

CONSEJO NACIONAL DE OPERACIÓN CNO

ACUERDO No. 178
Octubre 19 de 2001

Por el cual se aprueban los protocolos para la medición de estatismo de algunas unidades de generación

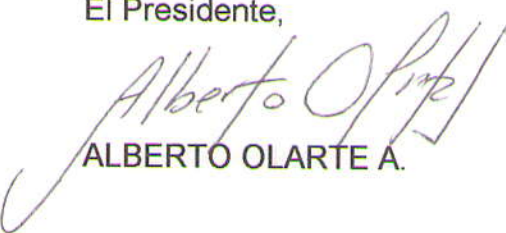
El Consejo Nacional de Operación en uso de sus facultades legales y reglamentarias, en especial las conferidas en el Artículo 36 de la Ley 143 de 1994, la Resolución 8-0103 del 2 de febrero de 1995 del Ministerio de Minas y Energía, el Anexo general de la Resolución CREG 025 de 1995, y según lo definido en la reunión No. 162 del 17 de octubre de 2001

ACUERDA:

PRIMERO: Aprobar los protocolos de medida de estatismo de las plantas Termoemcali, Termoguajira, Termotasajero, Termo Barranca 3, San Carlos y Colegio, Canoas- Salto- Laguneta, a que se refieren los Anexos 1 al 6, que forman parte integral del presente Acuerdo.

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

El Presidente,


ALBERTO OLARTE A.

El Secretario Técnico,


GERMAN CORREDOR A.

CONSEJO NACIONAL DE OPERACIÓN CNO

ACUERDO No. 178
Octubre 19 de 2001

Por el cual se aprueban los protocolos para la medición de estatismo de algunas unidades de generación

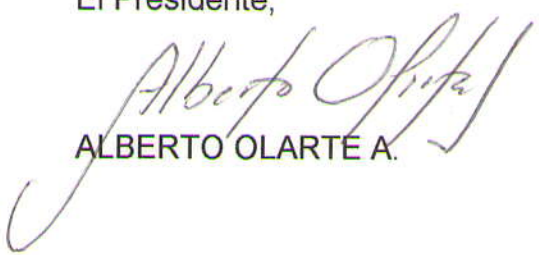
El Consejo Nacional de Operación en uso de sus facultades legales y reglamentarias, en especial las conferidas en el Artículo 36 de la Ley 143 de 1994, la Resolución 8-0103 del 2 de febrero de 1995 del Ministerio de Minas y Energía, el Anexo general de la Resolución CREG 025 de 1995, y según lo definido en la reunión No. 162 del 17 de octubre de 2001

ACUERDA:

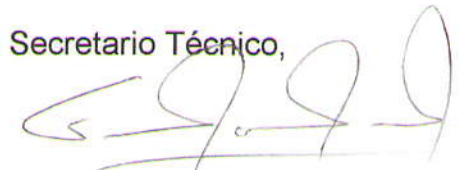
PRIMERO: Aprobar los protocolos de medida de estatismo de las plantas Termoemcali, Termoguajira, Termotasajero, Termo Barranca 3, San Carlos y Canoas- Salto- Laguneta, a que se refieren los Anexos 1 al 6, que forman parte integral del presente Acuerdo.

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

El Presidente,


ALBERTO OLARTE A.

El Secretario Técnico,


GERMAN CORREDOR A.

Consejo Nacional de Operación CNO

ANEXO 1 TERMOEMCALI

PROCEDIMIENTO PARA PRUEBA DE ESTATISMO TURBINAS W501F

METODO 1. REGISTROS DURANTE UN EVENTO REAL

INTRODUCCIÓN

Se presenta de manera detallada el procedimiento para realizar la prueba de Estatismo de la Turbina de Combustión en la planta de TERMOEMCALI.

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.

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.

Consejo Nacional de Operación CNO

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 mas 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.

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:

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:

Consejo Nacional de Operación

CNO

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:

$$\begin{array}{ll} P[MW] = 17.2 MW & \text{para } f \leq 59.64 \text{ Hz} \\ P[MW] = -f \times 52.13 + 3126.44 MW & \text{para } 59.64 \leq f \leq 59.97 \text{ Hz} \\ P[MW] = 0 & \text{para } 59.97 \leq f \leq 60.03 \text{ Hz} \\ P[MW] = -f \times 52.13 + 3129.56 MW & \text{para } 60.03 \leq f \leq 60.36 \text{ Hz} \\ P[MW] = -17.2 MW & \text{para } f \geq 60.36 \text{ Hz} \end{array}$$

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

Consejo Nacional de Operación

CNO

la máquina esta rodando a 110 MW y se presenta una caída de frecuencia hasta 59.7 Hz, la corrección de potencia activa será:

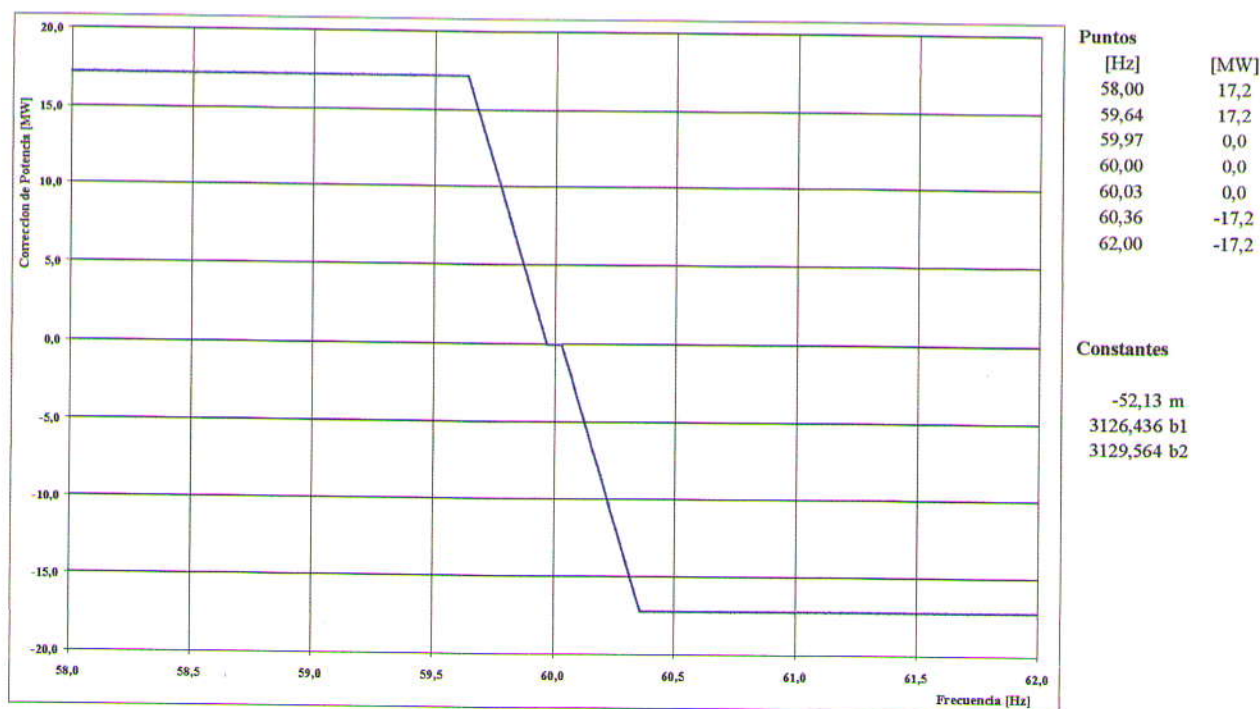
$$P[MW] = -59.7 \times 52.13 + 3126.44[MW]$$

$$P[MW] = 14.08 MW$$

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.

