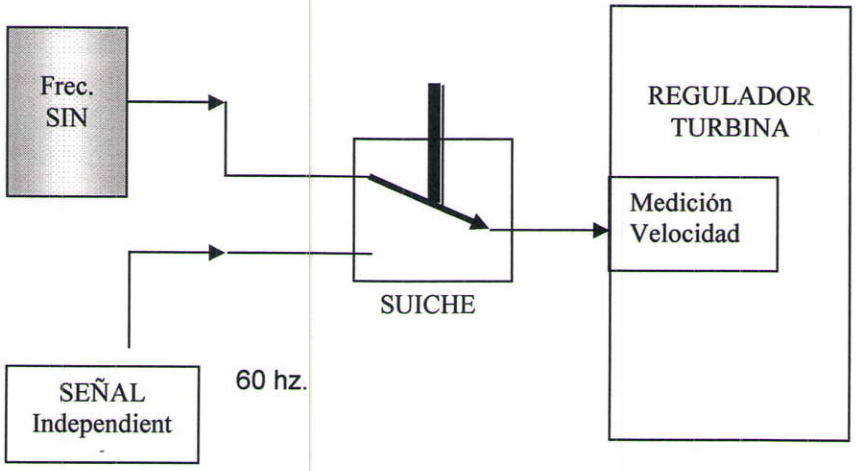
La **IEC 308/70 International code for testing of Speed governing systems for hydraulic turbines,** recomienda una prueba para la medición del estatismo permanente que se adapta mejor al tipo de reguladores turbina realimentados por PT´s.

4.2 Procedimiento

La prueba recomendada por la IEC 308/70, en general, consiste en:

1. Conectar la unidad generadora al SIN

2. Conmutar a una señal independiente, equivalente de velocidad (para conmutar sin oscilaciones), el dispositivo de medición de velocidad (Generador externo).

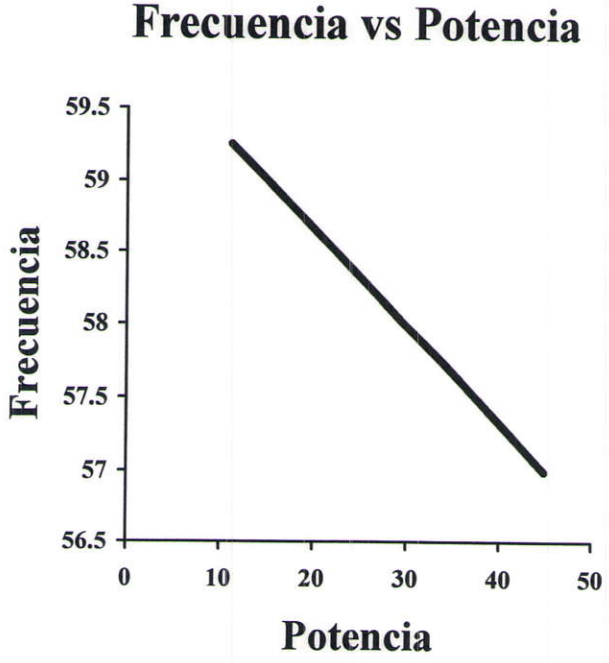


3. Realizar la curva característica de regulación de velocidad.

Se deben obtener mínimo 5 registros de frecuencia inyectada contra potencia de salida del generador, luego que se establecen condiciones de equilibrio para cada cambio de frecuencia. En lo posible se debe cubrir el rango de operación de potencia de la unidad.

La siguiente gráfica ilustra una curva característica obtenida en una prueba realizada en una unidad generadora de una potencia nominal de 45 MW y un estatismo permanente del 5%.

	Frecuencia	Potencia	
•	59.25	11.2	
•	59	15.1	4.81
•	58.5	22.4	5.14
•	58	29.7	*5.14*
•	57.75	33.7	*4.69*
•	57	44.8	*5.07*
Estatismo Permanente			*4.97*



5. EQUIPO REQUERIDO

Generador de frecuencia externo (preferiblemente equipo patrón de buenas características).

Software de adquisición de datos en tiempo real ó equipo portátil configurable para graficar variables (Frecuencia y Potencia).