Figura No. 1. FUNCIÓN DE REGULACIÓN PRIMARIA DE FRECUENCIA



Consejo Nacional de Operación CNO

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 [MW]	Total
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 [MW]	Total
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

Consejo Nacional de Operación

CNO

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.

```
XFACTGEN/ 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.

Consejo Nacional de Operación

CNO

Registadores

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 de TERMOEMCALI 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.

Consejo Nacional de Operación CNO

ANEXO 2

PROTOCOLO PRUEBA DE ESTATISMO Y BANDA MUERTA PLANTA TERMOGUAJIRA

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, CORELCA 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

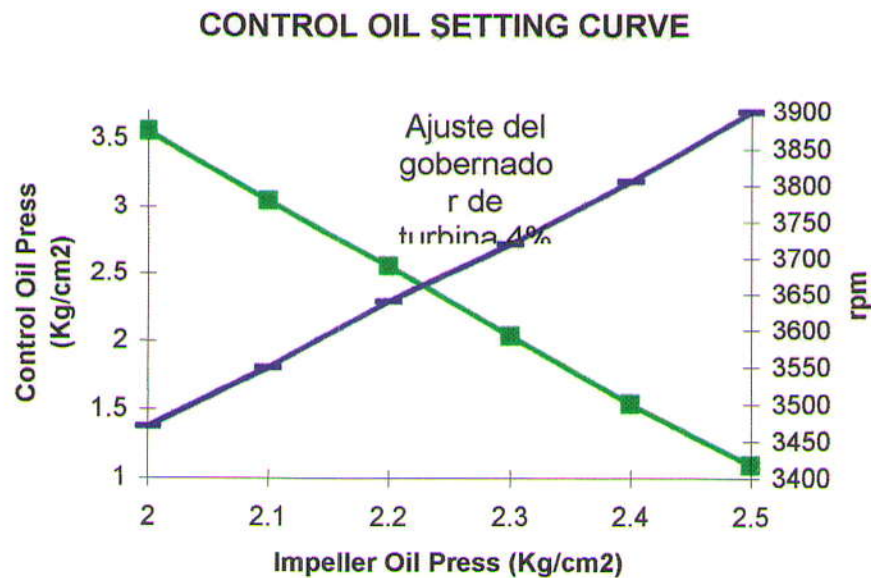
Consejo Nacional de Operación CNO

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



DESCRIPCION DEL PROCEDIMIENTO

Características técnicas de las unidades:

Consejo Nacional de Operación

CNO

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 actúa 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 varía 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 límite máximo del 6% de 3600 rpm de velocidad nominal, es decir que el límite superior es de 3816 rpm (+6%) y el límite inferior es de 3384 rpm (-6%). Actualmente los ajustes están así : el límite superior es de 3820 rpm y el límite inferior es de 3374 rpm. Para velocidades fuera de estos rangos actúan los dispositivos de seguridad (DUMP VALVE) y protección, quedando la unidad en posición de no carga.

Pruebas de regulación primaria

Consejo Nacional de Operación

CNO

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%.

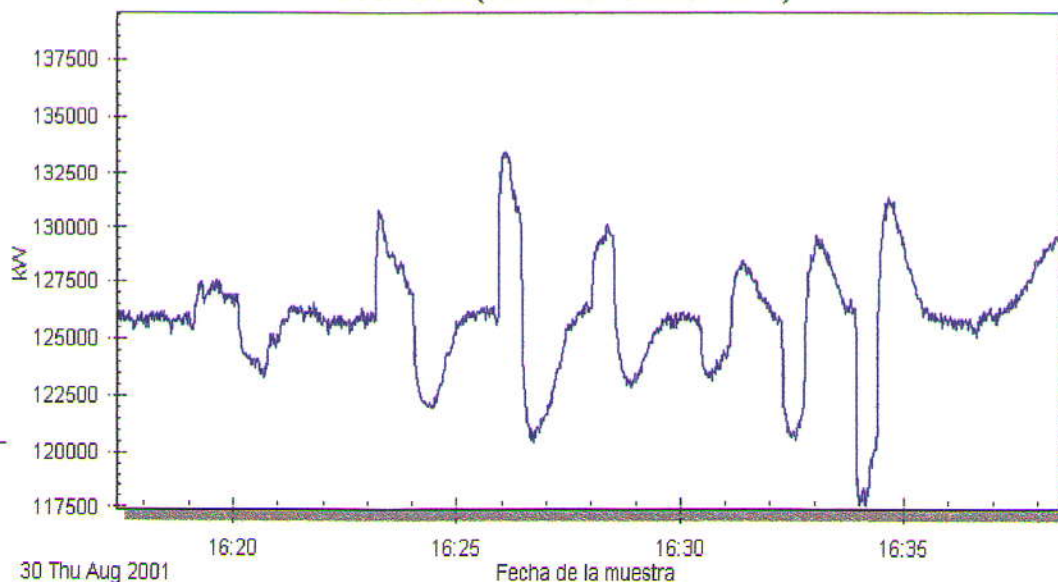
Para las variaciones de la referencia de la velocidad en el diagrama de control digital de turbina dentro del rango de banda muerta (± 3 rpm) no se presentaron variaciones de potencia en las unidades.

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.

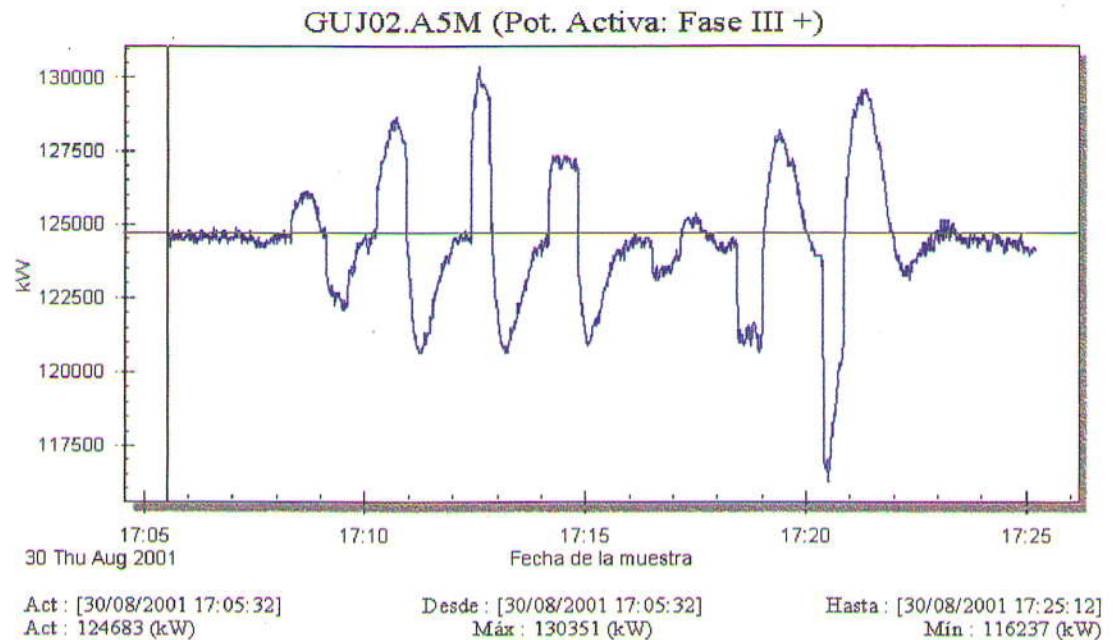
Paralelamente se tomaron lecturas de potencia y la frecuencia, las cuales se monitorearon con el sistema de la planta.

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:

TG01.A5M (Pot. Activa: Fase III +)



Consejo Nacional de Operación CNO



De los datos obtenidos de Δf y ΔP se calcula el valor real del estatismo de la unidad.

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

Donde S : estatismo

$$\Delta F = F_o - F_f$$

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

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

F_n : Frecuencia nominal = 60 Hz

$$\Delta P = P_o - P_n$$

Consejo Nacional de Operación CNO

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

Prueba de estatismo de unidad Termoguajira I								
Hora o	Po (Mw)	Hora f	Fo (rpmo)	Pf (Mw)	Ff (Mw)	ΔP	Δf	Estatismo (S)
16:19:06	125.419	16:19:14	3606	127.379	3608	-1.96	-2	4.535
16:20:04	126.916	16:20:41	3608	123.343	3604	3.573	4	4.976
16:23:11	125.879	16:23:16	3606	130.838	3612	-4.959	-6	5.377
16:24:01	127.034	16:24:26	3612	121.959	3606	5.075	6	5.255
16:26:25	130.377	16:26:43	3616	120.461	3605	9.916	11	4.930
16:28:01	126.341	16:28:22	3606	130.146	3610	-3.805	-4	4.672
16:28:30	129.569	16:28:52	3610	123.113	3603	6.456	7	4.819