PROTOCOLO B

"PROCEDIMIENTO PARA PRUEBAS DE ESTATISMO Y BANDA MUERTA MEDIANTE EL REGISTRO DE FRECUENCIA-POTENCIA DURANTE EVENTOS REALES DEL SISTEMA"

METODO 1. REGISTROS DURANTE UN EVENTO REAL

INTRODUCCIÓN

Se presenta de manera detallada el procedimiento para realizar la prueba de Estatismo de cualquier planta de generación.

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

Regulación Primaria

40

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 mas 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.*

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:

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

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

La función de regulación primaria para la planta de TERMOEMCALI se presenta gráficamente en la Figura No. 1. Se puede observar que la curva está compuesta por una banda muerta y dos pendientes asociadas con el estatismo.
En la planta de TERMOEMCALI se seleccionó un estatismo del 5%. Este valor determina las pendientes de las rectas de la gráfica presentada. Analíticamente se calcularon las pendientes y los cruces con los ejes.
La corrección de potencia activa debe limitarse para evitar un disparo por sobrecarga cuando se está generando en carga base. Esta potencia se limitó a 17 MW, lo cual corresponde al 7% de la potencia nominal del ciclo combinado de TERMOEMCALI.
En la Ecuación P [MW] es la potencia activa a corregir, f [Hz] es la frecuencia de la red. Las ecuaciones de Regulación Primaria para la Planta de TERMOEMCALI son las siguientes:

$$P[MW] = 17.2\,MW \qquad para\ f \leq 59.64\,Hz$$
$$P[MW] = -f \times 52.13 + 3126.44\,MW \qquad para\ 59.64 \leq f \leq 59.97\,Hz$$
$$P[MW] = 0 \qquad para\ 59.97\ \pi\ f\ \pi\ 60.03\,Hz$$
$$P[MW] = -f \times 52.13 + 3129.56\,MW \qquad para\ 60.36 \geq f \geq 60.03\,Hz$$
$$P[MW] = -17.2\,MW \qquad para\ f \geq 60.36\,Hz$$