Prueba de estatismo de unidad Termoguajira II								
Hora o	Po (Mw)	Hora f	Fo (rpmo)	Pf (Mw)	Ff (Mw)	ΔP	Δf	Estatismo (S)
17:08:19	124.35	17:08:38	3606	126.128	3608	-1.778	-2	4.999
17:08:50	125.906	17:09:30	3608	122.127	3604	3.779	4	4.704
17:10:55	127.462	17:11:14	3612	120.683	3606	6.779	6	3.934
17:12:50	129.351	17:13:10	3616	120.683	3606	8.668	10	5.127
17:14:09	124.35	17:14:15	3606	127.35	3610	-3	-4	5.926
17:14:49	126.906	17:15:03	3610	121.017	3604	5.889	6	4.528

Conclusiones

El valor final de estatismo de cada una de las unidades de Termoguajira se calcula del promedio de las mediciones realizadas obteniendose los siguientes resultados :

Unidad Termoguajira 1 : 4.94 %.

Unidad Termoguajira 2 : 4.87 %

Rango de Banda Muerta Planta Termoguajira : ± 50 mHz (± 3 rpm)

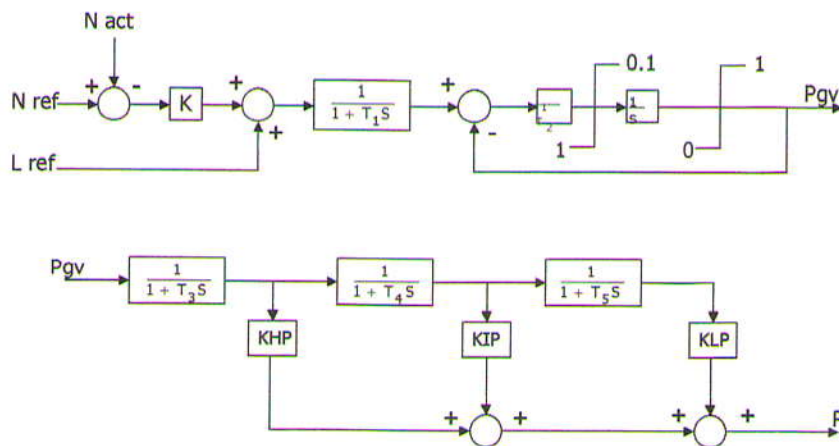
Consejo Nacional de Operación

CNO

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.

Diagrama de bloques del funcionamiento del gobernador de turbina unidad 1 y 2 de Termoguajira



Consejo Nacional de Operación

CNO

Diagrama de bloques del funcionamiento del gobernador de turbina unidad 1 y 2 de Termoguajira - función de Transferencia

Item		Unit 1	Unit 2
N ref	RPM set value	1	1
N act	RPM actual value	1 (at rated)	1 (at rated)
K	1/droop (droop 4% or 5%)	20~25	20~25
L ref	Load set	1 (at rated)	1 (at rated)
T1	Time const. Of E/H converter	0.220	0.220
T2	Time const. Of GV servomotor	0.250	0.250
T3	Time const. Of Steam chest	0.210	0.210
T4	Time const. Of reheater	11	11
T5	Time const. Of cross-over pipe	0.40	0.40
KHP	HP part power	0.258	0.261
KIP	IP part power	0.372	0.404
KLP	LP part power	0.370	0.335

MODELO DETALLADO DE LAS MAQUINAS

ITEM		TEG1	TEG2
H	Inercia del grupo en segundos	6.5035	6.0935
RA	Resistencia del estator en p.u.	0.001	0.001
X2	Reactancia de secuencia negativa en p.u.	0.0662	0.0658
X0	Reactancia de secuencia cero en p.u.	50.021	50.020
Xd	Reactancia sincrónica de eje directo en p.u.	0.9136	0.9713
X'd	Reactancia transitoria de eje directo en p.u.	0.0810	0.0809
X''d	Reactancia subtransitoria de eje directo en p.u.	0.0667	0.0663
Xq	Reactancia sincrónica de eje en cuadratura en p.u.	0.9713	0.9713
X'q	Reactancia transitoria de eje en cuadratura en p.u.	0.0919	0.0919
X''q	Reactancia subtransitoria de eje en cuadratura en p.u.	0.0660	0.0660
T'do	Constante de tiempo transitoria de eje directo y circuito abierto en segundos	8.740	8.740
T''do	Constante de tiempo subtransitoria de eje directo y circuito abierto en segundos	0.0520	0.0520
T'qo	Constante de tiempo transitoria de eje en cuadratura y circuito abierto en segundos	8.740	8.740
T''qo	Constante de tiempo subtransitoria de eje en cuadratura y circuito abierto en segundos	0.0520	0.0520
XL	Reactancia de dispersión del estator en p.u.	0.0914	0.0971
SAT 1	Saturación de la máquina a tensión nominal	0.48	0.48
SAT 1.2	Saturación de la máquina al 120% de la tensión nominal	0.50	0.50

Nota: Para el cálculo de los parámetros en p.u. Se tomó 202.5 MVA de potencia base.

Consejo Nacional de Operación CNO

MODELO DETALLADO DE LAS MAQUINAS

Unidad 1= 202.5 MVA

UNIDAD2= 191.5 MVA

TBASE= 13.8 PARA AMBAS UNIDADES

Nota: Para el cálculo de los parámetros en p.u. Se tomó 202.5 MVA de potencia base.

Consejo Nacional de Operación
CNO

ANEXO 3

PROTOCOLO TERMOTASAJERO

Consejo Nacional de Operación CNO