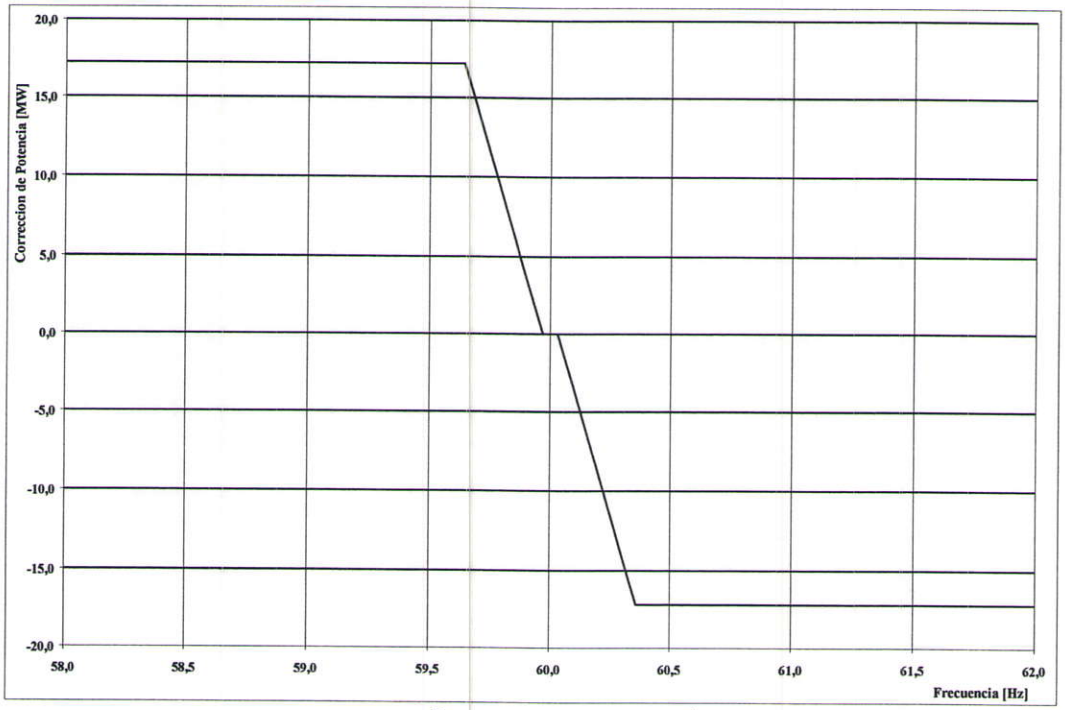
Prueba de Estatismo

La prueba estatismo tiene como propósito verificar la corrección de potencia de la Turbina de Combustión ante las variaciones de frecuencia en la red.
La función de Regulación Primaria de Frecuencia en la Turbina de Combustión se realiza por medio de un algoritmo de control programado en el WDPF. El WDPF es un Sistema de Control Distribuido que controla y regula toda la planta.
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 59.97 y 60.03 Hz, el algoritmo calcula la potencia que debe corregir. Por ejemplo, si la máquina esta rodando a 110 MW y se presenta una caída de frecuencia hasta 59.7 Hz, la corrección de potencia activa será:

$$P[MW] = -59.7 \times 52.13 + 3126.44[MW] \qquad P[MW] = 14.08\,MW$$

Por lo tanto, la nueva potencia activa que generaría la máquina sería de 124.08 MW. Mientras la frecuencia del sistema permanezca en 59.7 Hz, la potencia será corregida en 14.08 MW.
Para verificar el estatismo de la máquina, se registraran tanto la Velocidad de la Turbina como la Potencia Activa Generada durante un evento importante de variación de Frecuencia.



Puntos

[Hz]	[MW]
58,00	17,2
59,64	17,2
59,97	0,0
60,00	0,0
60,03	0,0
60,36	-17,2
62,00	-17,2

Constantes

-52,13 m
3126,436 b1
3129,564 b2

Figura No. 1. FUNCIÓN DE REGULACIÓN PRIMARIA DE FRECUENCIA

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.

En el protocolo de pruebas que se adjunta, se indican las características del generador y del equipo de registro empleado para la prueba.

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 mas importantes, se elaborará un protocolo de prueba.

Cálculo de los valores teóricos 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 110 MW.

Regulación para Baja Frecuencia

Frecuencia [Hz]	P+ [MW]	Po [MW]	P Total [MW]
59,50	17,20	110,00	127,20
59,55	17,20	110,00	127,20
59,60	17,20	110,00	127,20
59,64	17,20	110,00	127,20
59,65	16,68	110,00	126,68
59,70	14,08	110,00	124,08
59,75	11,47	110,00	121,47
59,80	8,86	110,00	118,86
59,85	6,26	110,00	116,26
59,90	3,65	110,00	113,65
59,95	1,04	110,00	111,04
59,97	0,00	110,00	110,00
60,00	0,00	110,00	110,00

Regulación para Alta Frecuencia

Frecuencia [Hz]	P+ [MW]	Po [MW]	P Total [MW]
60,00	0,00	110,00	110,00
60,03	0,00	110,00	110,00
60,05	-1,04	110,00	108,96
60,10	-3,65	110,00	106,35
60,15	-6,26	110,00	103,74
60,20	-8,86	110,00	101,14
60,25	-11,47	110,00	98,53
60,30	-14,08	110,00	95,92
60,35	-16,68	110,00	93,32
60,36	-17,20	110,00	92,80
60,40	-17,20	110,00	92,80
60,45	-17,20	110,00	92,80
60,50	-17,20	110,00	92,80

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

```
XFCTGEN/ 2,  NAME = \A011X092\,  TUNABLE = YES,
          'GAIN:     ' =   1.00000,
          'BIAS:     ' =   0.00000,
          'SCALE TOP:' =   17.2040,
          'SCALE BOT:' =  -17.2040,
          'TRK RATE: ' =   2.50000,
          'BREAKPTS: ' =      6,
          'X-COORD-1:' =   3420.00,
          'Y-COORD-1:' =   17.2040,
          'X-COORD-2:' =   3398.40,
          'Y-COORD-2:' =   17.2040,
          'X-COORD-3:' =   3598.20,
```

```
'Y-COORD-3:' =   0.00000,
'X-COORD-4:' =   3601.80,
'Y-COORD-4:' =   0.00000,
'X-COORD-5:' =   3621.60,
'Y-COORD-5:' =  -17.2040,
'X-COORD-6:' =   3780.00,
'Y-COORD-6:' =  -17.2040,
'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\
```

Medición del Estatismo

Definido el estatismo como se hizo anteriormente, se realizarán cálculos del estatismo con base en los registros obtenidos.
En el protocolo adjunto se presenta un ejemplo de prueba con las ecuaciones que se deben aplicar para calcular el estatismo.

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 planta se cuenta con la posibilidad de tomar registros a través del WDPF con un tiempo de muestreo de un segundo y a través del Relé de Protección de Generador BECKWITH, el cual captura formas de onda pero solo durante algunos ciclos.
Si se desea obtener registros de mayor resolución y durante un período mayor de tiempo, se puede emplear el registrador de fallas de Guachal, pero hay que tener en cuenta que este registra la potencia Activa neta de toda la planta
Otra opción es instalar un equipo de registro el mes seleccionado para las pruebas. Las características de los registradores a emplear serían las siguientes:

- Período de muestreo: 100 ms máximo.
- Precisión: 5% máximo. La precisión no es un factor crítico, ya que el cálculo de estatismo se realiza sobre variaciones de los parámetros registrados y no sobre valores exactos.

Resultados y Conclusiones

Los resultados de las pruebas y los registros se tabularán y se graficarán tal como se presenta en el protocolo anexo.
Finalmente se concluirá si el estatismo de la unidad es adecuado.

PROTOCOLO C

PROTOCOLO PRUEBA DE ESTATISMO Y BANDA MUERTA

1. INTRODUCCION

La resolución CREG-023/2001 establece la obligatoriedad de realizar las pruebas de estatismo en las plantas del SIN. Debido a que no se tenía un procedimiento claro para realizar estas pruebas se hicieron las consultas con los fabricantes, pero ellos no reportaron ningún procedimiento hasta la fecha.

Debido a lo anterior, se diseñó un procedimiento para realizar dichas pruebas y es así como el 30 de agosto de 2001 se realizaron pruebas de estatismo de las unidades 1 y 2 de la planta Termoguajira, de acuerdo con el procedimiento descrito mas adelante.

2. 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 los cambios de frecuencia en el sistema.

3. BANDA MUERTA DE LA REGULACIÓN PRIMARIA

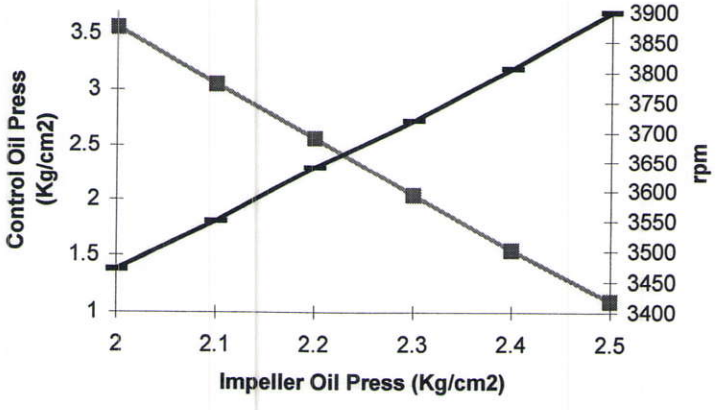
Algunas unidades de generación pueden tener una banda muerta del regulador de velocidad, es decir, es una banda de frecuencia determinada por debajo de la cual el regulador de velocidad no actúa, es decir, no hay variaciones de potencia frente a variaciones de frecuencia. Para el caso de las unidades de Termoguajira el ajuste actual de banda muerta es □ 50 mHz.

4. ESTATISMO

Las unidades de Termoguajira fueron ajustadas en el sistema de control del regulador de velocidad de acuerdo con una curva No. 1 del 4% para el gobernador.