DRAWING No.		REVISIONS		APPROVE	CHECKED
64900-4406		No.	DESCRIPTION (DATE)		
DRAWING No. 64900-4406 R. J2	設計				
	校核				
	承認				
	工程				
	材料				
	加工				
	組立				
	検査				
	保管				
	廃棄				
	計測				
	塗装				
	包装				
	運送				
	使用				
	修理				
	廃止				
	その他				
	FOR APPROVAL				
	A4 x 4 SHEET(S) WITH COVER				
COMPUTERCONTROL SYSTEM PRODUCTS SECTION		COLOMBIA TERMO TASAJERO			
APPROVED		SITE TEST PROCEDURE FOR SPEED REGULATION TEST			
CHECKED <i>[Signature]</i>					
DRAWN <i>[Signature]</i>					
CONFIRMED		SCALE		REV. No.	
P/M		ORDER	ITEM	DRAWING No.	
		04279	64900	64900-4406	0
 MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD. NAGASAKI SHIPYARD & MACHINERY WORKS					

DRAWN 9/04T/2001 ISSUED

Consejo Nacional de Operación CNO

CONTENTS

	Page
1. Purpose	1
2. Schedule	1
3. Test condition	1
4. Operation Procedure for test	1
5. Record of operation data	1
6. Control Logic and Set point	2

Consejo Nacional de Operación

CNO

1. Purpose

This test will be carried out to confirm the Speed Regulation.

2. Schedule

APC load swing test finality day

3. Test condition

- a. Coordinate Control mode 70%load(1225MW) condition
- b. Pure coal firing
- c. DEH

Steam control : out of service

4. Operation Procedure for test

The Speed set point(drop) should be changed temporary by DEH Logic and APC Logic.
(Please refer to page.22)

5. Record of operation data

Before Test				After Test			
Time	Po(MW)	F(rpm)	GV Demand(%)	Time	P(MW)	F(rpm)	GV Demand(%)

Formula of Speed Regulation

$$\text{Speed Regulation (\%)} = \Delta P \text{ (Hz)} / \Delta P \text{ (MW)} \times 1680\text{MW} / 60\text{Hz} \times 100\%$$

Result		
Dp	Df	Speed Regulation

Po → Before data(actual generator load)

F → Before data(actual turbine speed)

Pf → After data(actual generator load)

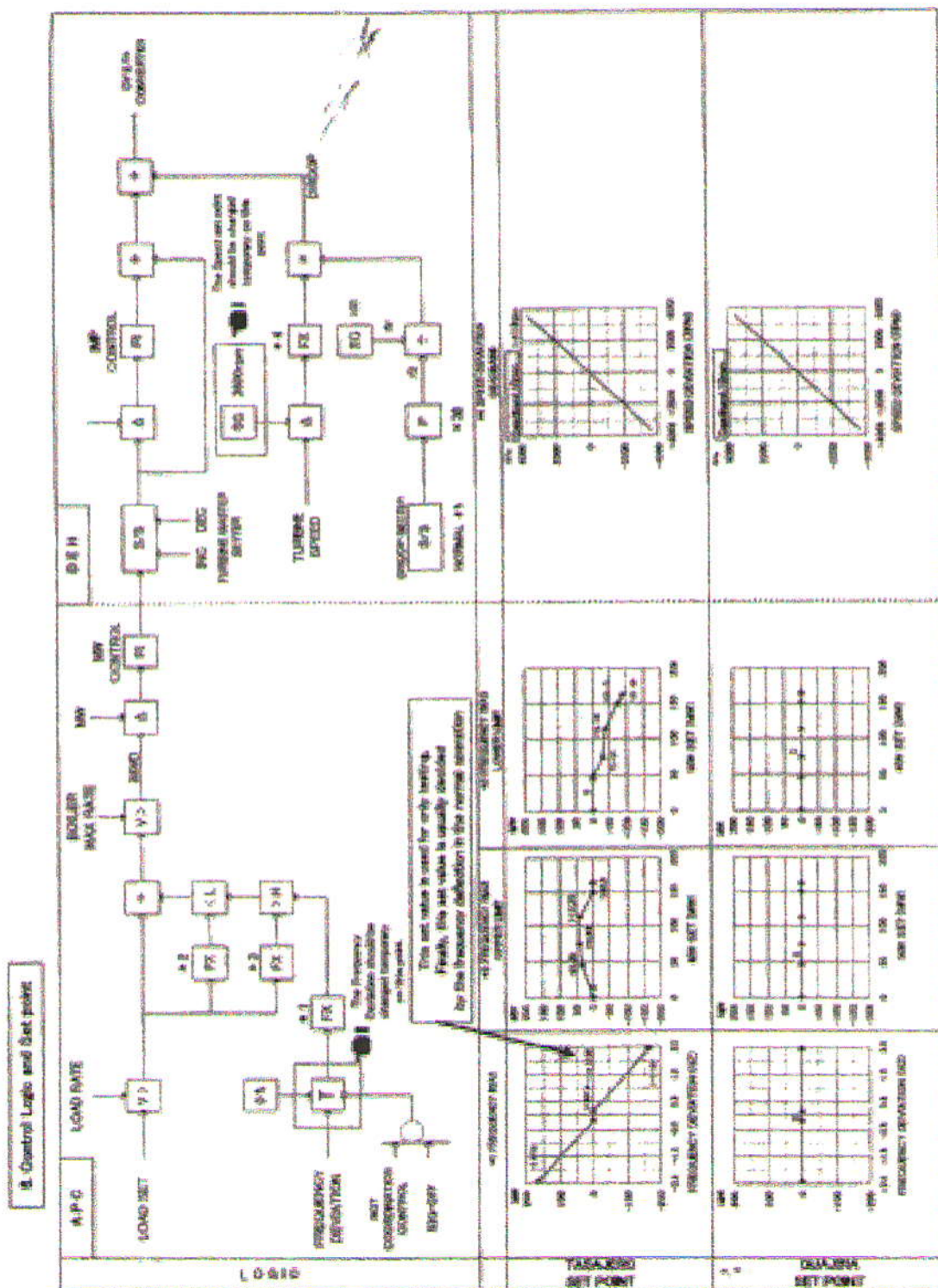
Ff → After data(actual turbine speed)

Dp → Pf - Po

Df → Ff - F

Consejo Nacional de Operación

CNO



Consejo Nacional de Operación CNO

ANEXO 4

PROTOCOLO BARRANCA 3

PROCEDIMIENTO DE PRUEBA DE REGULACION PRIMARIA

1. UNIDAD BARRANCA 3

Para la Unidad 3, que cuenta con un Sistema de Control de Velocidad-Carga electrónico basado en tecnología PLC, no aplica el procedimiento de prueba establecido en el numeral 7.4.2. del Código de Operación (RES. CREG025-95), para la medición del Estatismo.

El desarrollo de las pruebas de Regulación Primaria sobre esta Unidad, tal como se establece en la Resolución, presenta los siguientes inconvenientes :

- Esta Unidad no cuenta con un limitador de apertura que pueda ser usado para bajar la carga de la máquina sin intervenir el mando de referencia de Carga.
- El Sistema de Control actual basado en tecnología PLC (reformado en el año de 1995) fue diseñado bajo un esquema atípico desde el punto de vista de regulación ya que presenta referencias independientes para la Velocidad y la Carga de la máquina (el control de Velocidad actúa mientras la máquina está por fuera del SIN, y el control de Carga interviene cuando se sincroniza la Unidad al Sistema). El control fue diseñado de esta manera pensando en obtener una mejor respuesta en control de Carga que permitiera posicionar la Unidad dentro de los límites de despacho programados, minimizando las desviaciones, obviamente sin perjuicio de la regulación primaria de frecuencia.

Debido a las características de regulación en la Unidad3 expuestas anteriormente, y basados en los análisis de las curvas de regulación típicas de los gobernadores de velocidad y la aplicación misma de las pruebas sobre estos gobernadores ; se observa que la forma de verificar cualitativa y cuantitativamente la Regulación Primaria de Frecuencia en la Unidad Barranca3, considerando el esquema actual de su Control, es “engañar” al Sistema de Control modificando la referencia de la frecuencia objetivo (60.00 Hz) hasta un valor tal que se pueda apreciar con la máquina en línea y por medio de un monitoreo continuo el aporte o rechazo de carga correspondiente al delta de frecuencia que ha sido simulado.

El procedimiento de prueba a seguir para la determinación del ajuste de Estatismo (Prueba de Regulación Primaria de Frecuencia) en la Unidad BARRANCA 3 es el siguiente :

1.1.1.1 Procedimiento prueba de Estatismo

1. Realizar un arranque normal de Unidad y acoplar la máquina al Sistema.
2. Cargar la Unidad a un valor aproximado de 33 MW.

Consejo Nacional de Operación

CNO

3. Estabilizar las condiciones del ciclo (Caldera, Turbina y Auxiliares) para la carga seleccionada. Apuntar la carga de la Unidad (**P₀**) y la frecuencia del Sistema (**f₀**).
4. Introducirse en el programa de control del PLC en modo "On-line" y realizar el cambio en la frecuencia objetivo en el bloque correspondiente al control de la Regulación Primaria. Se puede pasar la referencia desde 60.00 Hz hasta un valor determinado (**f₁**) que puede ser del orden de 59.40 (1% de disminución).
5. Esperar la estabilización en la respuesta de cambio de carga de la Unidad. Tomar el tiempo de respuesta y apuntar el nuevo valor de Carga (**P₁**) de la máquina.
6. Retornar el valor de referencia de la frecuencia a 60.00 Hz (frecuencia objetivo).
7. El valor del Estatismo (**R**) se calcula considerando el comportamiento de la Potencia entregada por la máquina ante la variación en el delta de frecuencia forzada por el cambio en la referencia. El cálculo realizado mediante varias muestras permitirá obtener un promedio bastante aproximado del ajuste de Estatismo. El Estatismo se calcula de la siguiente forma :

$$\%R = ((\Delta f / f_0) / (\Delta P / P_n)) \times 100\%$$

donde :

Δf	= $f_1 - f_0$
ΔP	= $P_1 - P_0$
f_0	= Frecuencia inicial
f_1	= Frecuencia de referencia – simulación
P_n	= Potencia Nominal de la Unidad
P_0	= Potencia inicial
P_1	= Potencia de Respuesta – ante simulación

1.1.1.2 Prueba de Banda Muerta

Para el caso de la Banda Muerta el procedimiento sugerido consiste en ir modificando paulatinamente la referencia de la frecuencia objetivo en el Sistema de Control hasta comenzar a observar cambios de carga en respuesta al delta de frecuencia. Lo anterior, por supuesto, con la máquina acoplada al Sistema en operación normal, para buscar determinar la banda de frecuencia que no causa respuesta alguna en Regulación Primaria.

Consejo Nacional de Operación CNO

Observaciones

- El Sistema de Control de la Caldera deberá mantener unos valores estables de presión y temperatura de vapor de entrada a la turbina durante el desarrollo de la prueba de estatismo descrita anteriormente para evitar introducir errores que falseen la medida.
- La instalación de los instrumentos de medida se hará en bornes del generador.