CURVA No. 1 – (Ajuste del gobernador de turbina 4%)

CONTROL OIL SETTING CURVE



DESCRIPCION DEL PROCEDIMIENTO

Características técnicas de las unidades:

Potencia nominal: 160 Mw
Velocidad nominal 3600 rpm
Frecuencia nominal: 60 Hz
Tensión nominal: 13.8 Kv
Tipo de turbina: MITSUBISHI

Equipos utilizados

Analizador de redes CIRCUTOR AR.5
Software ANALIZER
Multímetro digital
Computador portátil.

Descripción del regulador de velocidad.

Los controles de velocidad y variación de carga de turbina operan hidráulicamente. Los servomotores (mecanismos de accionamiento de las válvulas), se posicionan por cualquiera de los siguientes dispositivos: gobernador principal, limitador de carga, convertidor electro hidráulico y el gobernador auxiliar. Para controlar la admisión de vapor y turbina, el dispositivo de menor presión de aceite ejerce el control. La respuesta de las unidades es netamente mecánica gobernada por la presión de la bomba principal de aceite acoplada al eje de turbina.

En condiciones normales de operación, el control de velocidad de turbina actua como cambiador de carga con la frecuencia del sistema. El control se ejecuta a través del convertidor electro hidráulico (EH), por lo tanto, cualquier perturbación en la frecuencia se traduce en variación de carga para mantener la velocidad de turbina en los rangos de 3597 rpm (59.95 Hz) a 3603 rpm (60.05 Hz). Fuera de este rango la unidad varia carga de acuerdo con el droop ajustado del 4%.

El convertidor electro hidráulico a su vez se controla a través del control digital directo (DDC) DIASYS-UP.

Las unidades de Termoguajira por diseño se deben ajustar a un limite máximo del 6% de 3600 rpm de velocidad nominal, es decir que el limite superior es de 3816 rpm (+6%) y el limite inferior es de 3384 rpm (-6%). Actualmente los ajustes están así : el limite superior es de 3820 rpm y el limite inferior es de 3374 rpm. Para velocidades fuera de estos rangos actuán los dispositivos de seguridad (DUMP VALVE) y protección, quedando la unidad en posición de no carga.

Pruebas de regulación primaria

Esta prueba tiene como objeto verificar la corrección de potencia de las unidades ante las variaciones de frecuencia de la red.

La función de regulación primaria de frecuencia se realiza por medio de un algoritmo de control que tiene programada la curva de regulación y permanentemente registra la

velocidad de la unidad, la cual es proporcional a la frecuencia de la red (3600 rpm) que equivale a 60 Hz, cuando la frecuencia se sale del rango de banda muerta □ 50 mHz, el algoritmo calcula la potencia que debe corregir y actúa el regulador de velocidad generando la unidad un nuevo valor de potencia activa.

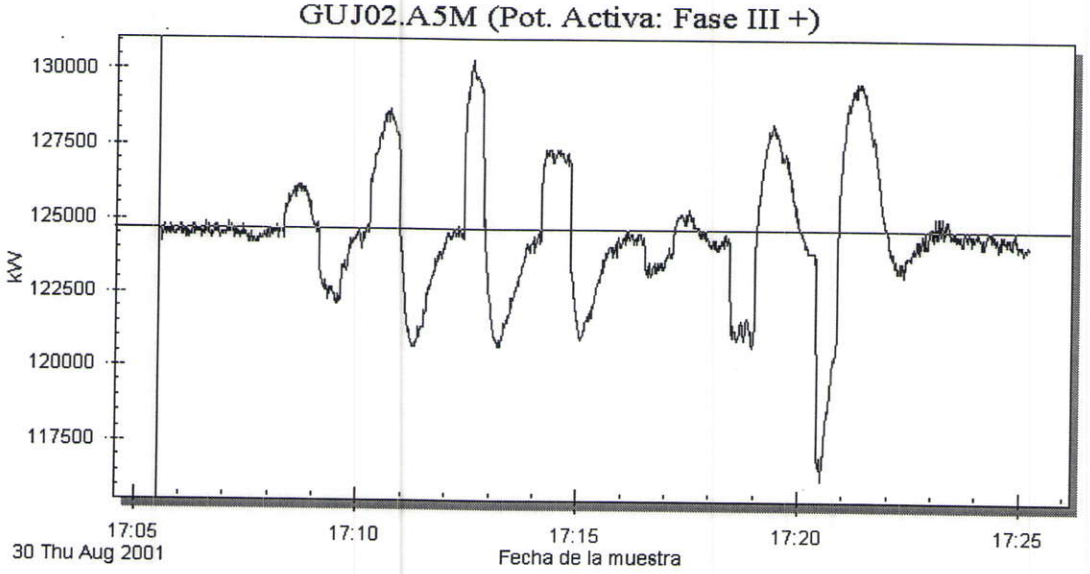
Se varió la carga simplemente variando la referencia de velocidad en el diagrama de control digital de turbina por encima de 3604 rpm y en el rango inferior debajo de 3597 rpm, y se observó la respuesta de carga para cada referencia de velocidad ajustada. El estatismo esperado para estas unidades es del 4.4%.