- Las pruebas de Estatismo y Banda Muerta exigen ciertas características en los instrumentos de medición usados. El medidor de frecuencia deberá contar con una resolución de 3 cifras decimales preferiblemente (aunque son aceptables 2 cifras decimales). Igualmente se sugiere la instalación de un equipo con capacidad de registro histórico de mínimo dos canales (para la Frecuencia y Potencia) con intervalos de grabación de datos no mayor a 4 segundos.

PROCEDIMIENTO DE PRUEBA DE REGULACION PRIMARIA

2. UNIDAD BARRANCA 3

AMPLIACION :

FUNCIONAMIENTO SISTEMA DE REGULACION VELOCIDAD-CARGA

La Unidad 3 cuenta con un Sistema de Control de Turbogrupos electrónico basado en tecnología PLC. Específicamente, el bloque de Control de Velocidad-Carga realiza principalmente las siguientes funciones básicas :

- Toma de Velocidad del Turbogrupos, desde el reposo hasta la velocidad de sincronismo (3600 rpm). Control de Velocidad para sincronización y acople de la máquina al SIN.
- Toma de carga mínima en sincronismo. Subida de carga de la máquina siguiendo una referencia dada por el operador, según rampa programada. Cambios automáticos e inmediatos de carga en respuesta a regulación de frecuencia del Sistema.

Para el cumplimiento de estas funciones, el Sistema de Control presenta referencias independientes para la Velocidad y la Carga de la máquina, tal como se observa en el diagrama de bloques adjunto.

El control de Velocidad actúa mientras la máquina está por fuera del SIN, llevando la máquina a la velocidad de sincronismo para el caso de un arranque y en todo caso, controlando la velocidad según referencia. Esta parte del control queda "virtualmente" fuera de servicio una vez se sincroniza la máquina al Sistema.

Consejo Nacional de Operación

CNO

El control de Carga interviene cuando se sincroniza la Unidad al Sistema. Una vez acoplada la máquina al SIN, el control dirige la carga de la Unidad de acuerdo con la referencia dada y siguiendo una rampa programada. Esta parte del control involucra la regulación primaria de frecuencia.

Operación de la regulación de frecuencia.

El bloque de regulación de frecuencia realiza la comparación entre la frecuencia objetivo que ha sido preestablecida en el programa de control (60.00 Hz) y la frecuencia real del Sistema. Así, de acuerdo con la magnitud y el signo del Delta de frecuencia resultado de la comparación, el bloque de regulación de frecuencia actúa directamente sobre la referencia de carga de la máquina (aumentando o disminuyendo esta referencia según sea el caso) e inmediatamente obliga a la máquina a reajustar la carga (MW) de acuerdo con la pendiente de regulación del Sistema de Control (estatismo).

Prueba de la regulación de frecuencia (Estatismo).

Se observa que para verificar cualitativa y cuantitativamente la operación de la Regulación Primaria de Frecuencia en la Unidad Barranca3, considerando el esquema actual de su Control, solo se cuenta con dos alternativas posibles :

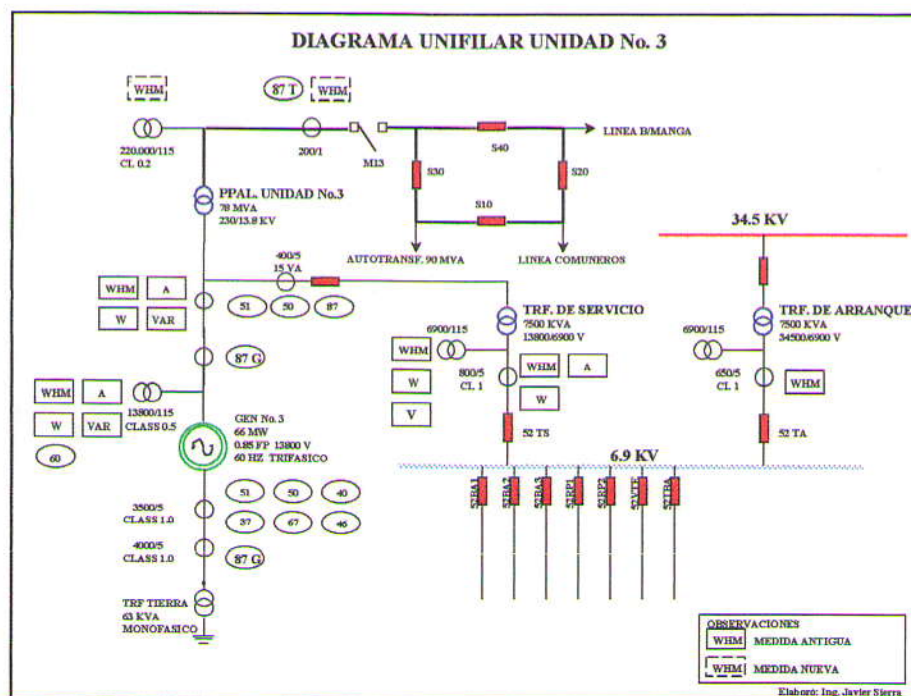
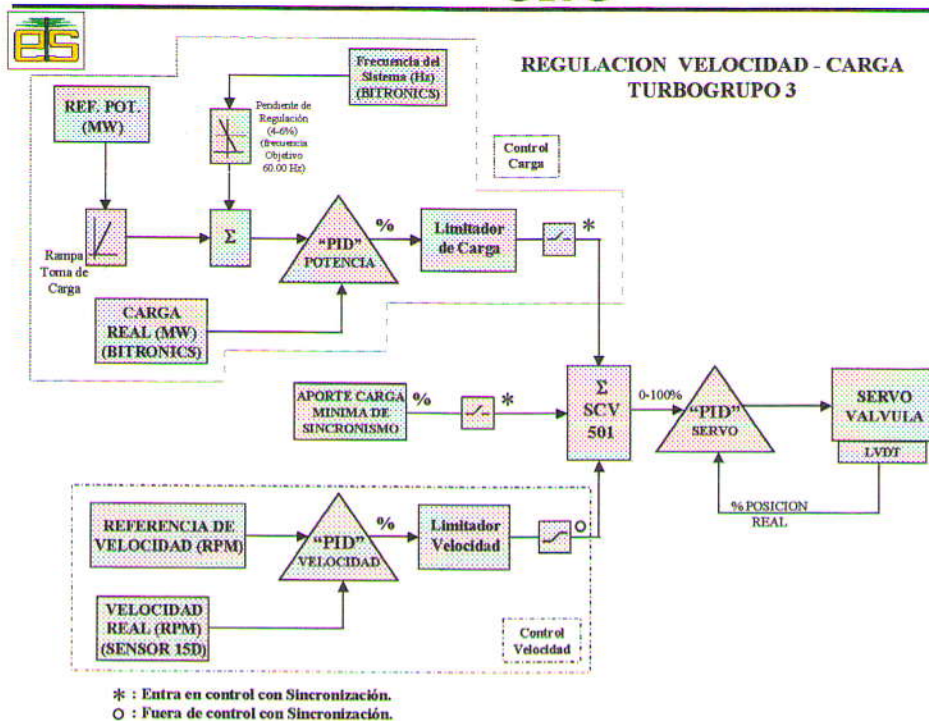
- Monitorear la Unidad en operación normal y observar el comportamiento de la máquina ante perturbaciones reales en el Sistema.
- “Engañar” al Sistema de Control modificando la referencia de la frecuencia objetivo (60.00 Hz) hasta un valor tal que se pueda apreciar con la máquina en línea y por medio de un monitoreo continuo el aporte o rechazo de carga correspondiente al delta de frecuencia que ha sido simulado.