Para las variaciones de la referencia de la velocidad en el diagrama de control digital de turbina dentro del rango de banda muerta (□ 3 rpm) no se presentaron variaciones de potencia en las unidades.

Se conectó el analizador de redes en puntos de medidas en bajo voltaje y de corriente, en bornes del generador de cada unidad para tomar registros de la potencia entregada por la unidad.

Paralelamente se tomaron lecturas de potencia y la frecuencia, las cuales se monitorearon con el sistema de la planta.

Se realizaron pruebas en cada unidad para obtener la curva de estatismo en una carga de 126 Mw, para diferentes puntos de frecuencia. En el control de las unidades se modificó la referencia de 3600 rpm obteniéndose la siguientes gráficas:



Act : [30/08/2001 17:05:32]
Act : 124683 (kW)
30 Thu Aug 2001

Desde : [30/08/2001 17:05:32]
Máx : 130351 (kW)
Fecha de la muestra

Hasta : [30/08/2001 17:25:12]
Mín : 116237 (kW)

Act : [30/08/2001 15:45:00]
Act : 107433 (kW)

Desde : [30/08/2001 15:45:00]
Máx : 139602 (kW)

Hasta : [30/08/2001 16:42:48]
Mín : 0 (kW)

De los datos obtenidos de □f y □P se calcula el valor real del estatismo de la unidad.

$$S = \frac{\Delta F / F_n}{\Delta P / P_n} * 100$$

Donde S : estatismo

□F = Fo - Ff

Fo : Valor de velocidad de la unidad (frecuencia del sistema) antes de variar la referencia de la frecuencia = 60 Hz

Ff : Valor de velocidad de la unidad (en frecuencia) después de variar la referencia de la frecuencia.

Fn : Frecuencia nominal = 60 Hz

□P = Po - Pn

Po : Valor de la potencia de la unidad en el mismo instante t en el que se tomó el valor de Fo.

Pf : Valor hasta el cual llega la potencia por corrección, dado en un instante t+1.

Pn : Potencia nominal de la unidad

Esta metodología nos permitió calcular el estatismo de cada unidad cuando se encuentra conectada al SIN, con lo cual obtuvimos un resultado acorde con la realidad en la que las unidades de Termoguajira operan.

Con base en la información obtenida de las pruebas de campo que se efectuaron a las unidades y su posterior evaluación, se fundamenta el cumplimiento de la prestación efectiva del Servicio de Regulación Primaria de Frecuencia de la Planta Termoguajira acorde con lo establecido por la resolución CREG 023 de 2001.

PROTOCOLO D

1. Objetivo

El objetivo del protocolo es verificar el valor de estatismo y banda muerta para plantas térmicas a vapor marca MITSUBISHI, cuya velocidad nominal sea de 3600 RPM y estén equipadas con regulador de velocidad Digital y convertidor Electro Hidráulico – DEH.

2. Programación de la prueba

Para la ejecución del protocolo la unidad de generación deberá declararse en PRUEBAS durante dos (2) períodos consecutivos.