Como conclusión se puede asegurar que, de acuerdo con las características del Sistema de Regulación, el procedimiento para la Unidad 3 tal como se establece en la propuesta enviada al CND tiene validez para verificar el grado de estatismo de la Unidad.

Observaciones

- La Caldera permite mantener valores estables de presión y temperatura de vapor de entrada a la turbina durante el desarrollo de la prueba de estatismo descrita anteriormente para evitar introducir errores que falseen la medida. La Caldera posee su propio Sistema de Control que asegura el sostenimiento constante de la presión de vapor.
- La instalación de los instrumentos de medida se hará en bornes del generador.

Consejo Nacional de Operación CNO



Consejo Nacional de Operación CNO

ELECTRIFICADORA DE SANTANDER S.A. E.S.P. GERENCIA DE GENERACION TERMOBARRANCA

CURVAS DE REGULACION (F vs P) UNIDAD 3

%Estatismo= 6

Curva 1	Curva 1	Curva 2	Curva 3	Curva 4
%DP	P (MW)	f (Hz)	f (Hz)	f (Hz)
100.00%	0.0	63.60	63.00	61.80
77.27%	15.0	62.78	62.18	60.98
69.70%	20.0	62.51	61.91	60.71
50.00%	33.0	61.80	61.20	60.00
16.67%	55.0	60.60	60.00	58.80
0.00%	66.0	60.00	59.40	58.20

Curva 1
%Df
6.00%
4.64%
4.18%
3.00%
1.00%
0.00%

Ecuación de la recta de Regulación Total - Curva 1 (66.0 MW) :

$$f = m \cdot P + b$$

$$f = -0.054545 \cdot P + 63.6$$

60.00 66.0

Ecuación de la recta de Regulación - Curva 2 (55.0 MW) :

$$b2 = f2 - m \cdot P2$$

$$b2 = 63.0000$$

$$f = -0.0545 \cdot P + 63.0000$$

60.00 55.0

Ecuación de la recta de Regulación - Curva 3 (33.0 MW) :

$$b3 = f3 - m \cdot P3$$

$$b3 = 61.8000$$

$$f = -0.0545 \cdot P + 61.8000$$

60.00 33.0

Ecuación de la recta de Regulación - Curva 4 (20.0 MW) :

$$b4 = f4 - m \cdot P4$$

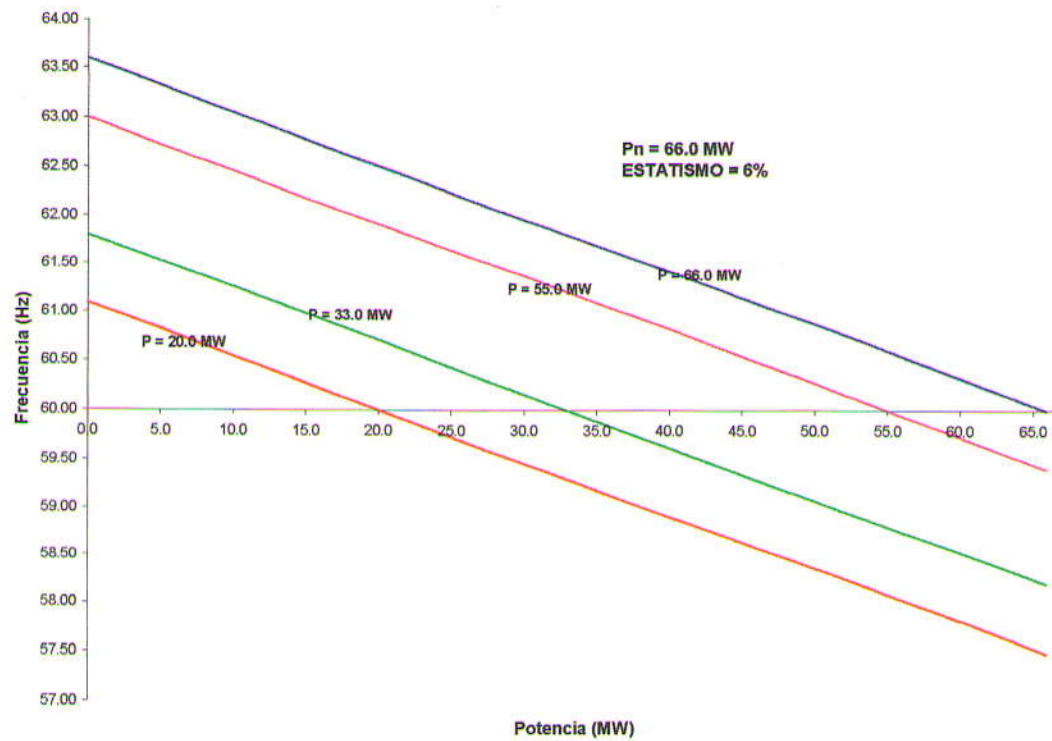
$$b4 = 61.0909$$

$$f = -0.0545 \cdot P + 61.0909$$

60.00 20.0

Consejo Nacional de Operación CNO

CURVAS DE REGULACIÓN FRECUENCIA vs CARGA
UNIDAD BARRANCA 3



Consejo Nacional de Operación CNO

ANEXO 5



GERENCIA DE GENERACIÓN

CENTRAL SAN CARLOS

**PROTOCOLO PRUEBA DE ESTATISMO REGULADORES DE VELOCIDAD CENTRAL SAN
CARLOS**

Consejo Nacional de Operación CNO

Agosto de 2001

PROTOCOLO PRUEBA DE ESTATISMO REGULADORES DE VELOCIDAD CENTRAL SAN CARLOS

PARÁMETROS UNIDADES

POTENCIA ACTIVA NOMINAL: 155MW

VELOCIDAD NOMINAL : 300 RPM

PARÁMETROS DECLARADOS AL CND

ESTATISMO: 6%

BANDA MUERTA: 0- 30 mHZ

EQUIPOS A UTILIZAR

Registrador de 8 canales Penny Giles

Computador portátil

Fuente de 5.000 V tomados del mismo regulador de velocidad en D05 AC20

Multímetro digital Fluke referencia 89 serie IV

Software a utilizar: Trend Manager Pro

Consejo Nacional de Operación

CNO

1.1.1.3 PROCEDIMIENTO

1. Unidad conectada al SIN y generación mayor de 12MW
2. Se verifica que el ajuste de estatismo esté en el 6%
3. Con el multímetro se verifica que el valor de frecuencia referencia se encuentre en 5.000V $\approx$ 60Hz, si no está en ese valor, se ajusta.
4. Se instala registrador para lectura de: velocidad de la turbina: señal simulada como frecuencia del sistema, frecuencia referencia (60Hz) y potencia real generada.
5. Se conecta fuente de 5.00V de D05 AC20 a la entrada de la tarjeta de estatismo (PIN A26, módulo C33), para simular la velocidad de la turbina (frecuencia del sistema). Se ingresan 5.000 V para verificar que la unidad no realiza regulación primaria, porque el Δf es 0.