3. Condiciones de la prueba

3.1 La unidad de generación deberá estar operando en modo CONTROL COORDINADO con una carga del 75 %

3.2 La unidad de generación deberá estar quemando sólo el combustible principal.

3.3 El módulo de control de stress térmico de la turbina deberá estar fuera de servicio durante la prueba.

4. Procedimiento para la prueba

El set point de velocidad deberá cambiarse temporalmente en la lógica de control del sistema DEH (Digital Electro Hidraulic) a diferentes valores. Al aplicar la nueva consigna de velocidad se deberá observar la variación en la carga de la unidad.

Deberán realizarse 12 pruebas en las cuales se deberá cambiar el set point de velocidad, de la siguiente forma:

1 De 3600 rpm a 3605 rpm
2 De 3605 rpm a 3600 rpm
3 De 3600 rpm a 3610 rpm
4 De 3610 rpm a 3600 rpm
5 De 3600 rpm a 3615 rpm
6 De 3615 rpm a 3600 rpm
7 De 3600 rpm a 3595 rpm
8 De 3595 rpm a 3600 rpm
9 De 3600 rpm a 3590 rpm
10 De 3590 rpm a 3600 rpm
11 De 3600 rpm a 3585 rpm
12 De 3585 rpm a 3600 rpm

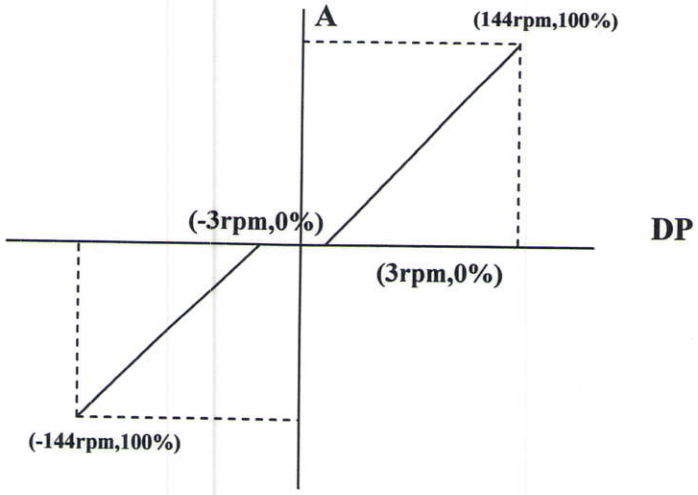
Para cada prueba se deberá registrar el set de velocidad y la carga de la unidad antes y después de la prueba. Estos datos se usan para calcular el estatismo de la máquina.

5. Registro de datos y cálculo del estatismo

Los Cálculos se realizan definiendo primero las siguientes variables:

SG: Set de velocidad
F0: Velocidad de turbina antes de la prueba (rpm)
P0: Carga de la unidad antes de la prueba (MW)
FF: Velocidad de turbina después de la prueba (rpm)
PF: Carga de la unidad después de la prueba (MW)
DF: Variación de velocidad, dado por DF = FF – F0 (rpm)
DP: Variación de carga, dado por DP = PF – P0 (MW)
A: Función de control no lineal programada en la lógica del sistema DEH que determina la banda muerta del regulador. Está dada por A = 1.021 * DF □ 3.063
R: Estatismo de la unidad, el cual está dado por R = [(A / 3600) / (DP / 163)] * 100 (%)

La curva correspondiente a la función de control no lineal (A) se muestra a continuación:



Los datos obtenidos en cada prueba deberán registrarse en la siguiente tabla:

Prueba	Antes de la prueba			Después de la prueba			CALCULOS			
	SG	F0	P0	SG	FF	PF	DF	A	DP	R
1	3600			3605						
2	3605			3600						
3	3600			3610						
4	3610			3600						
5	3600			3615						
6	3615			3600						
7	3600			3595						
8	3595			3600						
9	3600			3590						
10	3590			3600						
11	3600			3585						
12	3585			3600						

En cada prueba se deberá calcular el estatismo y posteriormente se calcula un promedio de los datos obtenidos, el cual será considerado como el valor de estatismo al que opera la máquina.

6. Banda Muerta

La verificación de la banda muerta se realizará mediante inspección por el método gráfico y deberá confirmarse que para una variación de frecuencia menor a 59.97 Hz (□F = 30 mHz) la carga activa del generador no debe modificarse.