6. Se varía la señal de velocidad de la turbina hasta 5.008 que equivale a 60.1 Hz. También se hace en el otro sentido, variar el voltaje hasta obtener 4.9916 y esperar una respuesta similar de la unidad en sentido contrario
Realizar varias inyecciones de voltaje según la tabla de equivalencias.
7. La unidad debe hacer regulación primaria. Los datos de Δf y ΔP se pueden encontrar en los registros. Hallar el valor real del estatismo de la unidad.

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

Donde E : estatismo

$$\Delta F = F1 - F2$$

F1: Valor de velocidad de la unidad (frecuencia del sistema) antes de variarla = 60 Hz

F2: Valor de velocidad de la unidad (en frecuencia) después de variarla.

F_n : Frecuencia nominal = 60 Hz

$$\Delta P = P1 - P2$$

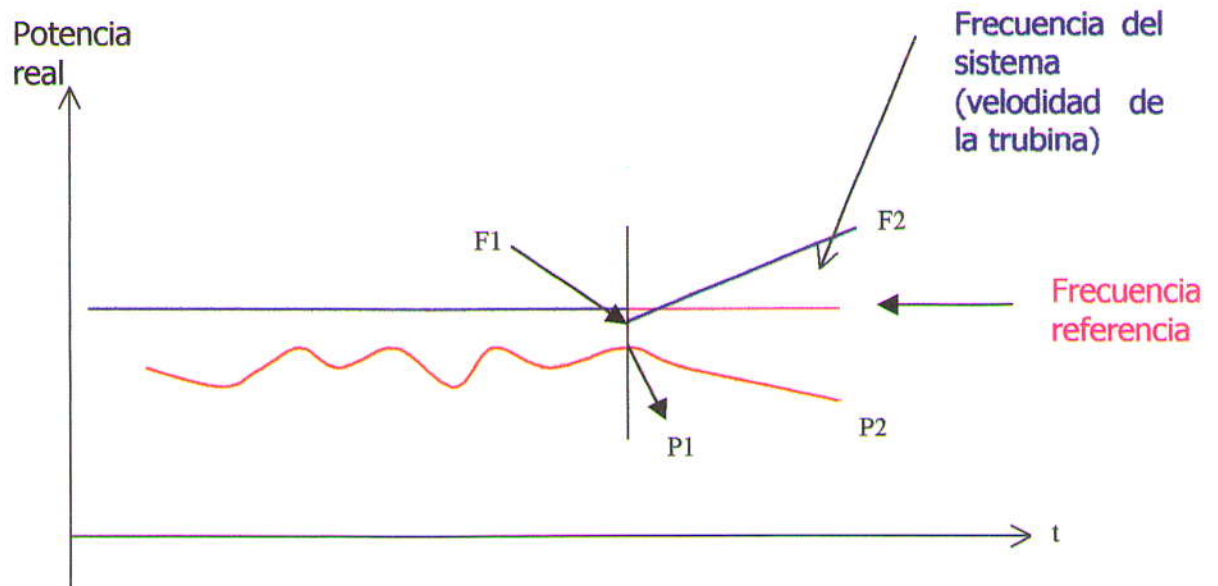
P1 : Valor de la potencia de la unidad en el mismo instante t en el que se tomaron los valores de F1 y F2.

P2 : Valor hasta el cual llega la potencia por corrección, dado en un instante $t+1$.

P_n : Potencia nominal de la unidad = 155 Mw

Consejo Nacional de Operación CNO

En la gráfica, se pueden hallar los datos de F1, F2, P1 y P2.



EQUIVALENCIAS

Consejo Nacional de Operación CNO

VOLTAJE	FRECUENCIA
5.0166	60.2
5.008	60.1
5.000	60
4.991	59.9
4.983	59.8

PUNTOS DE LECTURA E INYECCION

- Velocidad de la unidad: Se saca señal de la fuente de 5.00V del regulador de velocidad en D05 AC20, se inyecta el amplificador de error (PIN A26, módulo C33), así: 0-10 V para 0-600 RPM donde $300 \text{ RPM} \approx 60 \text{ Hz}$
Con el potenciómetro U del modulo ETG10 se varía la fuente de voltaje.
- Señal de frecuencia referencia de la tarjeta de estatismo: En D05 A4 medir voltaje de 0 a 10 V donde $5.000 \text{ V} \approx 60 \text{ Hz}$
- Potencia real de la unidad : En bornera B101A 0-10 V para 0-200Mw

OBSERVACIONES:

- Se deben referenciar los comunes del rack en el cual se encuentra el módulo de estatismo.
- Se debe tener cuidado con los radios ya que los cables entre el ETR y el registrador son sensibles a esta señal y alteran los datos del regulador.

Consejo Nacional de Operación

CNO

ANEXO 6

CANOAS – SALTO – LAGUNETA - COLEGIO

Prueba de estatismo

EMGESA S.A. ESP considera que la prueba de estatismo considerada en el Anexo del Código de Conexión es destructiva.

Con el fin de realizar esta prueba se recomienda modificar el procedimiento así:

Consejo Nacional de Operación CNO

1. Conectar la unidad a la red y llevarla a su potencia máxima declarada con limitador de apertura al 100%.
- 2.1 En los reguladores electrónicos, registrar el valor del ajuste de velocidad/carga, la potencia generada y la frecuencia de la red.
- 2.2 En los reguladores electromecánicos, registrar la posición del actuador.
3. Desconectar la unidad bajando la potencia lentamente.
4. Simular la condición interruptor de unidad cerrado y abrir el limitador de apertura al 100%.
5. Llevar la unidad al ajuste de velocidad/carga o a la posición del actuador y registrar la velocidad de la turbina.
6. El estatismo se calcula como la diferencia de frecuencia alcanzada sobre la frecuencia nominal en porcentaje.

Con este procedimiento se logran controlar la sobrevelocidad de las unidades alcanzando el valor de equilibrio con respuestas exponenciales crecientes sin sobreimpulso.